

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

Band: 93 (1995)

Heft: 4: ETHZ : Departement Geodätische Wissenschaften = EPFZ : Département des sciences géodésiques

Artikel: Neue Entwicklungen in der Positionierung mit GPS : Anwendungen im kinematischen Modus

Autor: Cocard, M.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-235156>

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: 17.11.2024

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

Neue Entwicklungen in der Positionierung mit GPS: Anwendungen im kinematischen Modus

M. Cocard

In den letzten Jahren hat das Global Positioning System (GPS) Einzug in die geodätische Messtechnik gehalten. GPS-Empfänger gehören heute wie Theodolite und EDM-Geräte zum Werkzeug des Geodäten und ermöglichen die Lösung vieler vermessungstechnischer Aufgaben rascher und effizienter als die herkömmlichen Verfahren. Daneben eröffnen sich neue Anwendungen, die bis anhin nicht realisierbar waren. Eines dieser Anwendungsbereiche, dem am GGL besondere Beachtung geschenkt wird, ist die Bestimmung von hochgenauen Trajektorien von bewegten Fahrzeugen und Flugzeugen im off-line Modus. Auswertungen von Flügen haben gezeigt, dass Genauigkeiten im Zentimeterbereich erreichbar sind.

Au cours des dernières années, le système de positionnement global (GPS) s'est imposé en géodésie. Aujourd'hui, les récepteurs GPS appartiennent comme les théodolites et les instruments électroniques de mesures de distance à l'outillage du géodésien. Ils permettent souvent de résoudre des tâches de mensuration plus rapidement et plus efficacement que les méthodes conventionnelles. En plus, de nouvelles applications, qui n'étaient pas réalisables jusqu'à ce jour, deviennent possibles. Une de ces applications, à laquelle le GGL voue une attention particulière, est la détermination en mode off-line de trajectoires de haute précision de véhicules et d'avions. Le dépouillement de données mesurées sur un avion a montré qu'on peut atteindre des précisions de l'ordre du centimètre.

Negli ultimi anni, il «global positioning system» (GPS) ha preso piede nella tecnica della misurazione geodetica. Oggi i ricevitori GPS fanno parte, come il teodolite e gli apparecchi EDM, dello strumentario dei geodeti e permettono di risolvere con maggiore rapidità e precisione, rispetto ai processi tradizionali, innumerevoli compiti legati alle misurazioni. Inoltre, si presentano nuove applicazioni, finora irrealizzabili. Uno di questi campi d'applicazione, che attira l'attenzione del GGL, risiede nella determinazione di traiettorie di alta precisione di veicoli in movimento e velivoli nel modo off-line. Le valutazioni dei voli hanno dimostrato che sono ottenibili delle precisioni nel campo dei centimetri.

Die Code-Messung entspricht im wesentlichen einer Laufzeitmessung des Signals vom Satellit zum Empfänger, die um den Synchronisationsfehler des Empfängers verfälscht ist. Dieser Synchronisationsfehler muss als zusätzliche vierte Unbekannte neben dem Koordinatentripel aus den Messungen bestimmt werden. Das Messrauschen der Code-Messungen liegt im Meter-Bereich.

Absolute und differentielle Positionierung mit Code-Messungen

Für die Genauigkeit der abgeleiteten Position ist nicht so sehr das Messrauschen von Bedeutung, als vielmehr die vom DoD aus militärischen Gründen eingeführte Verschlechterung des Systems: «Anti-spoofing» (A-S) und «Selective availability» (SA). «Anti-spoofing» ist im wesentlichen das Sperren des Zugangs zum genaueren P-Code für den nicht autorisierten Benutzer. Diesem steht nur der ungenauere C/A-Code zur Verfügung. Als «Selective availability» wird das künstliche Verrauschen der Satellitenuhren bezeichnet. Letztere Verschlechterung führt zu einer Positionierungsgenauigkeit von 50–100 m im absoluten Modus. Abbildung 1 zeigt die Schwankungen einer absoluten Positionierung unter SA in Funktion der Zeit, berechnet aus statisch erhobenen Code-Messungen.

Da SA das Messignal bei jedem Empfänger gleich verfälscht, kann ihr Einfluss im differentiellen Modus eliminiert werden. Im Fall der Navigation bedeutet dies, dass aus den Messungen auf einer Referenzstation mit bekannten Koordinaten Korrekturwerte berechnet und den mobilen Empfängern übermittelt werden. Dadurch werden die systematischen Fehler,

Funktionsweise von Code-Messungen

Ende der siebziger Jahre hat das Department of Defense (DoD) der USA mit dem Aufbau des für Navigationszwecke konzipierten GPS begonnen. Mitte der achtziger Jahre waren die ersten Testsatelliten auf ihren Umlaufbahnen, und seither hat die Anzahl der zur Verfügung stehenden Satelliten stetig zugenommen, so dass heute für mittlere Breiten über den ganzen Tag durchschnittlich sechs Satelliten sichtbar sind.

Das ursprüngliche Navigationskonzept basiert auf Pseudodistanzmessungen (auch Code-Messungen genannt) zu mindestens vier Satelliten gleichzeitig. Diese Messungen werden unter Verwendung eines dem Signal aufmodulierten Codes mit Hilfe von Korrelatoren durchgeführt.

