



Überlegungen beim Einsatz von GPS in der Vermessungspraxis

Bernhard Hofmann-Wellenhof ¹, Herbert Lichtenegger ²

¹ *Abteilung für Landesvermessung und Landinformation, Institut für Angewandte Geodäsie und Photogrammetrie, Technische Universität Graz, A-8010 Graz, Steyrergasse 30*

² *Abteilung für Landesvermessung und Landinformation, Institut für Angewandte Geodäsie und Photogrammetrie, Technische Universität Graz, A-8010 Graz, Steyrergasse 30*

VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **84** (4), S. 349–359

1996

Bib_TE_X:

```
@ARTICLE{Hofmann-Wellenhof_VGI_199650,  
Title = {{\U}berlegungen beim Einsatz von GPS in der Vermessungspraxis},  
Author = {Hofmann-Wellenhof, Bernhard and Lichtenegger, Herbert},  
Journal = {VGI -- {\O}sterreichische Zeitschrift f{\u}r Vermessung und  
Geoinformation},  
Pages = {349--359},  
Number = {4},  
Year = {1996},  
Volume = {84}  
}
```





Überlegungen beim Einsatz von GPS in der Vermessungspraxis

Bernhard Hofmann-Wellenhof, Herbert Lichtenegger, Graz

Zusammenfassung

Das Ziviltechniker-Forum der Kammer der Architekten und Ingenieurkonsulenten für Steiermark und Kärnten veranstaltete zwei Seminare, um dem Praktiker Grundlageninformation über GPS zu vermitteln. Gemäß der Zielsetzung sollten unter anderem fundamentale Begriffe und deren Inhalte (wie zum Beispiel DGPS) erläutert werden, damit die Praktiker besser über die GPS-Methoden, erreichbare Genauigkeiten und Entscheidungskriterien beim Kauf von Empfängern Bescheid wissen. Die Arbeit stellt eine Zusammenfassung von Seminarbeiträgen der Verfasser dar.

Abstract

Fundamental information on GPS has been provided for practitioners at two seminars organized by the Styrian Forum for Civil Engineers. In each seminar, the objective was to explain basic notations and their background (e.g., DGPS) and to inform the practitioners on GPS surveying methods, achievable accuracies, and criteria for receivers. The contributions of the authors to these seminars are summarized.

1. Einführung

1.1. Motivation

Im Herbst des vergangenen Jahres veranstaltete das Ziviltechniker-Forum der Kammer der Architekten und Ingenieurkonsulenten für Steiermark und Kärnten ein Seminar mit dem Titel „GPS für Praktiker“, und als Ergänzung folgte im Frühling dieses Jahres ein Seminar über „Entscheidungshilfen beim Kauf von GPS-Empfängern“. Bei beiden Seminaren sollten fundamentale Grundlageninformation vermittelt und Antwort auf Fragen wie zum Beispiel „Welche Genauigkeit erreicht man mit GPS?“, „Was bedeutet DGPS?“, „Welchen Empfänger für welche Aufgaben?“ gefunden werden. Zudem sollten klare Begriffsdefinitionen gegeben werden, damit zumindest im GPS-Bereich keine babylonische Sprachenverwirrung auftritt.

Im vorliegenden Beitrag ist teilweise das Manuskript, das für das Seminar im Herbst 1995 mit dem Titel „GPS - Möglichkeiten und Grenzen“ ausgegeben wurde, involviert. Neu hinzugekommen ist, entsprechend dem Motto des Frühjahrsseminars 1996, die Beschreibung der Empfängertechnologie, die dem Leser Hintergrundwissen für das Studium von Werbeprospekten bieten soll. Mit diesem Beitrag soll der Leser auch in der Lage sein, zu erkennen, daß nicht alle Firmenangaben in allen Fällen erreichbar sind. Für die Wahl von GPS-Empfängern, die immer in Verbindung mit den Beobachtungsverfahren getroffen werden muß, werden die wichtigsten Kriterien angeführt. Bewußt wird jedoch auf jegliche Produktempfehlung verzichtet.

1.2. Erforderliche Genauigkeit

Dem Wunsch des Ziviltechniker-Forums entsprechend sollen in diesem Beitrag die Anwendungen sowohl in der Katastervermessung als auch im ingenieurgeodätischen Bereich auf lokale Gebiete in der Größe von 10 km x 10 km beschränkt bleiben. Als Genauigkeitsvorgabe für die Katastervermessung gilt die Vermessungsverordnung, für die ingenieurgeodätischen Anwendungen wurden „einige Zentimeter bis 1 cm“ vorgegeben.

