

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

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 84 (1986)

Heft: 8: 125 Jahre Schweizerische Geodätische Kommission

Artikel: Die Rolle der Satellitengeodäsie in der Vermessung

Autor: Gurtner, W. / Beutler, G.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-233055>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

- [3] Eckardt P., Funk H., Labhart T., mit Beiträgen von Fischer W. und Gubler E., 1983. Postglaziale Krustenbewegungen an der Rhein-Rhone-Linie. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 2/83.
- [4] Fischer W., Kahle, H.-G.: 1982. Der Schweizerische Arbeitskreis Geodäsie/Geophysik. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 12/82.
- [5] Funk H., Gubler E., Basel Juli 1980. Höhenänderungen der Fixpunkte im Gotthard-Bahntunnel zwischen 1917 und 1977 und ihre Beziehung zur Geologie. *Eclogae geol. Helv.*, vol. 73/2, 583–592.
- [6] Gubler E.: 1976. Beitrag des Landesnivellements zur Bestimmung vertikaler Krustenbewegungen in der Gotthard-Region. *Schweiz. mineral. petrogr. Mitteilungen* 56, 1976.
- [7] Gubler E., 1981. Höhenänderungen im Simplongebiet. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* 12/81.
- [8] Gubler E., Kahle H.-G., Klingelé E., Müller St. and Olivier R., 1981. Recent crustal movements in Switzerland and their geophysical interpretation.
- [9] Gubler E., 1984. Die Bestimmung rezenter Krustenbewegungen mit Hilfe von Präzisionsnivellements – Ein Überblick. *Vermessungswesen und Raumordnung*, Heft 2, März 1984.
- [10] Gubler E., Kahle H.-G., 1984. Recent crustal movements and geophysical interpretation of geodynamic processes in the alpine mountain belt. Paper presented at the 5th International Symposium 'Geodesy and Physics of the Earth', Magdeburg, September 1984.
- [11] Gubler E., Schneider D., Kellerhals P., 1984. Bestimmung von rezenten Bewegungen der Erdkruste mit geodätischen Methoden. *Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle*, Technischer Bericht 84–17, Juni 1984.
- [12] Jeanrichard F.: 1973. Nivellement et sur-rection actuelle des Alpes. *Mensuration, Photogrammetrie, Génie rural* 1–73.
- [13] Jeanrichard F., 1974. Essais de mesure géodésique des mouvements horizontaux de la croûte terrestre. *Mensuration, Photogrammetrie, Génie rural* 3–74.
- [14] Kobold F.: 1977. Die Hebung der Alpen aus dem Vergleich des «Nivellement de Précision» der Schweizerischen Geodätischen Kommission mit den Landesnivellements der Eidgenössischen Landestopographie. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* 4–77.
- [15] Müller, St., Lowrie W.: 1980. Die geodynamische Entwicklung des westlichen Mittelmeerraumes und der Alpen. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* 12/80.
- [16] Schaer J-P., Jeanrichard F., 1974. Mouvements verticaux anciens et actuels dans les Alpes suisses. *Eclogae geologicae helvetiae*, vol. + 67, no 1, 1974.
- [17] Schneider D., 1985. 3D-Testnetz Turmann, Bericht und Vorschlag an die Arbeitsgruppe SATRAPE. Bundesamt für Landestopographie, Oktober 1985.
- [18] Zölly H., 1948. Geschichte der geodätischen Grundlagen für Karten und Vermessungen in der Schweiz. Verlag Bundesamt für Landestopographie, Wabern, 1948.

Adresse de l'auteur:
F. Jeanrichard
Office fédéral de topographie
CH-3084 Wabern

Die Rolle der Satellitengeodäsie in der Vermessung

W. Gurtner, G. Beutler

Die «klassischen» Messmethoden der Satellitengeodäsie (Richtungsmessungen, Distanz- und Dopplermessungen) wurden bzw. werden zur Lösung einer Vielzahl von wissenschaftlichen Fragestellungen eingesetzt. Bis jetzt ist es nur den Doppelmessungen gelungen, wenn auch bloss in speziellen Fällen, eine Brücke zur eigentlichen Vermessung zu schlagen. Mit der Einführung des neuen «Global Positioning System» ist jedoch zu erwarten, dass die Satellitengeodäsie nun in der Vermessung verschiedenste Anwendungen finden wird.

Les méthodes de mesure «classiques» de la géodésie spatiale (mesures de direction et de distance au satellite, mesures Doppler) ont été appliquées – et le sont encore – pour résoudre de nombreux problèmes scientifiques. Le lien avec la mensuration proprement dite n'a cependant été établi que par la méthode Doppler, et encore seulement pour quelques cas spéciaux. L'introduction du nouveau «Global Positioning System» permet d'espérer que la géodésie spatiale trouvera bientôt une application étendue dans le domaine de la mensuration.

1. Einleitung

Obschon die Geodäsie oft als die älteste Wissenschaft bezeichnet wird, besteht doch recht häufig eine gewisse Unsicherheit in der Beantwortung der Frage, welche Aufgaben die Geodäsie hauptsächlich zu lösen versucht, wie sie sich vom Begriff der «Vermessung» abgrenzt und welche Wechselwirkungen zwischen ihr und der Vermessung bestehen.

Der vorliegende Aufsatz möchte versuchen, auf die eingangs gestellten Fragen einige Antworten zu geben, wobei wir uns hier vor allem auf ein Teilgebiet der Geodäsie – die

Satellitengeodäsie – beschränken wollen. Die fundamentalen Aufgaben der Geodäsie können etwa folgendermassen zusammengefasst werden [1]:

1. Erstellen und Unterhalten nationaler und globaler dreidimensionaler geodätischer Kontrollnetze, wobei den zeitabhängigen Aspekten dieser Netze besondere Beachtung zu schenken ist.
2. Beschreibung und Beobachtung geodynamischer Phänomene (Polbewegung, Erdzeiten, Bewegung der Erdkruste).
3. Bestimmung des Schwerfeldes der Erde samt seinen zeitlichen Variationen.