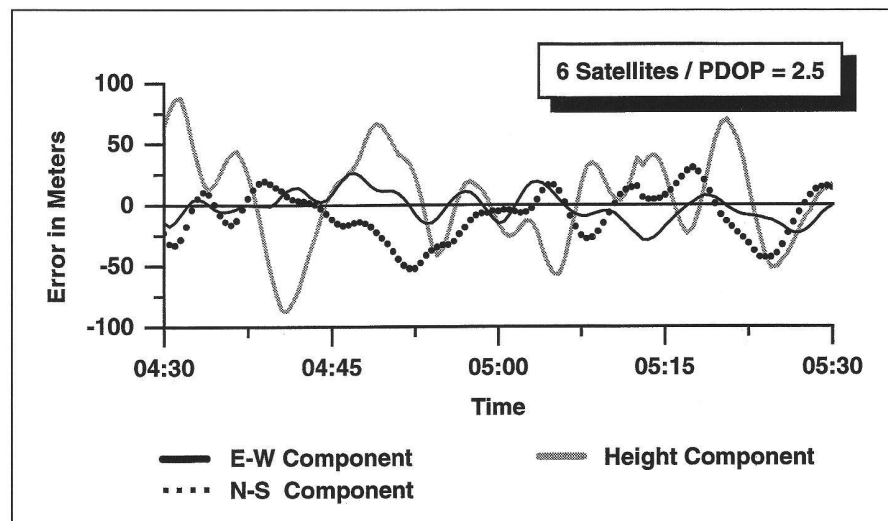


Abb. 1: Absoluter Positionierungsfehler unter «Selective availability» (SA).

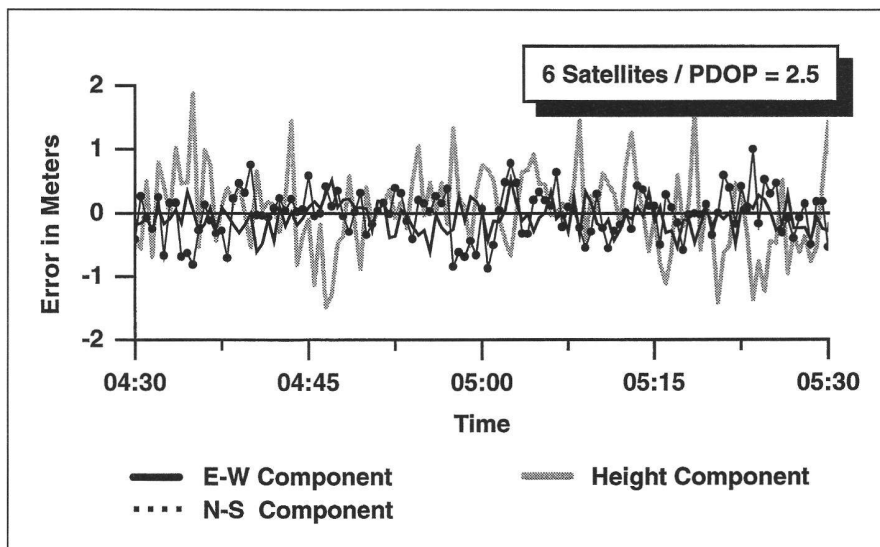


Abb. 2: Differenzieller Positionierungsfehler unter «Selective availability» (SA).

sowohl SA als auch Bahn- und Ionosphärenfehler, eliminiert oder stark reduziert und das Messrauschen der Code-Messungen zu einem wichtigen Faktor für die erreichbare Genauigkeit. Typisch können im differentiellen Modus mit C/A-Code-Messungen Positionierungsgenauigkeiten von 1–5 m erreicht werden. Abbildung 2 zeigt die Schwankungen einer differentiellen Positionierung, berechnet aus denselben Daten wie in Abbildung 1, aber unter Berücksichtigung der Korrekturwerte einer Referenzstation.

Einbezug der Phasenmessung

Für die meisten Anwendungen in der Geodäsie (man denke hier z.B. an Grundbuchvermessung, Tunnel- oder Triangulationsnetze) liegen die geforderten Genauigkeiten im Bereich von 1 mm bis 20 cm, also deutlich unter der Genauigkeit der Codelösung selbst im differentiellen Modus. Geodätische Anwendungen greifen deshalb in der Regel auf Phasenmessungen mit einer Auflösung im mm-Bereich zurück. Phasenmessungen können an beiden Trägersignalen (L1 und L2) vorgenommen werden. Im Gegensatz zu den Codemessungen sind die Phasenmessungen mehrdeutig. Beim Einschalten kann der Empfänger die Phasenlage nur innerhalb einer Wellenlänge bestimmen. Die gesamte Pseudodistanz Satellit-Empfänger, die durch die Codemessung eindeutig, aber ungenauer gemessen wird, setzt sich aus dem gemessenen Phasenwert und einem ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge, der Phasenmehrdeutigkeit oder «Ambiguity», zusammen. Solange der Empfänger das Signal des Satelliten kontinuierlich messen kann, bleibt diese anfängliche Mehrdeutigkeit

gültig. Ist sie bekannt, so entspricht eine differentielle Phasenlösung vom Prinzip her einer differentiellen Codelösung, jedoch mit einer erhöhten Genauigkeit im Millimeterbereich. Der Schlüssel zur Genauigkeit liegt also in der Bestimmung dieser Mehrdeutigkeiten. Das beste Resultat wird erzielt, wenn die Integer-Werte aller Ambiguities bestimmt werden können.

Das zentrale Problem: Lösen der Ambiguities

Die verwendeten Strategien zur Bestimmung der Mehrdeutigkeiten können in zwei Kategorien eingeteilt werden: (a) die konventionelle «Sigma dependent rounding strategy» und (b) die Suchalgorithmen.

(a) «Sigma dependent rounding strategy»: Hierbei werden die Mehrdeutigkeiten als reelle Größen in einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Diese so erhaltenen Werte werden als «floating point» Lösung (FIP) bezeichnet. Mit Hilfe von statistischen Tests wird überprüft, ob sie auf den nächsten Integerwert gerundet werden können. Falls dies möglich ist, wird in der Ausgleichung der reelle (geschätzte) Wert durch den ganzzahligen (fehlerfreien) Wert ersetzt. Diese Methode ist nur dann erfolgreich, wenn die mittleren Fehler der Ambiguities aus der FIP-Lösung schon klein genug sind (typisch 1/10 der Wellenlänge) und der reelle Wert entsprechend nah bei dem Integerwert liegt.