In der Verordnung des Bundesministers für wirtschaftliche Angelegenheiten über Vermessungen und Pläne aus dem Jahr 1994, kurz VermV, liest man im §7:

„Die Vermessung ist so vorzunehmen, daß unter Bedachtnahme auf die mittlere Punktlagegenauigkeit der Festpunkte (Triangulierungspunkte ± 5 cm, Einschaltspunkte ± 7 cm die nachstehend angegebene mittlere Punktlagegenauigkeit nicht überschritten wird:

1. bei der Bestimmung von Standpunkten:
 ± 10 cm
2. bei der Bestimmung von Grenzpunkten:
 ± 15 cm.“

2. Fundamentale Grundlagen

2.1. Status von GPS

Der gegenwärtige Status von GPS wird durch drei wesentliche Daten geprägt:

- (1) Die Endausbaustufe mit 24 Satelliten wurde im Juli 1993 erreicht und am 17. Juli 1995 wurde

AGIS®

INTERGR

 **PROGIS**™

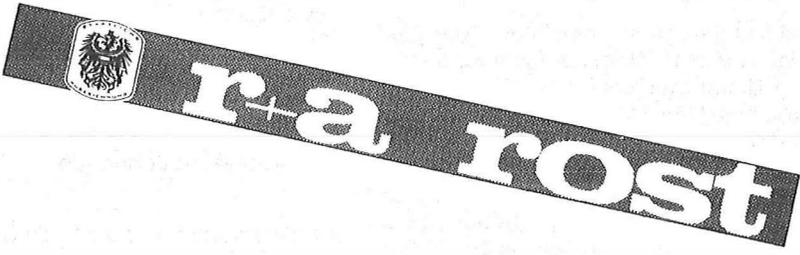
BE
V

ZEISS

V
wünsche
Inserenten ein
Geschäft

H. Wichmann  Verlag

APH



SIEMENS
NIXDORF



r
unseren
erfolgreiches
Jahr 1997

vom amerikanischen Verteidigungsministerium die „Full Operational Capability“ erklärt. „Mit 24 Satelliten können von jedem Punkt der Erde, bei jedem Wetter und zu jeder Zeit zwischen vier und acht Satelliten mit einem Höhenwinkel von zumindest 15° beobachtet werden.“, siehe [4], Seite 3. Damit sich stets 24 GPS-Satelliten im Umlauf befinden, müssen jährlich mindestens zwei Satelliten gestartet werden, da die Lebensdauer eines Satelliten beschränkt ist. Die Geometrie der Empfänger-Satelliten-Konfiguration, die sich infolge der Bewegung der Satelliten ändert, wird durch einen als PDOP bezeichneten Wert erfaßt. Je kleiner PDOP, desto besser die Geometrie. Typischerweise bewegt sich PDOP bei einem Höhenwinkel von zumindest 15° zwischen 1 und 6.

(2) Da die ursprünglich erreichbare Navigationsgenauigkeit von 15-40 m nur mehr für amerikanische Militäranwendungen verfügbar sein sollte, wurde bereits im März 1990 eine Genauigkeitsbeschränkung mittels „Selective Availability“ (SA) eingeführt. Durch SA verschlechtert sich die Navigationsgenauigkeit im sogenannten „Standard Positioning Service“ (SPS) auf 100 m für die Lage und 156 m für die Höhe. Diese Werte werden mit einem Wahrscheinlichkeitsniveau von 95% garantiert. Legt man ein Wahrscheinlichkeitsniveau von 99.99% zugrunde, sinken die entsprechenden Genauigkeiten auf 300 m für die Lage und auf 500 m für die Höhe.

(3) Eine weitere Genauigkeitsbeschränkung wurde am 31. Jänner 1994 durch das Einschalten von „Anti-Spoofing“ (A-S) eingeführt. A-S wirkt sich primär auf die Echtzeit-Navigationsgenauigkeit aus. Durch A-S wird ein Teil des codierten Satellitensignals, und zwar der sogenannte P-Code, verschlüsselt. Das verschlüsselte Signal kann nur von autorisierten Anwendern (also wieder nur für amerikanische Militäranwendungen) in vollem Umfang genutzt werden.

2.2. Satellitensignal

Um die Meß- oder Beobachtungsgrößen zu verstehen, ist die Kenntnis einiger Details über das Satellitensignals notwendig. Ein Oszillator im Satelliten erzeugt die fundamentale Frequenz von 10.23 MHz. Durch ganzzahlige Multiplikation dieser Frequenz mit 154 bzw. 120 werden zwei Trägerwellen mit den Frequenzen $L1 = 1575.42$ MHz und $L2 = 1227.60$ MHz erzeugt. Die entsprechenden Wellenlängen dieser Trägerwellen betragen etwa 19 cm bzw. 24 cm. Durch Kombination der beiden Trägerwellen ist es möglich,

den Einfluß der Ionosphäre auf das Satellitensignal weitestgehend zu eliminieren. Auf diese zwei Trägerwellen sind zwei quasizufällige („pseudo random noise“, kurz „PRN“) Codes, der C/A-Code (Coarse/Acquisition-Code) und der P-Code (Precision-Code), aufmoduliert. Die Codes bestehen aus einer Folge von Bits, wobei deren als Chiplänge bezeichneter Abstand beim C/A-Code etwa 300 m und beim P-Code etwa 30 m beträgt.