Die Geodäsie kann sowohl als eigenständige (Erd-) Wissenschaft als auch als Teil der angewandten Mathematik, der Ingenieurwissenschaften oder der Geophysik angesehen werden.

Im Rahmen ihrer allgemeinen Aufgaben befasst sie sich ebenfalls mit der Erarbeitung von Beobachtungs- und Berechnungsmethoden. Sobald Ergebnisse der Geodäsie als anwendbar und «praxisreif» erkannt werden, finden sie mehr oder weniger schnell ihren Weg in die eigentliche Vermessung:

- Ausgleichsrechnung (Methode der kleinsten Quadrate)
 - A priori Geoid- und Lotabweichungsrechnung zur Verbesserung der mathematischen Modelle präziser Netze
- sollen als Beispiele aus angewandter Mathematik und physikalischer Geodäsie genügen.

Welche Rolle spielt nun die Satellitengeodäsie für die Vermessung?

2. Die Satellitengeodäsie von 1965 – 1985

Praktisch seit Beginn der unbemannten Raumfahrt wurden die Satelliten zur (globalen) Erdvermessung und zur Bestimmung des Schwerfeldes verwendet.

Die Hauptvorteile der Satellitengeodäsie liegen darin, dass

- grosse Distanzen überbrückt werden können (keine Sichtbarkeitsbedingungen zwischen den Fixpunkten),
- die Resultate in allen drei Dimensionen gleichzeitig anfallen (keine Auftrennung in Lage und Höhe),

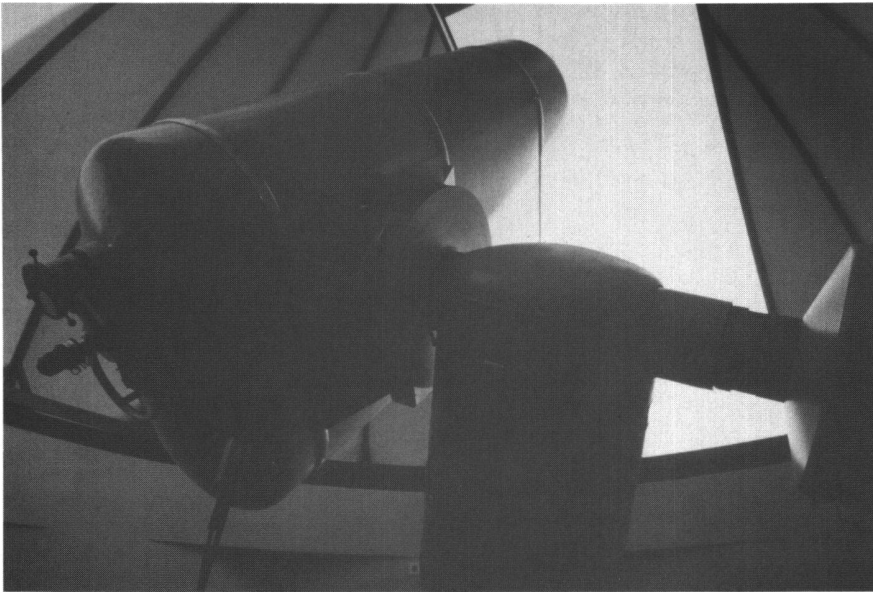


Abb. 1: Schmidt-Kamera in Zimmerwald

- das Gravitationsfeld mit hoher Genauigkeit im ganzen erdnahen Raum bestimmt werden kann,
- die Resultate in einem einheitlichen (im allgemeinen geozentrischen) Koordinatensystem gegeben sind.

2.1 Richtungsmessungen

Indem ein von der Sonne beleuchteter, respektive ein mit Blitzlampen ausgerüsteter Satellit zusammen mit dem Sternenhintergrund photographiert wird, kann dieser anschliessend auf der Photoplatte relativ zu Fixsternen, deren Positionen aus astronomischen Beobachtungen bekannt sind, eingemessen werden. Als Resultat erhalten wir die Richtung des Satelliten im Moment der Aufnahme in einem durch die Fixsterne gegebenen Koordinatensystem. Mit diesen Richtungen kann ein dreidimensionales (weltweites) Richtungsnetz aufgebaut werden. Der Massstab des Netzes muss anderweitig, z.B. aus terrestrischen Distanzmessungen, bestimmt werden.

Photographische Richtungsbeobachtungen wurden vor allem in der Zeit von 1965 – 1975 weltweit durchgeführt (Abb. 1). Als Resultat erhielt man ein weltumspannendes Netz von etwa 50 Stationen, deren gegenseitige Lage auf ungefähr 5 Meter genau bestimmt wurde [2]. Wegen des enormen Arbeitsaufwandes (Entwickeln und Ausmessen der Photoplatten) und der beschränkten Genauigkeit ist dieses Verfahren in letzter Zeit nicht mehr verwendet worden.

Sowohl wegen der geringen Punktdichte wie auch wegen der ungenügenden Genauigkeit lieferten die photographischen Richtungsbeobachtungen keine für die Vermessung direkt verwendbaren Ergebnisse. Immerhin wurde in Nordamerika ein zusätzliches, etwa 25 Punkte umfassendes Verdichtungsnetz (mit einer Verbindung nach Europa) beobachtet, welches den Rahmen für eine Neuausgleichung des amerikanischen Triangulationsnetzes bilden sollte [2].

2.2 Laser-Distanzmessungen

Die Distanzmessungen zwischen Bodenstationen und speziellen (mit Reflektoren ausgerüsteten) geodätischen Satelliten liefern die bis heute genauesten Koordinaten in einem geozentrischen System. Nachdem die dazu benützten Lasertelemeter wie auch die Auswertemethoden kontinuierlich verbessert wurden, konnte die Genauigkeit der Punktbestimmung von anfänglich etwa einem Meter auf wenige Zentimeter gesteigert werden (Abb. 2), dies natürlich nicht zuletzt wegen der ständig verbesserten Kenntnis des Gravitationsfeldes der Erde. Hauptanwendungen der Laserdistanzmessung liegen im Moment im Bereiche der Geodynamik: Die Bestimmung der Rotationsparameter der Erde (Polschwankung, Änderung der Rotationsgeschwindigkeit) sowie die Bestimmung der Kinematik der tektonischen Platten («Kontinentaldrift»).