Dieser Sachverhalt soll an folgendem Beispiel konkretisiert werden. Gehen wir davon aus, dass Code- und Phasenmessungen von einer Referenzstation und einem zweiten Empfänger, der stationär oder mobil sei, mit einer Messfrequenz von 1/30 Hz durchgeführt und kontinuierlich

mit entsprechender Gewichtung in ein Normalgleichungssystem integriert werden. Wie verhält sich dann der mittlere Fehler a priori der Ambiguities als Funktion der Zeit? Abbildung 3 zeigt dieses Verhalten exemplarisch für eine durchschnittliche Konstellation von sechs Satelliten bei unterschiedlichen Genauigkeiten der Codemessungen. In erster Näherung ist der mittlere Punktfehler der FIP-Lösung proportional zum mittleren Fehler der Ambiguities (Proportionalitätsfaktor = PDOP).

Durch den Umstand, dass im kinematischen Modus für jeden Zeitpunkt ein zusätzliches Koordinatentripel als Unbekannte eingeführt werden muss, wird die Qualität der FIP-Lösung gegenüber dem statischen Modus deutlich schlechter. In unserem Beispiel ist der mittlere Fehler der Ambiguities im statischen Modus nach etwa 30 Minuten auf 2 cm (1/10 Wellenlänge auf dem L1) gesunken und faktisch unabhängig von der Genauigkeit der Code-Messung. Im kinematischen Modus hingegen ist diese Abnahme bedeutend langsamer und sensitiver auf die Codequalität. Vereinfachend kann man sagen, dass die Qualität der Code-Messungen im statischen Modus bei längeren Beobachtungszeiten (>30 Minuten) vernachlässigbar ist, wohingegen sie im kinematischen Modus eine wichtige Rolle spielt.

Das angestrebte Ziel bei vielen GPS-Anwendungen ist die Auflösung der Ambiguities in möglichst kurzer Zeit. Man will nicht erst eine halbe Stunde warten müssen, bis die FIP-Lösung die nötige Qualität erreicht hat, sondern man will schon nach einigen wenigen Messepochen, zu einem Zeitpunkt, wo die geschätzten reellen Werte der FIP-Lösung noch mit einem Fehler von einigen Metern oder Dezimetern behaftet sind, die Ambiguities fixieren. Gelingt dies, so verbessert sich die Genauigkeit der Position sprunghaft vom Meter- in den Zentimeter-Bereich. Die angewandten Strategien, um diesen Genauigkeitssprung zu ermöglichen, sind Suchalgorithmen.

(b) Suchalgorithmen:

Hier wird die Tatsache ausgenutzt, dass sämtliche Mehrdeutigkeiten ganzzahlig sind. Dabei wird nicht eine einzelne Ambiguity isoliert einem statistischen Test unterzogen, sondern es werden unterschiedliche Kombinationen ganzer Zahlen für alle in der Ausgleichung enthaltenen Ambiguities untersucht. Es geht also bei Suchalgorithmen darum, einerseits die möglichen Kombinationen zu definieren und andererseits Entscheidungskriterien aufzustellen, die es erlauben, «das Weizenkorn (die richtige Lösung) von der Spreu» zu trennen. Ein häufig verwendetes Entscheidungskriterium, der Diskriminierungsfaktor, soll etwas näher erläutert werden. Betrachten wir das Verhalten des

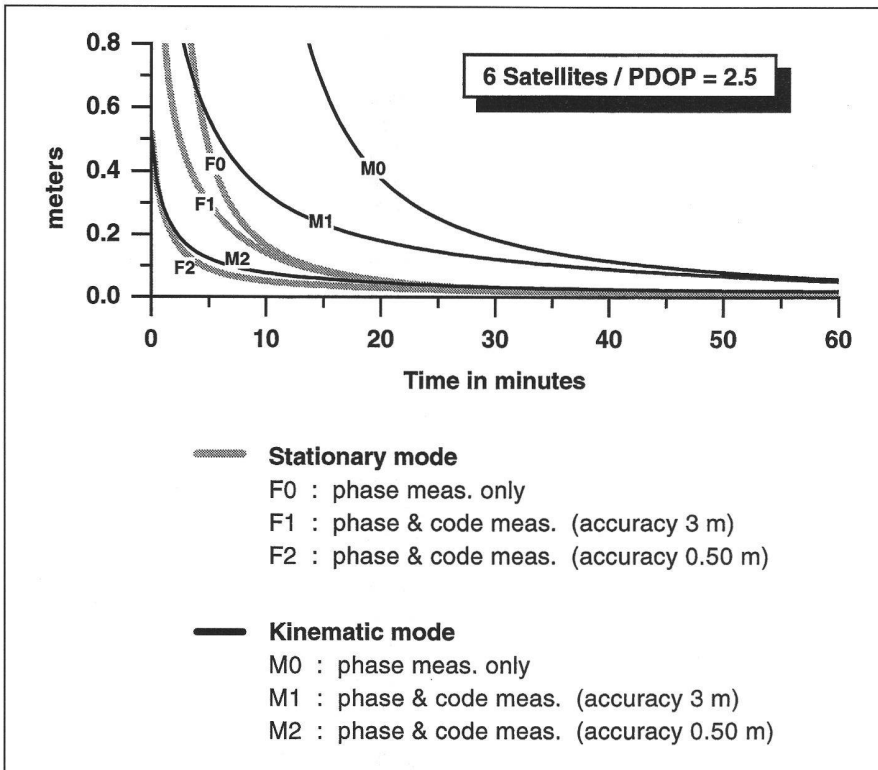


Abb. 3: Mittlerer Fehler der Ambiguitäten als Funktion der Zeit bei unterschiedlicher Genauigkeit der Code-Messungen. Eine a priori Genauigkeit von 5 mm für die «single-difference»-Phasenmessungen von 3 m resp. 0,5 m für die «single-difference»-Code-Messungen wurde angenommen.

mittleren Gewichtseinheitsfehlers σ , wie er aus der Ausgleichung hervorgeht, für die einzelnen Integer-Kombinationen der Ambiguitäten, so kann man den folgenden Diskriminierungsfaktor definieren:

$$DF = \sigma_2 / \sigma_1$$

mit

σ_1 : mittlerer Gewichtseinheitsfehler der besten Integer-Kombination der Ambiguitäten.