Der C/A-Code ist nur auf die Trägerwelle L1 aufmoduliert, der P-Code hingegen ist sowohl auf L1 als auch auf L2 aufmoduliert. Wie früher jedoch bereits erwähnt wurde, ist der P-Code verschlüsselt und zwar zum sogenannten Y-Code.

Auf beide Trägerwellen wird weiters die Navigationsnachricht aufmoduliert, aus der man die Bahndaten der Satelliten gewinnt.

3. Empfängertechnologie

3.1. Bausteine und Typen von GPS-Empfängern

Ein GPS-Empfänger setzt sich aus mehreren Bausteinen zusammen. Dazu zählen die Antenne mit einem Vorverstärker, die Hochfrequenzeinheit, der Mikroprozessor, die Kontrolleinheit, der Datenspeicher und die Stromversorgung. Die Antenne empfängt die Signale von allen sichtbaren Satelliten und leitet sie nach einer Vorverstärkung an den Hochfrequenzteil als die eigentliche Empfangseinheit weiter. Dort werden die Signale identifiziert und weiterverarbeitet. Bei den meisten Empfängern ist für jeden sichtbaren Satelliten jeweils ein eigener Kanal vorgesehen. Gesteuert wird die gesamte Empfangseinheit über einen Mikroprozessor. Dieser regelt auch die Datenerfassung und führt die Echtzeit-Navigationsberechnung durch. Über die Kontrolleinheit, die im wesentlichen aus einer Tastatur und einem Display besteht, kann der Benutzer interaktiv mit dem Empfänger kommunizieren. Im Datenspeicher werden die Messungen und auch die Navigationsnachricht gespeichert.

Kann ein Empfänger nur Code- und Navigations-signale registrieren, spricht man von Navigationsempfängern. Dabei haben P-Code-Empfänger im Vergleich zu C/A-Code-Empfängern im allgemeinen ein höheres Genauigkeitspotential. Für geodätische Anwendungen benötigt man Empfänger, die neben den Signallaufzeiten auch Messungen der Phasen der Trägerwellen erlauben. Dabei unterscheidet man zwischen Einfrequenz- und Zweifrequenzempfängern, je nach-

dem, ob die Phasen einer oder beider Trägerwellen registriert werden können.

3.2 Signalverarbeitung

Das empfangene Satellitensignal enthält im Prinzip drei Komponenten, die symbolisch in der Form (L1, C/A, D), (L1, P, D) und (L2, P, D) geschrieben werden können. Dabei bedeuten L1 und L2 die beiden Trägerwellen, C/A und P (bzw. Y) die beiden PRN-Codes, und D die Codefolge der Navigationsnachricht.

Das Ziel der Signalverarbeitung ist es, das empfangene Signal wieder in seine ursprünglichen Komponenten zu zerlegen, um mit Hilfe der PRN-Codes die (Pseudo-) Signallaufzeit abzuleiten, die Navigationsnachricht zu entschlüsseln und die unmodulierte Trägerwelle des Satellitensignals wiederherzustellen. Die eigentliche Signalverarbeitung wird in den einzelnen Kanälen der Hochfrequenzeinheit durchgeführt und ist nachfolgend vereinfacht dargestellt. Bezüglich Details wird auf [4] oder [5] verwiesen.

Die Messung der Signallaufzeit und der Trägerwellenphase erfolgt in sogenannten „Tracking Loop Circuits“, wo das empfangene Satellitensignal mit einem im Empfänger generierten Referenzsignal verglichen wird.

Eine Kreuzkorrelation des PRN-Codes liefert die Signallaufzeit und in weiterer Folge die Code-Entfernung. Dabei haben (wie bereits erwähnt) P-Code-Empfänger gegenüber C/A-Code-Empfängern im allgemeinen ein höheres Genauigkeitspotential wegen der um den Faktor 10 kürzeren Chiplänge. Dieser Vorteil von P-Code-Empfängern wird allerdings durch die neue „Narrow Correlator Spacing“-Technik bei modernen C/A-Code-Empfängern praktisch wettgemacht.

Nach Abspaltung des PRN-Codes enthält das empfangene Signal noch die Navigationsnachricht, die nun entschlüsselt und danach durch Hochpaßfilterung eliminiert wird. Das resultierende Signal stellt die ursprüngliche Trägerwelle dar, die allerdings zufolge des Doppler-Effektes frequenzverschoben ist. Die Messung der Phasenlage des rekonstruierten Trägers gegenüber einem Referenzsignal erfolgt wiederum in einem Regelkreis, wobei als Ergebnis die Phase innerhalb einer auch als „Cycle“ bezeichneten Wellenlänge erhalten wird.