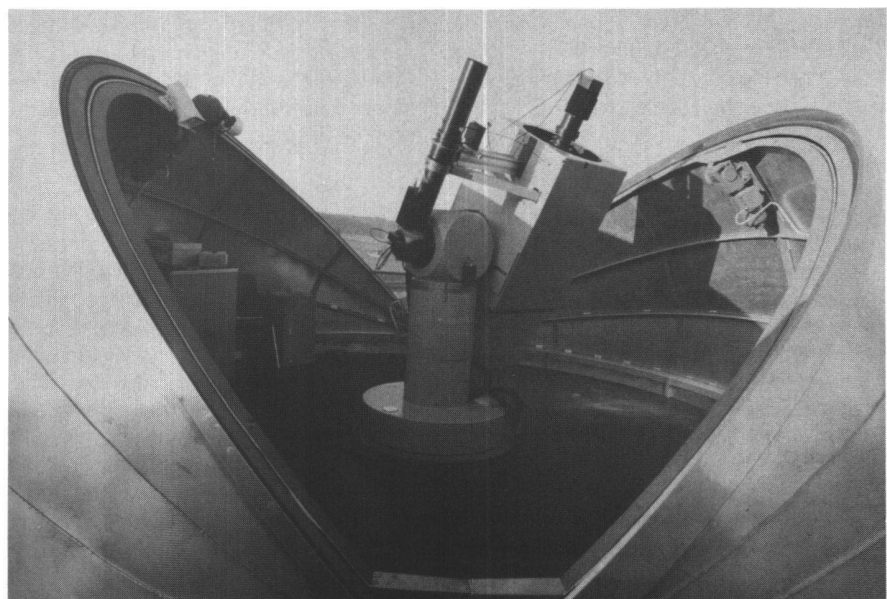


Abb. 2: Laser-Telemeter in Zimmerwald

Obschon die erreichbare Punktgenauigkeit auch für die Vermessung von hohem Interesse wäre, scheitert ein routinemässiger Einsatz von Satelliten-Lasertelemetern am Aufwand und an der Verfügbarkeit des Systems. Mit wenigen Ausnahmen sind alle der weltweit etwa 30 Laserstationen ortsgelunden, zudem können die Messungen nur bei schönem Wetter durchgeführt werden. Eine Messkampagne zur Bestimmung eines Neupunktes mit einem mobilen Laser könnte leicht einige Wochen bis Monate dauern.

Mit der Einführung des Global Positioning Systems (siehe Kap. 3) dürften die hochpräzise bestimmten Laserstationen als Referenzpunkte für einen allfälligen zivilen Bahnvermessungsdienst der GPS-Satelliten verwendet werden. Somit würde die Vermessung, wenn auch indirekt, doch mit der Laserdistanzmessung zu Satelliten in Berührung kommen.

2.3 Dopplermessungen (Transit-System)

Sendet ein Satellit dauernd ein Radiosignal konstanter Frequenz aus, wird dieses Signal auf der Erde mit höherer oder tieferer Frequenz empfangen, je nachdem, ob sich der Satellit auf den Empfänger zu oder von ihm weg bewegt. Aus dem Unterschied zwischen (bekannter) ausgesendeter und empfangener Frequenz kann berechnet werden, wie schnell sich der Satellit gegenüber dem Empfänger bewegt, respektive wie sich die Distanz Satellit – Empfänger ändert. Ist im Moment der Messungen die Bahn des Satelliten bekannt, kann daraus die Position des Empfängers im selben Koordinatensystem berechnet werden.

Die Signale der amerikanischen Transit-Satelliten des Navy Navigation Systems – ursprünglich ein rein militärisches System – werden heute von den verschiedensten zivilen Anwendern zur Positionsbestimmung und Navigation verwendet. Die geodäti-

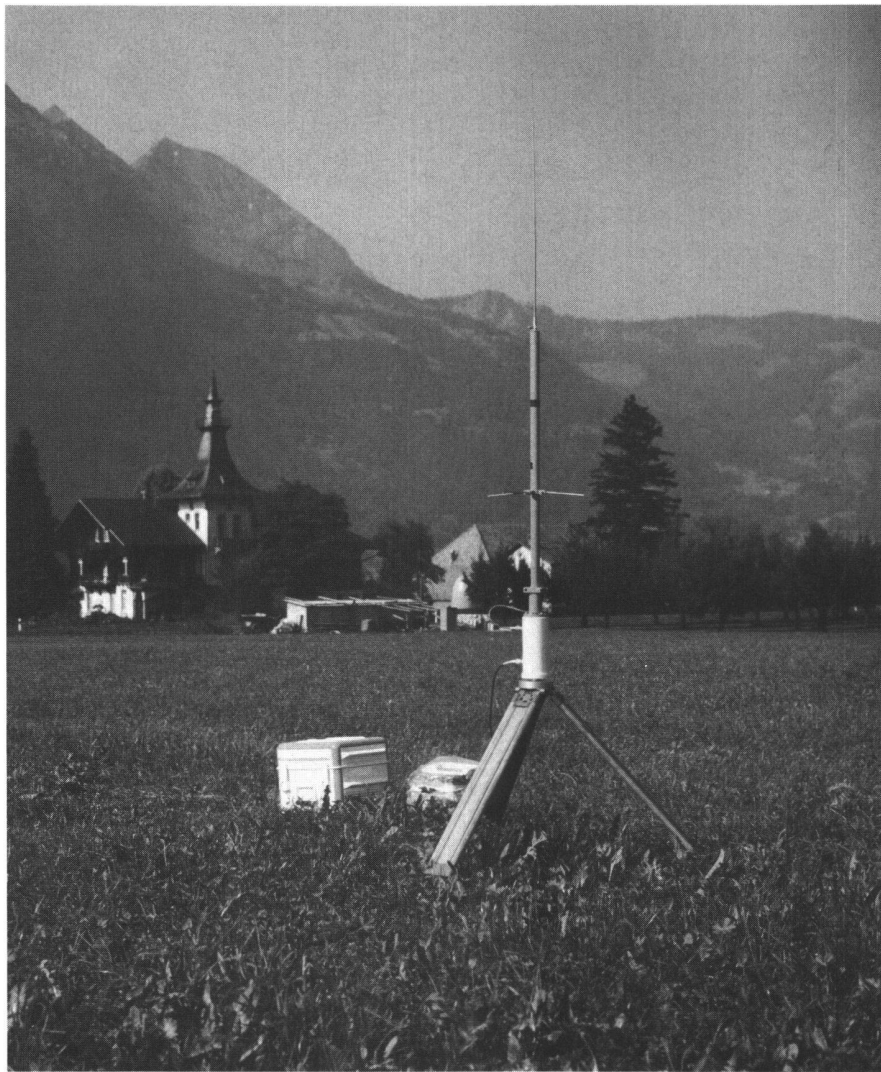


Abb. 3: Doppler-Empfänger MX-1502 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich.