σ_2 : mittlerer Gewichtseinheitsfehler der zweitbesten Integer-Kombination der Ambiguitäten.

Der Diskriminierungsfaktor DF sagt somit aus, um wieviel mal schlechter die zweitbeste gegenüber der besten Kombination ist. Ein hoher Wert für den DF erlaubt es, die beste Kombination als die richtige Lösung zu akzeptieren und alle anderen Kandidaten zu verwerfen. Ist der DF hingegen nahezu eins, so verbleiben mehrere Varianten als potentielle Lösungen.

Werden neben den L1- auch L2-Phasenmessungen durchgeführt, so können diese als zusätzliche Messungen mit in die Ausgleichung integriert werden. Der Qualitätsgewinn durch diese zusätzlichen Messungen für die FIP-Lösung ist unwesentlich, da bei beiden Phasenmessungen dieselbe geometrische Satellitenkonstellation auftritt. Es verhält sich etwa so, als ob man bei einem Rückwärtseinschnitt die Distanzen einmal in «Inches» und einmal in «Feet» misst, und dies beidemale mit ver-

gleichbarer Genauigkeit. Geometrisch wird die Qualität des Schnittpunktes durch den zweiten Datensatz nicht verbessert. Die Ambiguity-Suche hingegen profitiert entscheidend von der zusätzlichen zweiten Frequenz, da sowohl die L1- als auch die L2-Ambiguitäten gleichzeitig ganzzahlig sein müssen. Für unseren Vergleich bedeutet dies, dass die Distanzen nur bis auf ein ganzzahliges Vielfaches gemessen werden, dieser Integerwert sich das

eine Mal auf «Inches» (L1-Wellenlänge = 19 cm) und das andere Mal auf «Feet» (L2-Wellenlänge = 24 cm) bezieht. In beiden Fällen aber muss der resultierende Wert für die Distanz in Metern derselbe sein. Abbildung 4 zeigt den Verlauf über eine Stunde eines a priori gerechneten DF für dieselbe durchschnittliche Konstellation von sechs Satelliten, die auch schon der Abbildung 3 zugrundeliegt. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass der DF für Zweifrequenzmessungen schon nach einer einzigen Epoche etwa 2.5 beträgt und somit die Trennung der richtigen von der falschen Lösung theoretisch ermöglicht.

Es ist deshalb von Interesse, den theoretischen DF einer Einzel-epoche in Abhängigkeit der Konstellation und der Codegenauigkeit zu untersuchen. Die Resultate dieser Untersuchung sind in Abbildung 5 dargestellt. Die Satellitenkonstellation entspricht der Konstellation von Mitte 1994 für die Schweiz. Für die Phasenmessungen wurde ein mittlerer Fehler a priori von 5 mm postuliert. Für die Code-Messungen hingegen wurden drei unterschiedliche Qualitätsstufen untersucht: Ein mittlerer Fehler von 5 m (mittelmässige Qualität von C/A-Code-Empfängern), ein mittlerer Fehler von 1,5 m (gute C/A-Code-Empfänger) und ein mittlerer Fehler von 0,5 m (P-Code-Empfänger). Das Bestimmen der Ambiguitäten aus Messungen einer Einzel-epoche ist also unter gewissen Bedingungen möglich. Setzt man z.B. einen Grenzwert von 2 für den DF, so bedeutet dies, dass die beste Ambiguity-Kombination einen mindestens zweimal kleineren Wert für den Gewichtseinheitsfehler als alle anderen Lösungen liefern muss, um als richtige Lösung akzeptiert zu werden. Bei einer Konstellation von sechs Satelliten und einer Codegenauigkeit von 1 m wird dieser Minimalwert in den meisten Fällen

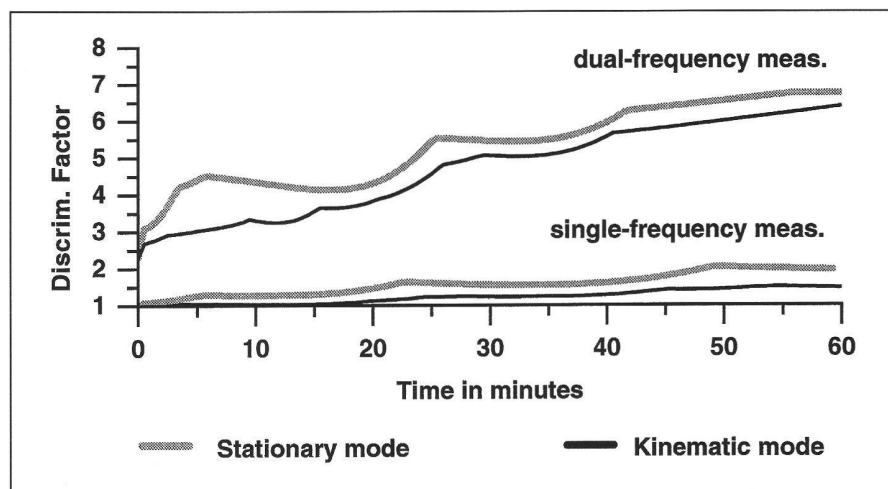


Abb. 4: Diskriminierungsfaktor DF als Funktion der Zeit für Ein- und Zweifrequenzmessungen. Für die «single-difference»-Phasenmessungen wurde eine a priori Genauigkeit von 5 mm und für die «single-difference»-Code-Messungen eine solche von 3 m angenommen.