Die Wiedergewinnung der unmodulierten Trägerwelle über die oben geschilderte Code-Korrelation ist natürlich nur bei Kenntnis des Codes und deshalb allgemein nur für den Träger L1

möglich. Zur Rekonstruktion beider Trägerwellen L1 und L2 über eine Code-Korrelation wird bei eingeschaltetem A-S der Y-Code benötigt. Es wurden aber Techniken entwickelt (Quadrivertfahren, Kreuzkorrelation, Code-Korrelation mit zusätzlichem Quadrieren, Z-tracking), die auch bei Nichtverfügbarkeit des Y-Codes die Nutzung der L2-Trägerwelle erlauben. Allerdings kommt es dadurch zu einem höheren Rauschpegel im Signal, der zu einem Genauigkeitsverlust führt. In manchen Fällen kann es sogar zu einem völligen Datenverlust kommen.

3.3 Beobachtungsgrößen

Als Ergebnis von GPS-Beobachtungen folgen Pseudoentfernungen und die Frequenzverschiebungen der Trägerwellen zufolge des Dopplereffektes. Die Pseudoentfernungen dienen zur Positionsbestimmung, und aus den Dopplerfrequenzen folgen im wesentlichen Geschwindigkeiten. Letztere werden hier nicht weiter behandelt.

Die Pseudoentfernungen weichen wegen des Synchronisationsfehlers zwischen den Satellitenuhren und der Uhr im Empfänger von den geometrischen Entfernungen zwischen Satellit und Empfänger ab. Werden die Pseudoentfernungen aus Code-Messungen abgeleitet, spricht man häufig von Code-Entfernungen; werden sie aus Messungen der Trägerwellenphasen abgeleitet, spricht man kurz von Phasen.

Die gemessenen Phasen sind mehrdeutig, da bei Beginn der Beobachtungen die Anzahl der ganzen Wellenlängen in der Entfernung zwischen Satellit und Empfänger nicht bekannt ist. Zur Bestimmung dieser auch als Ambiguitäten bezeichneten Phasenmehrdeutigkeiten werden verschiedene Verfahren verwendet.

Die erzielbare Genauigkeit hängt unter anderem von der Wellenlänge des Signals ab. Deshalb sind Code-Entfernungen bezüglich der Auflösung etwa um einen Faktor 100 ungenauer als Phasen. Eine Zusammenstellung der erreichbaren Genauigkeiten der GPS-Meßgrößen ist in Tabelle 1 enthalten.

Meßgröße	Genauigkeit
C/A-Code-Entfernung	100–300 cm
P-Code-Entfernung	10– 30 cm
Phase	0,2– 5 mm

Tabelle 1: Genauigkeiten der GPS-Meßgrößen, aus [4], Seite 9

Die Werte dieser Tabelle sind als Richtwerte zu verstehen. Denn die „Narrow Correlator Spacing“-Technik für die Signalverarbeitung bei

C/A-Code-Empfängern bringt eine Verbesserung der C/A-Code-Entfernung auf 10-30 cm, also gleichwertig wie die P-Code-Genauigkeit. Die angegebenen Phasenmeßgenauigkeiten im Zehntelmillimeterbereich sind nur unter idealisierten Verhältnissen erreichbar. So werden zum Beispiel hohe Signalstärken vorausgesetzt oder die Genauigkeit ist das Ergebnis eines längeren Glättungsprozesses. Außerdem geht die Genauigkeit der Phasenmessung bei bewegter Antenne zurück, da zur Vermeidung von Signalverlusten die Bandbreite in den Phasenmeßkreisen erhöht werden muß.

Die Messungen werden noch durch verschiedene äußere Einflüsse verfälscht. Erwähnt werden die troposphärische und ionosphärische Refraktion sowie Effekte zufolge Mehrfachreflexionen des Signals. Letztere werden auch als Mehrwegausbreitung („Multipath“) bezeichnet. Ein Teil der genannten systematischen Fehler kann durch Modellierung oder durch Differenzbildung der Meßgrößen eliminiert werden. Multipath ist im allgemeinen nicht modellierbar, kann jedoch durch spezielle Antennen oder eine geeignete Wahl des Antennenstandortes reduziert oder ganz vermieden werden.

3.4. Leistungskriterien

Aus den vorhergehenden Diskussionen lassen sich mehrere Kriterien ableiten, die für den Erwerb eines GPS-Empfängers von Bedeutung sind. In der Tabelle 2 sind einige davon angeführt.

Das physikalisch definierte Phasenzentrum der Antenne bildet den Referenzpunkt für die empfangenen Signale. Die Abweichungen des Phasenzentrums vom geometrischen Zentrum sind unter anderem von der Bauart der Antenne, von der empfangenen Frequenz und von der Richtung der ankommenden Satellitensignale abhängig. Es ist zwischen Navigationsantennen und Präzisionsantennen zu unterscheiden. Erstere weisen eine geringere Genauigkeit auf, sie sind aber wegen ihres geringen Gewichts sowie ihrer Unempfindlichkeit gegen Neigungsänderungen und Rotationen gut für kinematische Anwendungen geeignet. Die geodätischen Antennen werden zur Abschirmung gegen Mehrfachreflexionen häufig durch Grundplatten ergänzt oder in Form von Choke-Ringen ausgebildet.