schen Empfänger sind recht handlich, laufen während der Beobachtungszeit von einigen Stunden bis wenigen Tagen praktisch unbeaufsichtigt und liefern Punktkoordinaten mit Submeter-Genauigkeit (Abb. 3). Operieren mehrere Geräte gleichzeitig in der selben Region, können die relativen Koordinaten zwischen den einzelnen Empfängern auf wenige Dezimeter bestimmt werden.

Dopplergeräte wurden (und werden) für spezielle Aufgaben der Vermessung eingesetzt, beispielsweise zur

- Positionierung von Bohrseln
- Bestimmung eines Basistriangulationsnetzes (Netz nullter Ordnung)
- Bestimmung von Datumstransformationsparametern
- Überprüfung von Triangulationsnetzen auf systematische Fehler. Beispiel: SWISSDOC-Kampagne [3].
- punktwisen Bestimmung des Geoides im regionalen Rahmen. Beispiel: ALGEDOP (Schweiz, Italien, Oesterreich, BRD) [4]
- Passpunktbestimmung in der Photogrammetrie.

Dass das ursprünglich für eine Genauigkeit von etwa 100 Metern ausgelegte System heute mehr als hundert Mal bessere Resultate liefert, liegt – neben eigentlichen Systemverbesserungen (der Sender und Empfänger) – daran, dass mit den Methoden der Satellitengeodäsie genauere Schwerfeldparameter und verbesserte Auswertungsverfahren entwickelt wurden.

Trotz der eindrücklich grossen Zahl von geodätischen Benützern des Transit-Systems fehlte bis jetzt der eigentliche Durchbruch für die Anwendung satellitengestützter Verfahren in der Vermessung. Mit grosser Wahrscheinlichkeit steht dieser Durchbruch unmittelbar bevor: Alle Anzeichen deuten darauf hin, dass das neue Navigations- und Positionierungssystem GPS (Global Positioning System), als Nachfolger von Transit- und vielen weiteren, landgestützten Navigationssystemen, den Weg in die Vermessungsbüros finden wird. Im folgenden Kapitel soll deshalb näher auf diese neueste Entwicklung eingegangen werden.

3. Das Global Positioning System

Das GPS wurde bereits in den in der VPK erschienenen Aufsätzen [5], [6] und [16] vorgestellt. Die folgende Kurzbeschreibung soll versuchen, dem Leser zusätzliche Informationen zu vermitteln. Anschliessend soll vor allem auf die Aspekte eingegangen werden, welche für die geodätischen Anwendungen von besonderem Interesse sind.

3.1 Kurzbeschreibung

3.1.1 Allgemeines

Ähnlich wie das Transit Doppler-System ist auch das GPS wieder ein für die militärischen Bedürfnisse konzipiertes System. Seine Hauptaufgabe besteht darin, weltweit, jederzeit und sofort (in «Real Time») die Positionen und Geschwindigkeiten militärischer Vehikel mit einer allen militärischen Bedürfnissen genügenden Genauigkeit zur Verfügung zu stellen. (Die Positionierungsgenauigkeit ist in allen Fällen besser als 20 m).

Üblicherweise unterteilt man das GPS in drei sogenannte Segmente:

- a) Das *Kontrollsegment*, bestehend aus den Bodeneinrichtungen, welche die Bahnvermessung und -berechnungen durchführen, das einwandfreie Funktionieren der Satelliten überwachen und die Satelliten mit den Informationen versorgen, welche laufend den Benutzern weitergegeben werden.
- b) Das *Raumsegment*, bestehend aus 18 Satelliten (und drei zusätzlichen Reservesatelliten), die in drei verschiedenen Bahnebenen mit einer Umlaufzeit von ca. 12 Stunden so verteilt sind, dass praktisch immer und überall mindestens vier Satelliten über dem Horizont zur Verfügung stehen. Die Bahnen sind nahezu kreisförmig mit einem Radius von etwa 26 600 km und sind (in der endgültigen Konfiguration) gegenüber der Äquatorebene um 55 Grad geneigt.
- c) Das *Benutzersegment*, bestehend aus den – je nach Verwendungszweck verschieden konzipierten – Empfängern. Die meisten Empfänger enthalten so viel «Intelligenz», dass sie zumindest eine einfache Auswertung der empfangenen Signale gleich durchführen und dem Benutzer seine momentane Position mitteilen können.

3.1.2 Signale

Jeder Satellit sendet auf $\nu_1 \approx 1.6 \text{ GHz}$ (L_1) kontinuierlich die Summe zweier um 90° verschobener Trägersignale aus, die auf unterschiedliche Arten moduliert sind:

1. P-Code:

Nach jedem 154. Zyklus seiner Trägerwelle wird die Phase des Trägers um 180° gekippt, falls in einer vom Satelliten im selben Takt (also mit $\nu_1/154 =$

10.23 MHz) erzeugten Folge von 0 und 1 gerade ein Wechsel von 0 auf 1 oder umgekehrt stattfindet.

2. C/A-Code:

Er unterscheidet sich vom P-Code durch seine Taktfrequenz (1540 Zyklen der Trägerfrequenz) und der sogenannten Code-Länge: Er wiederholt sich jede Millisekunde, im Gegensatz zum P-Code, der eine Länge von 266 Tagen hat. (Letzterer soll aber jede Woche mit einer neuen Reihe gestartet werden und so dem Zugriff nicht-autorisierter Benutzer entzogen werden.)