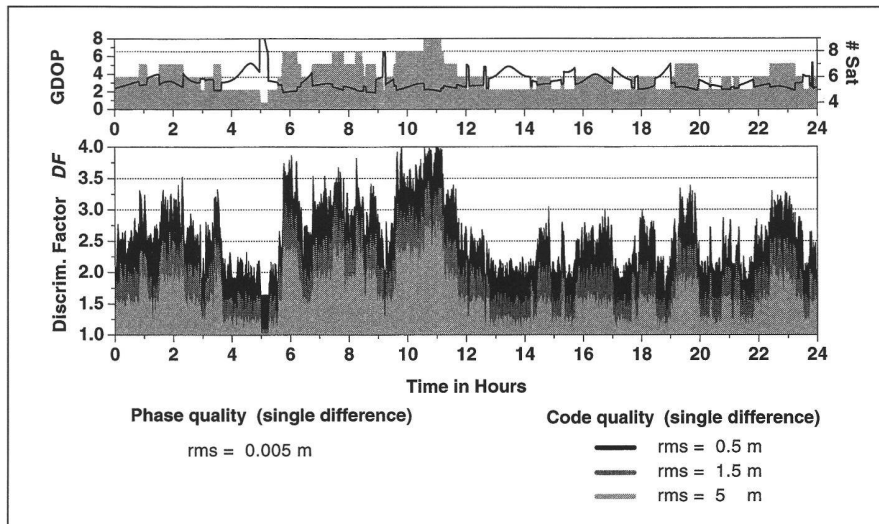


Abb. 5: Theoretischer Diskriminierungsfaktor DF für Zweifrequenzmessungen einer einzelnen Messepoche.

nach einer Epoche überschritten. Es ist also möglich, die Ambiguitäten auf ihre Integerwerte zu fixieren und damit die Koordinaten mit einer Genauigkeit von 1–2 cm zu erhalten.

Die obige theoretische Untersuchung bedarf einiger Einschränkungen. Sie gilt nur unter der Voraussetzung, dass die systematischen Fehler vernachlässigbar sind. Hier ist an erster Stelle der Einfluss der Ionosphäre zu nennen. Die Ionosphäre, eine ionisierte Schicht der Atmosphäre in einer Höhe von ungefähr 350 km, bewirkt eine Verzögerung des Signals, die unterschiedlich für die L1- und die L2-Frequenz ist. Der differentielle Ionosphärenfehler ist einerseits von der Aktivität der Ionosphäre selbst und andererseits von der Distanz zwischen der Referenzstation und dem mobilen Empfänger abhängig. Der Ionosphäreinfluss wirkt sich sehr störend auf die Ambiguity-Suche aus. Eine Auflösung der Ambiguitäten innerhalb einer oder einigen wenigen Epochen ist deshalb nur über Distanzen von einigen Kilometern möglich. Dies bedeutet aber nicht, dass die Fixierung der Ambiguitäten über grössere Distanzen, auch im kinematischen Modus, hoffnungslos ist. Dazu bedarf es kontinuierlicher Phasenmessungen über längere Zeitintervalle und einer zusätzlichen Modellierung des Ionosphäreinflusses.

Neue Perspektiven

Was bedeutet dies konkret für GPS-Anwendungen? Bis anhin sind in der Geodäsie die statischen GPS-Anwendungen im off-line Modus am verbreitetsten. Dabei kommen heute fast ausschliesslich 2-Frequenz-Empfänger zum Einsatz, da Suchalgorithmen, wie sie in vielen kommerziellen Softwarepaketen enthalten sind, die Reduktion der Messzeit auf einige Minuten erlauben. Die neuesten Entwicklungen

der Hersteller verlagern die Auswertung immer mehr ins Feld. Dies bedingt den zusätzlichen Aufwand einer Funkverbindung und die Übertragung der gesamten Messinformation der Referenzstation zum mobilen Empfänger, hat aber erhebliche Vorteile: die Kontrolle über die Fixierung der Ambiguitäten ist on-line. Der Benutzer hat somit auch immer die Kontrolle über die Qualität der Koordinaten. Neben der Aufnahme wird auch die Absteckung mit GPS möglich. Daneben eröffnen sich interessante Möglichkeiten zur real-time Überwachung von Staudämmen, Rutschhängen usw. Methodologisch verschwindet faktisch der Unterschied zwischen «rapid-static» und «kinematisch». Man hat im Idealfall sofort nach Einschalten des Gerätes und während der ganzen Messzeit eine on-line Genauigkeit im Zentimeterbereich, unabhängig ob der Empfänger stationär ist oder sich bewegt. Der Umsetzung dieser Idealvorstellung in der Praxis wird die Abdeckung durch ein Haus oder einen Baum leider Grenzen setzen. Die ersten dieser Messsysteme sind schon am Markt. Ihre Reichweiten betragen einige Kilometer (3–5 km), beschränkt durch die Reichweite der Funkübertragung und die mit der Distanz zunehmenden Probleme der Ambiguity-Lösung.

Neben diesen kleinräumigen «Insel»-Lösungen, wo also jeder Geodät seine Referenzstation aufbaut, für die Funkübertragung selbst verantwortlich ist und somit ein Messsystem mit begrenzter Reichweite zur Verfügung hat, sind grossräumigere Lösungen denkbar. Initiiert von der Schweizerischen Geodätischen Kommission (SGK) wurde 1994 eine Arbeitsgruppe DGPS ins Leben gerufen, die sich aus Vertretern des Bundesamtes für Landestopographie (L+T), der TELECOM PTT, der Technischen Hochschulen sowie Vertretern der Industrie und interessierter Anwenderkreise zusammensetzt. Ende

1994 wurden Untersuchungen und erste Tests zum Aufbau dieses schweizerischen DGPS-Dienstes in Angriff genommen. Ein erstes Ziel soll die landesweite Übertragung über RDS (Radio Data System) von Korrekturwerten für die Navigation mit Code-Messungen sein. Geplant ist in einer ersten Phase, sich auf eine einzige Referenzstation (Zimmerwald) zu beschränken. Die angestrebte Genauigkeit soll bei zwei bis fünf Metern liegen.