Beim Hochfrequenz- (HF-) Teil ist zunächst zwischen Einfrequenz- und Zweifrequenzempfängern zu unterscheiden, wobei letztere unter anderem eine Kombination von Phasenmessungen zur Elimination der ionosphärischen Refrak-

tion erlauben. Die Anzahl der Kanäle sollte mit der maximalen Anzahl der sichtbaren Satelliten identisch sein. Für die erreichbare Genauigkeit sind die Auflösungen von Code-Entfernung und Phase wesentliche Parameter, wobei diesbezügliche Firmenangaben oft irreführend sind, vgl. [2]. Für Nutzer von Zweifrequenzempfängern ist die Technik der Rekonstruktion des L2-Trägers von Bedeutung, wobei Quadrierverfahren nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen. Die als Reakquisitionszeit bezeichnete Zeitspanne bis zur erneuten Meßbereitschaft des Empfängers nach einem Signalverlust sollte nur wenige Sekunden betragen. Sie ist allerdings nur bei kinematischen Anwendungen von wesentlicher Bedeutung.

Komponente	Merkmal
Antenne	Stabilität des Phasenzentrums Dimension und Gewicht
HF-Teil	Anzahl der Frequenzen Anzahl der Kanäle Auflösung von Code-Entfernung und Phase Rekonstruktion des L2-Trägers
Sonstiges	Reakquisitionszeit Speicherkapazität Leistungsaufnahme Stromversorgung Größe und Gewicht Preis
Optionen	Maximale Datenrate Echtzeitfähigkeit DGPS-Option
Software	Methoden der Ambiguitätenlösung Multistationslösung Datumstransformation Einbindung terrestrischer Messungen
Service	Datenarchivierung Kompatibilität Möglichkeit der Nachrüstung Kundendienst Leihgeräte

Tabelle 2: Leistungskriterien von GPS-Empfängern

Die Speicherung kann über interne oder externe Medien erfolgen. In allen Fällen ist die Möglichkeit einer on-line Registrierung auf einem Notebook-Rechner von Vorteil. Als externe Speicher kommen zunehmend PCMCIA-Karten in Betracht. Die Stromversorgung kann über einen Netzanschluß oder über eine (interne oder externe) Batterie erfolgen. Die maximale Leistungsaufnahme beträgt derzeit etwa 25 Watt. Dies entspricht bei der Spannung von 12 Volt einer Stromstärke von rund 2 Ampere, woraus die erforderliche Kapazität der Batterien ableitbar ist.

Die angeführten Optionen und Serviceleistungen sind vor allem unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit zu sehen. Es wird daher im Ab-

schnitt 5 noch näher auf diese Kriterien eingegangen.

Ein wichtiges Leistungsmerkmal stellt die angebotene Software dar. Entscheidende Bedeutung für die Zuverlässigkeit kinematischer Beobachtungen hat die Methodik der Ambiguitätenlösung und -kontrolle. Auswertesoftware ohne Module zur Datumstransformation oder Einbindung terrestrischer Meßdaten genügt nicht mehr heutigen Anforderungen. Auf die Archivierung der Meßdaten und Ergebnisse sollte in Zukunft besonderes Augenmerk gelegt werden. Anzustreben sind dabei empfängerunabhängige Formate.

4. Beobachtungsverfahren

Dieser Abschnitt wurde weitestgehend wörtlich aus [4], Abschnitt 2.1, entnommen und ist daher zur Vermeidung von Copyright-Konflikten als Zitat zu verstehen.

Um eine Gliederung der zahlreichen Beobachtungsverfahren zu ermöglichen, werden zunächst die Begriffe „statisch“ und „kinematisch“ erläutert.

Bei den statischen Verfahren sind die verwendeten Empfänger in Ruhe. Es gibt also keine Bewegung, die Empfänger bleiben während der Messung stationär. Die Ergebnisse werden aus Beobachtungen zu aufeinanderfolgenden, gleichabständigen Zeitpunkten, sogenannten Epochen, über einen Zeitraum ermittelt.

Bei den kinematischen Verfahren sind Empfänger in Bewegung, und die Ergebnisse folgen jeweils aus den Beobachtungen zu nur einer Epoche. Dabei müssen aber im Gegensatz zum statischen Verfahren jedenfalls mindestens vier Satelliten beobachtet werden. Im Fall der Phasenmessung müssen auch die Ambiguitäten bekannt sein.

Die Beobachtungsverfahren können nun nach der Anzahl der verwendeten Empfänger unterschieden werden.

4.1. Einzelpunktbestimmung

Steht nur ein Empfänger zur Verfügung, ist nur eine Einzelpunktbestimmung möglich. Durch zahlreiche Fehlereinflüsse wie etwa Satellitenbahnfehler wird nur eine geringe Genauigkeit erreicht. Deshalb genügt es, als Meßgrößen Code-Entfernungen einzuführen. Man benötigt daher nur einen Navigationsempfänger.