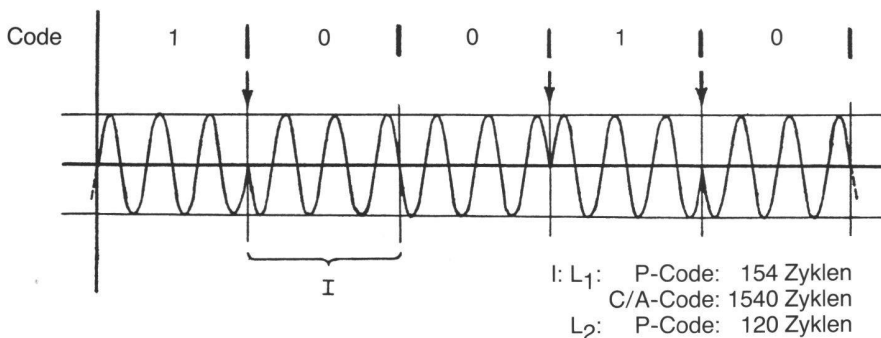


Abb. 4: Phasenmodulation der Trägerfrequenz

3. Daten:

50 Mal pro Sekunde werden beide Teilsignale zusätzlich gekippt, um dem Benutzer in binärer Form Systemdaten zur Verfügung zu stellen (Bahndaten, Korrekturwerte zu den Satellitenuhren und Statusinformationen des Satelliten).

Um Einflüsse der Ionosphäre auf die Signale bestimmen und eliminieren zu können, wird ein zusätzliches Signal L_2 mit einer Frequenz $\nu_2 \approx 1.2$ GHz ausgestrahlt. Es enthält jedoch den C/A-Code nicht.

Eine genauere Beschreibung des Codes und weitere Literaturhinweise findet man z.B. in [15].

3.1.3 Pseudo-Distanz-Auswertung

Die Abfolge des Bit-Musters ist im Falle des C/A-Codes eine für jeden Empfänger bekannte Funktion der Zeit. Für den P-Code wird die nötige Information nur autorisierten Benutzern zur Verfügung gestellt. Erzeugt nun der Empfänger selbst ein durch seine interne Uhr gesteuertes Bit-Muster nach der selben Vorschrift, kann er aus dem Vergleich mit dem aus dem empfangenen Signal extrahierten Muster herausfinden, wie lange das Signal unterwegs war, wie weit entfernt also der Satellit war. Aus den gleichzeitig gemessenen Distanzen zu drei Satelliten mit bekannter Position kann sofort der Ort des Empfängers berechnet werden. Da die dazu notwendige Voraussetzung, dass die Empfängeruhr perfekt mit den Satellitenuhren synchronisiert ist, praktisch nie erfüllt ist, benötigt der Empfänger die Messung zu einem vierten Satelliten, um seinen Uhrenfehler ebenfalls bestimmen zu können. Da alle gemessenen Distanzen um den Ein-

fluss des Uhrenfehlers verfälscht sind, spricht man oft von «Pseudo-Distanzen». Die erreichbare Genauigkeit beträgt für den P-Code wenige Meter; der C/A-Code liefert etwa zehnmal schlechtere Resultate. Sobald das System voll operationell sein wird, soll künstlich dafür gesorgt werden, dass C/A-Code-Lösungen in «Real Time» nicht besser als 100 m (2σ) werden können.

3.1.4 Phasenmessungen

Wesentlich genauere, für die Vermessung hochinteressante Resultate können mit zwei Verbesserungen erreicht werden.

1. Differentielle Beobachtungen:

Indem nicht absolute Punktebestimmungen versucht, sondern durch gemeinsame Auswertung der Beobachtungen verschiedener Instrumente über eine längere Zeitspanne (Stunden) nur Koordinaten-differenzen zwischen den Instrumenten bestimmt werden, können viele systematisch wirkende Fehler grösstenteils eliminiert werden (z.B. Bahnfehler der Satelliten, Einflüsse der Ionosphäre und der Troposphäre). Falls nur Differenzen der Beobachtungen zwischen den Instrumenten bzw. der Satelliten verarbeitet werden, werden die Fehler der Satelliten- bzw. Instrumentenuhren weitgehend eliminiert; sie müssen deshalb nicht explizite für jeden Beobachtungszeitpunkt neu berechnet werden.

2. Werden anstelle der Codes direkt die Phasen der Trägerfrequenzen gemessen, verliert man zwar die Information der absoluten Distanz (die Phasen sind nicht «angeschrieben»): Die Phasenlage zu einem bestimmten Zeitpunkt kann jedoch auf wenige Millimeter genau ermittelt werden. Die gebräuchlichsten Auswertemethoden lassen sich auf die folgende Beobachtungsgleichung zurückführen (siehe auch in [15]):

$$\Delta r_{12} = r_1 - r_2 = N \cdot \lambda + \Phi_2 - \Phi_1 + (c - \dot{r}_1) \cdot \Delta t + d(\Delta r)_{\text{ION}} + d(\Delta r)_{\text{TROP}}$$

Aus einer einfachen geometrischen Überlegung folgt nämlich, dass die Differenz der Distanzen r_1, r_2 zweier Empfänger zum Satelliten gleich der Differenz der zwischen 0 und der einfachen

Wellenlänge normierten gleichzeitigen Phasenmessungen der beiden Empfänger plus ein vorerst unbekanntes ganzes Vielfaches der Trägerwellenlänge λ ist. $(c - \dot{r}_1) \cdot \Delta t$ berücksichtigt den Unterschied Δt der beiden Empfängeruhren, $d(\Delta r)_{\text{ION}}$ und $d(\Delta r)_{\text{TROP}}$ entsprechen den differentiellen Einflüssen der Ionosphäre und Troposphäre auf die Phasenmessungen.

Der hauptsächlich Störfaktor $c \cdot \Delta t$ kann eliminiert werden, indem die Beobachtungsgleichungen zu zwei verschiedenen Satelliten subtrahiert werden. Dies führt zu den sogenannten «doppelten Differenzen», die von der «Berner Software» [7] als Observable benützt werden.