Der Aufbau eines ähnlichen Systems, das den Benutzer mit der gesamten Messinformation (also Code- und Phasenmessungen auf beiden Frequenzen für alle sichtbaren Satelliten) versorgt, um eine Phasenlösung zu ermöglichen, ist theoretisch realisierbar, wenn auch um vieles aufwendiger. Mehrere adäquat verteilte Referenzstationen und eine hohe Übertragungsrate sind nötig. Eine Dichte von einem Referenzempfänger alle 100 km würde für das Gebiet der Schweiz etwa sechs bis zehn Referenzstationen bedeuten, und die Distanz eines Benutzers zur nächstgelegenen Referenzstation würde im Durchschnitt 40–50 km betragen. Ob ein solches System sinnvoll, erwünscht und vom Standpunkt der Kosten-Nutzen-Relation von Interesse ist, soll als Frage im Raum stehen bleiben.

Kinematische Positionsbestimmung im off-line Modus

Für viele geodätischen Anwendungen behalten aber off-line Verfahren nach wie vor ihre Bedeutung. Die Vermessung von statischen Punktfeldern über Distanzen von einigen hundert Kilometern, wie sie in den geodynamischen Netzen in Griechenland oder der Türkei in den letzten Jahren gemessen wurden (siehe Beitrag Kahle et al., in diesem Heft) ist ein typisches Beispiel für eine off-line Anwendung im statischen Modus. Ein Beispiel aus dem kinematischen Bereich sind die aerogravimetrischen Vermessungsflüge (siehe Beitrag Klingelé et al., in diesem Heft). Abgesehen von der Tatsache, dass in beiden Fällen eine on-line Lösung nicht realisierbar war, erlaubt der off-line Modus prinzipiell eine grössere Flexibilität bei der Auswertung und führt zu einer besseren Lösung: Genauere Bahndaten (precise ephemeris) stehen zur Verfügung, der ganze Datensatz kann zur Bestimmung der Ambiguitäten verwendet und unterschiedliche Lösungen können verglichen werden.

Bis anhin haben wir uns am GGL auf die Bestimmung von hochgenauen Trajektorien von bewegten Fahrzeugen im off-line Modus konzentriert. Der Bedarf nach solch hochgenauen Positionen im kinematischen Modus ist vielfältig. So benötigt man

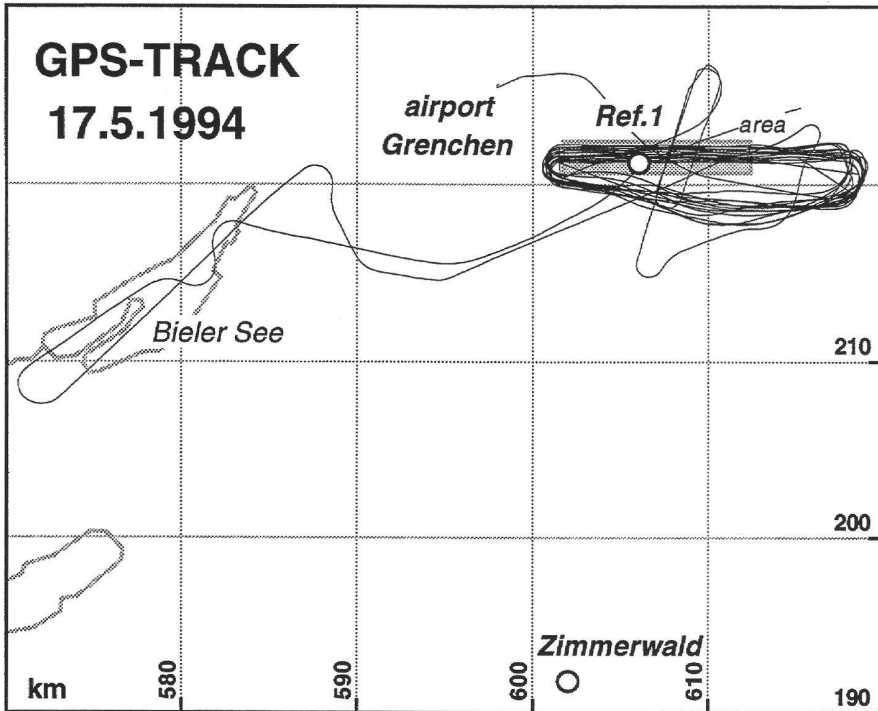


Abb. 6: Trajektorie des «LaserScanner»-Fluges vom 17. Mai 1994 in Landeskoordinaten.

z.B. bei fast allen flugzeuggestützten Messflügen Informationen über die Position des Flugzeuges. Die Messwerte, unabhängig, ob es sich um eine photogrammetrische Aufnahme, um Lasermessungen, SAR-Aufnahmen (SAR = Synthetic Aperture Radar), gravimetrische, magnetische oder radiometrische Messungen handelt, müssen lokalisiert werden. Natürlich sind die Ansprüche an die geforderte Genauigkeit sehr unterschiedlich. Für eine Reihe von Messungen (Radiometrie z.B.) genügt eine differentielle on-line Positionierung mit Code-Messungen im 10-m-Bereich. Für andere Anwendungen hingegen benötigt man millimetergenaue Trajektorien. Allen diesen Anwendungen ist die Tatsache gemeinsam, dass die GPS-Trajektorie kein Selbstzweck ist, sondern wertvolle Zusatzinformation für ein anderes Messsystem darstellt.

Ein interessantes Anwendungsgebiet solcher flugzeuggestützten Messverfahren ist die Aerophotogrammetrie, wo es darum geht, die Projektionszentren der Kamera aus den GPS-Messungen zu bestimmen. Dies erlaubt die Reduktion der Anzahl nötiger Passpunkte am Boden. Die Resultate einer GPS-gestützte photogrammetrischen Befliegung des Testgebietes Uster (ZH) im Masstab 1:10000 zeigten, dass unter Einbezug der aus GPS bestimmten Projektionszentren in die Bündelblockausgleichung nur noch lediglich vier in den Blockecken verteilte Passpunkte benötigt wurden. Eine detaillierte Beschreibung der Resultate wurde in [Grün et al, 1994] publiziert.