Die erreichbare Genauigkeit der absoluten Koordinaten der Einzelpunktbestimmung kann vom

Kontrollsegment durch SA beliebig gesteuert werden. Wie im Abschnitt 2.1 bereits angegeben, werden zur Zeit unter Nutzung des SPS die in Tabelle 3 ausgewiesenen Genauigkeiten erreicht. Diese Genauigkeiten können von zivilen Anwendern nur durch Langzeitbeobachtungen (etwa über einen Tag) oder Spezialverfahren wesentlich verbessert werden.

Wahrscheinlichkeit	Lage	Höhe
95.00%	100 m	156 m
99.99%	300 m	500 m

Tabelle 3: Genauigkeit der Einzelpunktbestimmung für zivile Anwender

Die Einzelpunktbestimmung kann statisch (mit ruhendem Empfänger) oder kinematisch (mit bewegtem Empfänger) durchgeführt werden. Das Ergebnis der Einzelpunktbestimmung bezeichnet man auch als Navigationslösung, unabhängig davon, ob eine Bewegung vorliegt oder nicht.

Für Echtzeit-Lösungen müssen Code-Entfernungen zu mindestens vier Satelliten gleichzeitig gemessen werden, damit für jede Meßepoche die vier Unbekannten (drei Stationskoordinaten und ein Uhrfehler) bestimmt werden können. Da die Code-Entfernungen im Gegensatz zu den Phasen nicht mehrdeutig sind, ergeben sich auch nach Signalunterbrechungen Lösungen in Echtzeit.

4.2. Differentielles GPS (DGPS)

Eine verbesserte kinematische Einzelpunktbestimmung in Echtzeit erreicht man durch DGPS. Bei diesem Verfahren werden jedoch zwei Empfänger benötigt, wobei in einer koordinatenmäßig bekannten (festen) Referenzstation und im bewegten (mobilen) Empfänger simultan Pseudoentfernungen zu mindestens vier identischen Satelliten gemessen werden.

Für die Referenzstation berechnet man aus den bekannten Stations- und Satellitenkoordinaten die jeweiligen Entfernungen und vergleicht diese mit den beobachteten Pseudoentfernungen. Die daraus abgeleiteten Korrekturwerte werden in Echtzeit an den mobilen Empfänger weitergeleitet. Hierfür hat sich als internationaler Standard das RTCM-Format (Radio Technical Commission for Maritime Services Format) durchgesetzt. Damit können die im mobilen Empfänger gemessenen Pseudoentfernungen korrigiert werden, wodurch eine im Vergleich zur reinen Einzelpunktbestimmung wesentlich höhere Genauigkeit erreicht wird. Unter anderem wird die Wirkung von SA weitgehend eliminiert.

Für DGPS werden üblicherweise Code-Entfernungen, meist nach einem Glättungsprozeß, verwendet. Doch kommen in zunehmendem Maß auch Phasenbeobachtungen zum Einsatz. In diesem Fall spricht man auch von präzisiertem DGPS, wobei die Ambiguitäten im mobilen Empfänger mitbestimmt werden müssen. Aus theoretischen Überlegungen folgt, daß hierzu bei acht beobachtbaren Satelliten mindestens zwei Beobachtungsepochen notwendig sind. Sind nur fünf Satelliten beobachtbar, erhöht sich die Minimalanzahl der Beobachtungsepochen auf fünf.

Beschränkt man die Länge der Basislinien auf etwa 10 km, dann sind mit DGPS die in Tabelle 4 ausgewiesenen Genauigkeiten erreichbar.

Daten	Genauigkeit
Beobachtete Code-Entfernung	3–10 m
Geglättete Code-Entfernung	0.3–3 m
Beobachtete Phase	< 0.1 m

Tabelle 4: Genauigkeit von DGPS

Der mit Code-Entfernungen erreichbare Genauigkeitsbereich von DGPS ist für den Vermessungsingenieur im Zusammenhang mit der Erfassung von GIS-Objekten und für präzise Navigationsaufgaben von Bedeutung. Referenzstationen für DGPS mit Code-Entfernungen sind bereits routinemäßig insbesondere in Küstengegenden rund um die Uhr im Einsatz und bieten ihre Dienste gratis oder gegen entsprechendes Entgelt an. DGPS mittels Phasen erfordert einen wesentlich höheren Aufwand in bezug auf die Datenübertragung und die Rechenleistung im mobilen Empfänger.

4.3. Relative Punktbestimmung

Werden simultan mit zwei Empfängern dieselben Satelliten beobachtet, dann kann eine relative Punktbestimmung durchgeführt werden.

Daraus resultieren die Koordinatenunterschiede zwischen den beiden Punkten, die den Basisvektor oder die Basislinie bilden. Sollen daraus Koordinaten abgeleitet werden, dann sind diese für einen Punkt (Referenzpunkt) vorzugeben, und die Koordinaten des zweiten Punktes werden relativ dazu bestimmt.