Die eigentlichen Unbekannten, die Koordinaten (-Differenzen) der beiden Empfänger, stecken in den Distanzen r_1 und r_2 . Als zusätzliche Unbekannte muss die sogenannte «Ambiguity» N bestimmt werden. Unter günstigen Voraussetzungen kann ihr aber anschliessend der wahre ganzzahlige Wert zugeordnet werden. Dies führt dann auf eine neue Ausgleichung ohne diese Unbekannte und damit auf eine wesentlich genauere Bestimmung der restlichen Unbekannten.

3.2 Erfahrungen mit GPS

Die folgenden Beispiele von GPS-Anwendungen wurden alle mit den am Astronomischen Institut der Universität Bern entwickelten Computer-Programmen ausgewertet.

3.2.1 Kurze Basislinie

1984 wurde im Rahmen eines grösseren Tests in Quebec, Kanada, eine mit Invardraht vermessene Basislinie von etwa 550 m Länge mit 2 Macrometer GPS-Empfängern beobachtet.

Der Unterschied zwischen der GPS-Lösung und der terrestrisch ermittelten Länge betrug 0.6 mm.

3.2.2 Triangulationsnetz hoher Präzision

Im Dezember 1984 wurden am CERN 7 Punkte des Kontrollnetzes für den neuen Beschleuniger in drei Nächten mit Macrometer-Empfängern beobachtet. Die Grösse des Netzes beträgt etwa 12×12 km. Die mittleren Abweichungen gegenüber der terrestrischen Lösung waren in Lage und Höhe pro Koordinate 4 mm [6].

3.2.3 Testnetz Turtmann

Im Herbst 1985 wurde bei Turtmann ein spezielles Testnetz mit verschiedenen Empfängertypen gemessen. 7 Punkte bilden ein Netz von ca. 4×6 km mit einer maximalen Höhendifferenz von 900 m. Erste Vergleiche mit einer provisorischen terrestrischen Lösung zeigen mittlere Abweichungen von 7 mm [8].

3.2.4 Alaska-Kampagne 1984

Vergleiche zwischen der GPS-Lösung und Koordinaten, welche aus Very Long Baseline Interferometry (VLBI) ermittelt wurden,

zeigten in einem etwa $500 \times 1500 \text{ km}$ grossen Teilnetz der Alaska-Kampagne mittlere Abweichungen von 4 cm [9] und [16].

3.2.5 High Precision Baseline Test, März 1985

Erste, im März 1986 vorliegende, sehr provisorische Auswertungen einer in Nordamerika durchgeführten GPS-Kampagne zeigen folgende Ergebnisse:

Der Vergleich mit VLBI-Koordinaten von 6 Punkten ergibt mittlere Abweichungen von 20 cm bei einer Netzausdehnung von etwa $2000 \times 4200 \text{ km}$ [10].

Die hier aufgeführten Beispiele zeigen, dass es möglich ist, eine relative Genauigkeit von 10^{-6} bei kleinen und mindestens 10^{-7} bei grossen Netzen zu erreichen.

3.3 Anwendungen in der Vermessung

Auf Grund der bis jetzt vor allem in Nordamerika und Europa durchgeführten GPS-Vermessungen (eine Auswahl findet man z.B. auch in [11] aufgelistet) können wir bereits jetzt abschätzen, welche Bedeutung das GPS für die Vermessung sicher auch in der Schweiz haben wird.

3.3.1 Triangulation

Das GPS eignet sich vorzüglich, bestehende Triangulationen zu überprüfen, zu ergänzen oder wahrscheinlich auch zu rekonstruieren. Besondere Beachtung sollte dabei der Verknüpfung mit dem bestehenden Höhensystem geschenkt werden, da GPS die (ellipsoidische) Höhe mit nahezu der gleichen Genauigkeit wie die Lage liefern kann. Ein weiteres Problem stellt natürlich die (schon von der Einführung der elektronischen Distanzmessung bekannte) Tatsache dar, dass das neue Verfahren Zwänge in der bestehenden (übergeordneten) Vermessung aufdecken kann, dass somit unter Umständen ein genaueres Netz in ein ungenaueres eingepasst werden muss.

Es wurde bereits mehrmals festgestellt, dass das GPS nicht nur bessere Resultate liefert, sondern auch wesentlich kostengünstiger arbeitet – selbst unter Berücksichtigung der hohen Instrumentenkosten.

3.3.2 Amtliche Vermessung

Relativ einfach dürfte es sein, Polygonnetze mit GPS einzumessen. Entsprechende Abklärungen werden beispielsweise in St. Paul, einer Stadt in Minnesota, bereits getroffen. Die Frage stellt sich natürlich, inwieweit überhaupt das Konzept Triangulationsnetz – Polygonnetz – Detailpunkte in einer voll auf GPS ausgerichteten Vermessung noch sinnvoll sein wird. Unter Umständen könnte sich zeigen, dass Referenzpunkte nur noch temporär erstellt werden müssen, wann und wo sie tatsächlich gebraucht werden. Damit würde das kostenintensive Erstellen und Unterhalten eines ganzen Polygonnetzes entfallen. Der routinemässige Einsatz von GPS in der Vermessung ist unter anderem von folgenden Faktoren abhängig:

- Genauigkeit, Zuverlässigkeit (Nachweis!), Verfügbarkeit des Systems (jetzt und in Zukunft)
- Kosten (Instrumente, Dauer der Messungen, notwendiges Personal)
- Einfachheit des Einsatzes (Ausbildung des Personals)
- Geregeltes Einsatzkonzept
- Rechtliche Probleme.

Zu einigen dieser Punkte laufen gegenwärtig in verschiedenen Ländern Untersuchungen, worüber laufend in Kongressen berichtet wird. B. Remondi vom US National Geodetic Survey (NGS) untersucht beispielsweise, ob die zur Vermessung von Detailpunkten mit Zentimetergenauigkeit nötige Zeit auf wenige Sekunden beschränkt werden kann. Erste Resultate zeigen, dass dies möglich sein dürfte [12]. Falls das dazu notwendige Einsatzkonzept und die Verarbeitung der Daten genügend einfach zu halten sind, könnte der Einsatz von GPS sogar auf Detailpunktaufnahmen ausgedehnt werden.