Wichtig ist eine externe unabhängige

Überprüfung der Qualität der berechneten Koordinaten. Für den statischen Modus wurde für diese Zwecke das Turmann-Netz in den Jahren 1986 und 1987 angelegt. Die terrestrische Bestimmung der Referenzkoordinaten mit Millimetergenauigkeit erwies sich als sehr aufwendig, aber noch durchführbar [Jeanrichard (Hrsg.) SGK Band 45, 1992]. Im kinemati-

schen Modus hingegen ist die Überprüfung der Genauigkeiten um einiges schwieriger. Die kinematische Auswertung von statisch erhobenen Daten ist eine Möglichkeit, einen Eindruck von der erreichbaren Genauigkeit zu erhalten, da in diesem Fall die Koordinaten bekannt sind. Dieses Resultat ist aber nur dann auf den kinematischen Fall umsetzbar, wenn man annimmt, dass die Messqualität unabhängig von der Dynamik des Empfängers ist. Vom Standpunkt des GPS-Auswerters ist die Aerophotogrammetrie einer der wenigen Methoden, die einen unabhängigen externen Vergleich der Koordinaten unter echten Flugbedingungen mit einer vergleichbaren Genauigkeit erlaubt. Der oben erwähnte Testflug Uster zeigte mittlere Klaffungen von 15 cm in der Lage und 8 cm in der Höhe zwischen den aus GPS und den photogrammetrisch bestimmten Koordinaten der Projektionszentren.

LaserScanner-Flug: ein Beispiel

Zum Schluss werden Resultate eines Messfluges vom 17. Mai 1994 mit einem LaserScanner der Firma Dornier präsentiert. Zusätzlich war ein GPS-Empfänger im Flugzeug, der Twin-Otter der V+D, installiert. Um die Trajektorie mit bestmöglicher Genauigkeit rekonstruieren zu können, wurde ein Referenzempfänger im Aufnahmegebiet selbst installiert, so dass die Distanz zum Flugzeug maximal 12 km betrug. Gleichzeitig standen auch die Daten der Permanentstation Zimmerwald

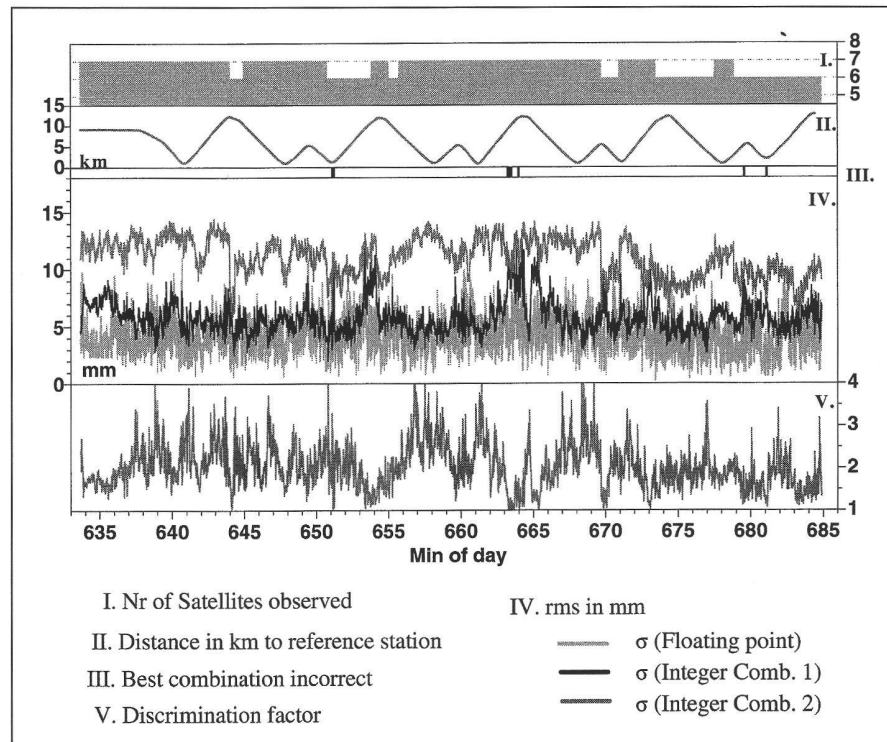


Abb. 7: «LaserScanner»-Flug: Resultat der Ambiguity-Suche für jede Messepoche getrennt.

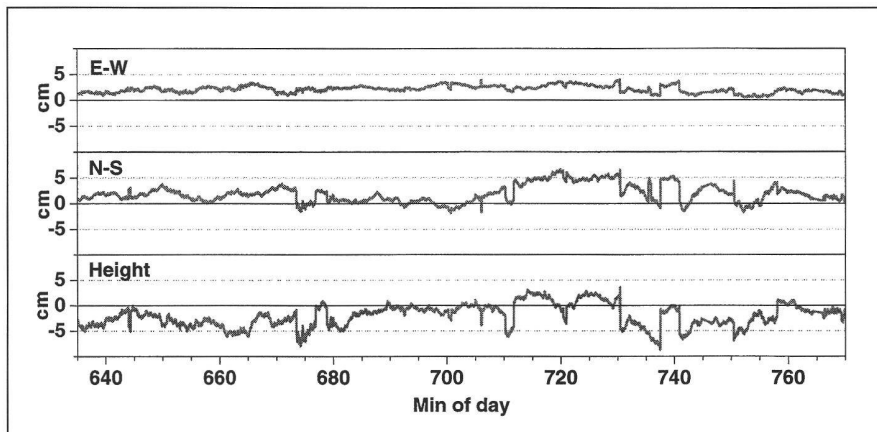


Abb. 8: Einfluss der Referenzstation auf die Trajektorie: Koordinatendifferenzen bei der Auswertung derselben Flugdaten mit zwei verschiedenen Referenzstationen (Ref. 1 und Zimmerwald, siehe Abbildung 6).

in einer Distanz von etwa 35 km zur Verfügung. Alle Geräte waren Zweifrequenz-Empfänger (TRIMBLE 4000SSE) der L+T, die die Daten mit einer Messfrequenz von 1 Hz sammelten. Abbildung 6 gibt einen Überblick über die Situation.