Die Genauigkeit der relativen Punktbestimmung ist im Vergleich zur Einzelpunktbestimmung wesentlich höher, weil durch die Kombination der Beobachtungsdaten von zwei Punkten Fehlereinflüsse ausgeschaltet werden können. Durch die relative Punktbestimmung wird auch die Wirkung von SA weitgehend eliminiert.

Bei der relativen Punktbestimmung erfolgt die Auswertung der Basisvektoren im allgemeinen nach der Messung im Büro, da für die Berechnungen die Daten beider Punkte benötigt werden. Will man eine relative Punktbestimmung in Echtzeit durchführen, müssen die Beobachtungsdaten der einen Station über Kabel oder Telemetrie an die zweite Station zur Auswertung übertragen werden.

Die höchsten Genauigkeiten werden mit GPS durch relative Punktbestimmung unter Verwendung der Trägerwellenphasen erreicht. Alle nachfolgend angegebenen Beobachtungsverfahren der relativen Punktbestimmung können sinngemäß von zwei auf mehrere Empfänger übertragen werden, wobei zumindest ein Empfänger die Rolle der bekannten Referenzstation übernehmen muß und die weiteren Empfänger zur Neupunktbestimmung eingesetzt werden. Eine zusammenfassende Übersicht der relativen Beobachtungsverfahren mittels Trägerwellenphasen ist in Tabelle 5 enthalten.

1. Statische Methode

Bei dieser Methode bleiben die Empfänger im Referenzpunkt und im Neupunkt für die Dauer der Messungen stationär. Aus wirtschaftlichen Gründen ist das relativ-statische Verfahren vor

Verfahren	Charakteristik
Statische Normalmessung	Lange Beobachtungszeit (Stunden) Beliebig lange Basislinien
Statische Schnellmessung	Kurze Beobachtungszeit (Minuten) Basislinien < 10 km Vorzugsweise Zweifrequenzempfänger Gute Satellitengeometrie erforderlich
Kinematisches Verfahren	Kurze Beobachtungszeit (Sekunden) Nach Initialisierung ständiger Signalempfang von vier Satelliten nötig
Reokkupationsmethode (oder: Pseudokinematik, Pseudostatik)	Kurze Beobachtungszeit (Minuten) Signalunterbrechung bedeutungslos Zweimalige Punktbesetzung nötig

Tabelle 5: Charakteristik der relativen Beobachtungsverfahren, teilweise aus [4], Seite 15

allein dann anzuwenden, wenn die Basislinien eine Länge von etwa 10 km überschreiten. Als Faustregel gilt, daß bei einer 10 km-Basislinie Genauigkeiten im Bereich von ± 1 cm erreicht werden können. Dies entspricht einem relativen Fehler von etwa 1 ppm. Bei längeren Basislinien gehen die relativen Fehler auf 0.1 ppm bis 0.01 ppm zurück.

Um die Phasenmehrdeutigkeiten lösen zu können, ist eine längere Beobachtungszeit notwendig. Diese hängt unter anderem von der Länge des Basisvektors, der Anzahl der beobachtbaren Satelliten sowie der Satellitengeometrie ab. Für Einfrequenzgeräte gilt als Faustregel eine Beobachtungszeit von 30 Minuten vermehrt um drei Minuten pro Kilometer Basislänge, siehe hierzu auch die Tabelle 7 im Abschnitt 5.3.

Eine Reduktion der Beobachtungsdauer auf etwa 10 Minuten plus eine Minute pro Kilometer Basislänge wird mit der statischen Schnellmessung („Rapid static“) erreicht, wobei modifizierte Verfahren zur schnelleren Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten verwendet werden. Allerdings kann diese Methode nur für etwa bis 10 km lange Basislinien, bei sehr guter Satellitenkonfiguration und vorzugsweise bei Einsatz von Zweifrequenzempfängern angewendet werden. Die erreichbare Genauigkeit entspricht jener beim normalen relativ-statischen Verfahren.

Mancherorts wird behauptet, daß für die statische Schnellmessung Beobachtungszeiten von fünf Minuten oder noch weniger ausreichend seien. Prinzipiell ist dies möglich, nur geht dabei der Vorteil, daß bei einer Beobachtungsdauer von mehr als 10 Minuten der (periodische) Einfluß der Mehrwegausbreitung abgeschwächt wird, verloren.

2. Kinematische Methode

Das relativ-kinematische Verfahren ist eine Methode der Punktbestimmung mit kurzer Beobachtungsdauer. Eine Antenne wird stationär auf dem Referenzpunkt positioniert, und die mobile Antenne wird von Neupunkt zu Neupunkt bewegt. Genauigkeiten im Subdezimeterbereich werden erreicht, wenn die Basislinien eine Länge von etwa 10 km nicht überschreiten. Voraussetzung für das Verfahren ist, daß die Phasenmehrdeutigkeiten in einem Initialisierungsvorgang bestimmt wurden und daß in weiterer Folge mindestens vier identische Satelliten an beiden Stationen beobachtet werden. Andernfalls ist eine Neuinitialisierung durchzuführen.