3.3.3 Tunnelnetze

Geradezu ideal könnte sich das GPS zur Erstellung von Tunnel-Grundlagenetzen eignen:

Prinzipiell genügt es, beide Portale sowie je die zur Richtungsübertragung in die Tunnelachse notwendigen Anschlusspunkte direkt mit GPS einzumessen.

Besondere Beachtung müsste dem Höhensystem geschenkt werden: Die aus dem GPS folgenden Höhen beziehen sich auf das entsprechende Referenzellipsoid. Der Unterschied zwischen der lokalen Niveaufläche des Schwerepotentials und dem Ellipsoid könnte rechnerisch ermittelt [13] und mit Lotabweichungsmessungen an den Tunnelportalen, z.B. mit einer transportablen Zenitkamera [14], verifiziert werden.

3.3.4 Rutschungs- und Deformationsmessungen

Ähnlich wie bereits jetzt die Doppler-Empfänger werden die zukünftigen GPS-Empfänger praktisch ohne Aufsicht Messungen durchführen. Es wird möglich sein, die Messdaten über Leitungen oder drahtlos zu zentralen Auswertegeräten zu übertragen. Somit könnte ein nahezu vollautomatisches, dauernd arbeitendes Überwachungssystem für kritische Bewegungsvorgänge der Erdoberfläche oder von Bauwerken erstellt werden.

Dank der hohen Genauigkeit und Raschheit der Messungen und der hohen Flexibilität im Aufbau eines Kontrollnetzes können schnell und einfach Resultate in kritischen Fällen erhalten werden.

Da bei Staumauer-Deformationsnetzen vermehrt auch die weitere Umgebung der Mauern einbezogen wird, könnte gerade in schwierigen topographischen Verhältnissen GPS wertvolle Dienste leisten.

3.3.5 Absteckungen

Zukünftige Instrumente werden in der La-

ge sein, differentielle Auswertungen in Echtzeit zu machen. Dazu müssten ihnen laufend die Messungen anderer Instrumente (drahtlos) übermittelt werden. Damit aber könnte GPS ebenfalls für die Absteckung von Punkten verwendet werden.

4. Schlussfolgerungen

Die Entwicklungen auf dem instrumentellen und konzeptionellen Sektor wie auch auf der Auswerteseite schreiten so rasch voran, dass die meisten der hier geschilderten Anwendungen zum Zeitpunkt des Vollausbauens von GPS Ende der achtziger Jahre vom rein technischen Gesichtspunkt her möglich sein werden. Ob sie sich auch tatsächlich durchsetzen werden, hängt sicher davon ab, wie weit ein vollständig neues Vermessungsverfahren von der Praxis akzeptiert wird. Ein wichtiger Aspekt wird die Grösse möglicher Kosteneinsparungen sein; daneben müsste sichergestellt sein, dass GPS oder ein mindestens gleichwertiges neues (ziviles?) System immer verfügbar ist.

Literatur:

- [1]: Geodesy: Trends and Prospect. National Academy of Sciences, Washington, 1978.
- [2]: Schmid, H.: Konzeptionelle und fehlertheoretische Betrachtungen zur Erstellung eines geodätischen Weltsystems mit Hilfe der Satellitengeodäsie. VPK 4/72.
- [3]: Wiget, A., Geiger, A., Kahle, H.-G.: Die Doppler-Messkampagne SWISSDOC: Ein Beitrag zur Landesvermessung in der Schweiz. VPK 2/85.
- [4]: Wiget, A., Kahle, H.-G., Geiger, A.: ALGEDOP: Ein Beitrag zur satellitengestützten Geoidbestimmung in der Schweiz. VPK 5/86.
- [5]: Matthias, H.J.: Navigation. VPK 4/85.
- [6]: Gurtner, W.: GPS-Testmessungen auf dem CERN-LEP-Kontrollnetz. VPK 6/86.
- [7]: Gurtner, W., Beutler, G., Bauersima, I.: Schildknecht, T.: Evaluation of GPS Carrier Difference Observations: The Bernese Second Generation Software Package. First International Symposium on Precise Positioning with the GPS, Rockville, 1985.
- [8]: Rothacher, M., Beutler, G., Gurtner, W., Geiger, A., Kahle, H.-G., Schneider, D.: The 1985 Swiss GPS-Campaign. Fourth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Austin, 1986.
- [9]: Beutler, G., Gurtner, W., Rothacher, M., Schildknecht, T., Bauersima, I.: Evaluation of the 1984 Alaska GPS Campaign with the Bernese Second Generation Software. AGU Fall Meeting, San Francisco, 1985.
- [10]: Beutler, G., Gurtner, W., Rothacher, M., Schildknecht, T., Bauersima, I.: Determination of GPS Orbits using Double Difference Carrier Phase Observations from Regional Networks. Fourth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Austin, 1986.
- [11]: King, R.W., Masters, E.G., Rizos, C., Stolz, A.: Surveying with GPS. Lecture Notes. University of New South Wales, Sidney, 1985.
- [12]: Remondi, B.W.: Performing Centimeter-Level Surveys in Seconds with GPS Carrier Phase: Initial Results. NOAA Technical Memorandum NOS NGS-43, Rockville, 1985.

- [13]: Gurtner, W.: Das Geoid in der Schweiz. Mitteilungen aus dem IGP, Heft 20, ETH Zürich, 1978.
- [14]: Bürki, B.: Die operationelle Bestimmung von Lotabweichungen. Bericht Nr. 91, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, 1985.
- [15]: Bauersima, I.: Navstar/Global Positioning System (II). Mitteilungen der Satelliten-

- beobachtungsstation Zimmerwald, Nr. 10, 1983.
- [16]: Beutler, G., Rothacher, M.: Auswertungen der 1984-Alaska-GPS-Kampagne. VPK 6/86.
- [7] und [9] sind auch in der Mitteilung Nr. 18 der Satellitenbeobachtungsstation Zimmerwald erschienen.