Das Lösen der Ambiguitäten aus den Zweifrequenzmessungen war sowohl für die Kombination der Flugdaten mit der Referenzstation im Gebiet als auch mit der entfernteren Station Zimmerwald unter Verwendung des gesamten Datensatzes möglich. Ein Versuch, die Ambiguitäten auf der Stufe der Einzelepoch zu lösen, war im Fall, wo die Fixstation im Gebiet benutzt wurde, in den meisten Fällen erfolgreich. Man muss hinzufügen, dass die Voraussetzungen günstig waren: eine Konstellation von sechs bis sieben Satelliten und kleines Rauschen der Code-Messungen. Das Resultat dieser Untersuchung ist in Abbildung 7 dargestellt. In Funktion der Zeit sind in 7.I die Anzahl Satelliten, in 7.II die Distanz des Flugzeuges zum Referenzempfänger dargestellt. Für jeden Zeitpunkt wurde eine Suche der besten und zweitbesten Ambiguity-Kombination durchgeführt. Die beste Kombination wurde dann auf ihre Richtigkeit überprüft. Dies war möglich, da die richtigen Werte der Ambiguitäten aus der Gesamtauswertung bekannt waren. Abbildung 7.III gibt an, ob die beste auch die richtige Kombination ist. Abbildung 7.IV zeigt die mittleren Gewichtseinschätzfehler a posteriori der verschiedenen Varianten als Funktion der Zeit. Der Anschaulichkeit halber wurden in der Ausgleichung die Phasenmessungen mit Einheitsgewichten versehen, so dass der mittlere Gewichtseinschätzfehler dem a posteriori Fehler an einer «single-difference» Phasenmessung entspricht. Die drei aufgetragenen Werte entsprechen dem mittleren Fehler der FIP-Lösung, also der Lösung, wo die Ambiguitäten noch reelle Werte sind, sowie den mittleren Fehlern der Lösungen unter Verwendung der besten und der zweitbesten Integer-Kom-

binationen für die Ambiguitäten. Ist das Verhältnis dieser zwei Werte, der DF, gross, so kann die beste Lösung als die richtige akzeptiert werden. Dieses Verhältnis ist in Abbildung 7.V dargestellt. Erwartungsgemäss treten bei Epochen, wo die Lösung falsch war, auch entsprechend kleine Werte für DF auf. Dieses Resultat bestätigt anhand von realen Flugdaten das in Abbildung 5 theoretisch betrachtete Diskriminierungspotential von Zweifrequenzmessungen. Es soll nicht verschwiegen werden, dass dieselbe Untersuchung mit Zimmerwald als Referenzstation zu einem erheblich schlechteren Resultat führte. Die grössere Distanz (circa 35 km) und der damit verbundene grössere Ionosphäreinfluss führten in 35% der Fälle zu einer falschen Ambiguity-Lösung. Durch das Einführen von stochastischen Ionosphärenparametern und eine längere Integrationszeit gelang es aber auch in diesem Fall, die Ambiguitäten sicher zu fixieren.

Da zwei verschiedene Referenzstationen zur Verfügung stehen, ist es möglich, die Koordinaten beider Resultate miteinander zu vergleichen (Abbildung 8). Es handelt sich hier aber lediglich um einen internen Vergleich, da in beiden Berechnungen dieselben Messungen des Flugzeuges verwendet wurden. Die Übereinstimmung liegt im Bereich von wenigen Zentimetern und zeigt vor allem den Einfluss der unterschiedlichen Distanz der Referenzstationen bezüglich des Flugzeuges.

Fazit

Bedingt durch Fortschritte in der Empfängertechnologie und die verbesserte Satellitenkonstellation eröffnen sich heute neue Möglichkeiten in den geodätischen GPS-Anwendungen. On-line-Lösungen im Zentimeter-Bereich über Distanzen von einigen Kilometern stellen ein neues geodätisches Werkzeug dar, das, kombiniert mit

konventionellen Methoden, in den nächsten Jahren Einzug in die Praxis halten wird. Daneben werden die off-line Lösungen überall dort, wo die bestmögliche erreichbare Genauigkeit gefordert wird, sowohl im statischen wie im dynamischen Modus, weiterhin zum Einsatz kommen.

Danksagung

Hiermit möchten wir der V+D, im besonderen Herrn R. Hübscher, unseren Dank für die Zuverfügungstellung ihres Vermessungsflugzeuges aussprechen. Dipl. Ing. A. Wiget von der L+T liess uns für den Flugversuch ihre neuen TRIMBLE 4000SSE-Geräte aus. Auch ihm gebührt unser herzlicher Dank. Eine Reihe von Flügen wurden im Rahmen zweier ETH-Forschungsprojekte durchgeführt (GPS-gestützte photogrammetrische Triangulation ETH-Projekt Nr. 007709/41-0820.5 sowie flugzeuggestützte Schwerefeldbestimmung mit satellitengeodätischer Präzisionsnavigation ETH-Projekt Nr. 41-2647.5) für deren Finanzierung wir der Schulleitung der ETHZ unseren Dank aussprechen.

Referenzen:

- Cannon and Lachappelle (Editors): Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation (KIS94), Banff Canada, August 30–September 2, 1994.
- Cocard M. (1994): High Precision GPS-Processing in Kinematic Mode. Diss. ETH, No 10874.
- Grün A., M. Cocard, A. Geiger, H.-G. Kahle, B. Moser (1994): GPS-gestützte hochgenaue Luftbildphotogrammetrie, in VPK 7/94.
- Jeanrichard F. (Hrsg) (1992): Dreidimensionales Testnetz Turtmann 1985–1990 Teil I, SGK-Band 45.

Adresse des Verfassers:
Dr. Marc Cocard
Institut für Geodäsie und
Photogrammetrie
ETH Hönggerberg
CH-8093 Zürich