Adresse der Verfasser:

Dr. W. Gurtner
PD Dr. G. Beutler
Astronomisches Institut Universität Bern
Sidlerstrasse 5, CH-3012 Bern

Elektronische Distanzmessung Rückblick und Ausblick

D. Meier, H. Aeschlimann

Beschrieben wird der aktuelle Entwicklungsstand nebst einem Ausblick auf grundlegende Probleme bei der elektronischen Distanzmessung. Die erreichbare Genauigkeit der Messwerte ist danach eigentlich ein Bild für den vom Messgerät und der Messmethode erreichten Stand in der Beherrschung dieser Probleme. Näher eingegangen wird auf die Phasendistanzmesser, bei deren praktischem Einsatz die Stabilität der Eichwerte Additionskonstante a und Massstabsfaktor m grundlegend ist. Da der Brechungsindex der Atmosphäre als Massstabsfaktor wirkt, stellt seine Bestimmung das zentrale Problem der elektronischen Distanzmessung in der Geodäsie dar. Ferner behandelt werden gerätespezifische Messfehler und die Zweifarbenmethode als Verfahren zur Erfassung des Einflusses der Atmosphäre auf den Messwert.

Il est donné une perspective sur les problèmes fondamentaux de la mesure de distance électronique et une description du niveau de développement actuel. La précision des valeurs obtenues est un reflet concernant la maîtrise de ces problèmes au point de vue des méthodes et des appareils de mesures. On développe plus spécialement les appareils à phasemètre où dans l'utilisation pratique, la stabilité de la constante additionnelle a et du facteur de l'échelle m est fondamentale. Dès lors, l'indice de réfraction de l'atmosphère agit en tant que facteur de l'échelle, sa détermination démontre le problème central de la mesure électronique de distance en géodésie. En outre, on traite les erreurs de mesure spécifiquement instrumentales et la méthode des deux couleurs comme procédé vers la détermination de l'influence de l'atmosphère sur la valeur de mesure.

1. Messen von Distanzen

Distanzen messen heisst, die Länge des Vektors zwischen zwei Punkten messen. Längen messen heisst, die gesuchte Länge mit einer definierten Längeneinheit vergleichen. Der Messwert ist gleich dem in der gesuchten Länge enthaltenen Vielfachen der definierten Längeneinheit. Werden zum Messen von Längen Messbänder benutzt, so liegen einfache Verhältnisse vor. Das Messband stellt eine Skala aus mehreren Einheitslängen dar, deren Anfang besonders markiert ist. Zum Messen wird der Anfang der Skala in den Anfangspunkt des Vektors gebracht und die Skala entlang des Vektors ausgerollt. Im Endpunkt des Vektors kann dessen Länge direkt auf der Skala abgelesen werden. In Geodäsie und Vermessungswesen werden die Längen von Vektoren zumeist mit Hilfe von Geräten gemessen, die mit elektromagnetischen Wellen arbeiten. Dabei treten einige vermessungstechnische und physikalische

Probleme auf. Die erreichbare Genauigkeit der Messwerte ist somit eigentlich ein Bild für den vom Messgerät und der Messmethode erreichten Stand in der Beherrschung dieser Probleme. Diese Probleme lassen sich in vier Gruppen zusammenfassen:

- Anschluss an die definierte Längeneinheit
- Additionskonstante
- Besondere Eigenschaften des Messgerätes
- Einflüsse des von den elektromagnetischen Wellen durchlaufen Mediums auf das Messsignal.

Im allgemeinen Sprachgebrauch werden die Additionskonstanten und der Anschluss an die definierte Längeneinheit als Eichwerte bezeichnet. Ausserdem spricht man von Distanzmessern und nicht von Längenmessern, ebenso von Distanzen und nicht von Längen.

Gewisse Eigenschaften von geeignet aus dem Spektrum ausgewählten elektroma-

gnetischen Wellen werden als Grundlage des Messprinzips benützt. Dazu muss eine elektromagnetische Welle erzeugt, ausgesendet, reflektiert und wiederum empfangen werden können. Auf das wesentliche beschränkt geht es darum, in der gewünschten Richtung hinreichend Energie auszusenden, so dass sie nach einer Reflexion noch ausreicht, um eine messbare Wirkung zu erzielen. Vermessungstechnische Rahmenbedingungen setzen Grenzen für die Dimensionen und Verfügbarkeit von Sendern, Reflektoren und Empfängern. Vom gesamten elektromagnetischen Wellenspektrum können nur wenige Gebiete benützt werden, nämlich Wellenlängen im Zentimeter- und Millimeterbereich, sowie im Bereich 0,5 bis 1,0 μm .

Entsprechend der vom Sender zum Reflektor übertragenen und der vom Empfänger benötigten Energie lassen sich drei Arten von Reflektoren unterscheiden:

- aktive Reflektoren
 - kooperative Reflektoren
 - nicht kooperative Reflektoren
- } passive Reflektoren

Aktive Reflektoren bestehen aus einem Empfänger und einem Sender. Der Empfänger steuert den Sender derart, dass ein auf der empfangenen Welle aufgeprägtes Signal in der gesendeten Welle wiederum enthalten ist. Kooperative Reflektoren haben einen besonders hohen Reflexionsgrad, währenddem nicht-kooperative Reflektoren nur geringe Reflexionsgrade aufweisen. Kooperative Reflektoren sind Teile der Messausrüstung, nicht kooperative Reflektoren sind natürliche Gegenstände. Die vom Sender erzeugte elektromagnetische Welle kann zumeist nicht als Messmittel verwendet werden, sondern ihr muss ein zusätzliches, periodisches Signal aufmoduliert werden. Die vom Sender erzeugte Welle wird damit zum Träger des Signals. Signale können auch erzeugt werden, indem der Sender nur kurze Zeit arbeitet und auf diese Weise ein Wellenpaket ohne zusätzlich aufmoduliertes Signal aussendet.

Damit ergeben sich drei Messprinzipien:

- Interferometer
direkte Verwendung der vom Sender erzeugten Welle als Signal.
- Phasendistanzmesser
Verwendung der vom Sender erzeugten