Die Initialisierung kann auf statische oder kinematische Weise erfolgen. Aus wirtschaftlichen

Gründen verlieren hierbei statische Methoden, etwa durch Beobachtung einer bekannten Basislinie, an Bedeutung. Die Zukunft gehört den kinematischen Methoden, die auch als „On-the-fly“ (OTF) Techniken bezeichnet werden. Bei diesen werden die Phasenmehrdeutigkeiten bei bewegter Antenne und nach Beobachtungszeiten von zwei bis drei Minuten (oder sogar noch kürzer) bestimmt.

Die Bewegung des Empfängers kann entweder kontinuierlich erfolgen oder, zur Erzielung einer höheren Genauigkeit, jeweils an den zu bestimmenden Neupunkten für kurze Zeit gestoppt werden. Im letzten Fall spricht man auch vom „Stop and Go“ Verfahren. Die Genauigkeiten liegen hier im Bereich weniger Zentimeter.

Erwähnenswert ist, daß bei den kinematischen Beobachtungsverfahren immer häufiger Echtzeitauswertungen angewendet werden. Die kinematische Vermessung in Echtzeit faßt man unter der Bezeichnung RTK („Real Time Kinematic“) zusammen.

3. Pseudokinematische Methode

Dieses Verfahren wird auch als „Reokkupationsmethode“ (dem treffendsten Ausdruck, der nur unter der martialischen Semantik leidet) und, zur weiteren Verwirrung, auch als „Pseudostatische Methode“ bezeichnet. Der Empfänger im Referenzpunkt bleibt stationär. Der mobile Empfänger benötigt in jedem Neupunkt nur eine kurze Meßzeit von 3–5 Minuten, doch muß in jedem Neupunkt nach frühestens einer Stunde (damit sich die Satellitengeometrie ausreichend ändert) nochmals für einige Minuten gemessen werden. Während der Bewegung des mobilen Empfängers von Punkt zu Punkt braucht der Signalempfang nicht erhalten zu bleiben. Der mobile Empfänger kann im Prinzip während der Bewegung abgeschaltet werden. Die Genauigkeit dieser Methode entspricht jener bei der statischen Schnellmessung.

5. Wirtschaftliche Aspekte

5.1. Genauigkeit

Beschränkt man sich auf Basislinien bis etwa 10 km, dann gelten die in der Tabelle 6 angegebenen Richtwerte für den zweidimensionalen Helmertschen Punktlagefehler. Aus geometrischen Gründen ist die Höhengenaueigkeit (im allgemeinen) um einen Faktor 1.5 bis 2 schlechter als die Lagegenauigkeit.

Die Konstante beim statischen Verfahren folgt aus der Annahme eines Phasenmeßfehlers im

Millimeterbereich und eines mittleren PDOP-Faktors. Der Phasenmeßfehler eines Empfängers kann aus sogenannten „Zero-Baseline“-Tests abgeleitet werden. Dabei wird das von einer Antenne empfangene Signal auf zwei Empfänger geleitet und eine Basislinienauswertung durchgeführt. Die Abweichungen vom Sollergebnis Null sind ein Maß für die Phasenmeßgenauigkeit. Der entfernungsabhängige Term beim statischen Verfahren kann, wie bereits erwähnt wurde, bei hochpräzisen Empfängern und mit wissenschaftlicher Auswertesoftware bis auf 0.01 ppm gedrückt werden. Die in der Tabelle 6 angegebene Genauigkeit wird übrigens von den meisten Herstellern von GPS-Empfängern für die ingenieurmäßige Praxis vertreten.

Die Konstante im kinematischen Fall ist im Sinn einer oberen Grenze zu verstehen, weil hier Effekte der Mehrwegausbreitung, von Variationen des Antennenzentrums und kurzzeitigen Änderungen des PDOP-Faktors zu berücksichtigen sind. Die Konstante kann zwar beim Stop and Go Verfahren durch mehrfache Beobachtung auf $\pm 1\text{-}2\text{ cm}$ gedrückt werden, doch beeinflusst dies nur die innere Genauigkeit. Von Herstellerseite werden bei den kinematischen Verfahren oft Genauigkeiten „im Zentimeterbereich“ genannt, was von Anwendern jedoch nicht mit „ $\pm 1\text{ cm}$ “ verwechselt werden darf.

Verfahren	Punktlagefehler
Statisch	$\pm(5\text{ mm} + 0.5\text{ ppm})$
Kinematisch	$\pm(5\text{ cm} + 5.0\text{ ppm})$

Tabelle 6: Helmertscher Punktlagefehler

5.2. Wahrscheinlichkeit

Nach der Definition der mittleren Fehlerellipse beschreibt der Helmertsche Punktlagefehler die wahre Punktlage nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 39%. Um eine Wahrscheinlichkeit von 86% bzw. 99% zu erreichen, ist der Helmertsche Punktlagefehler mit dem Faktor 2 bzw. 3 zu multiplizieren.

In Firmenprospekten tritt manchmal der Begriff „Circular Error Probable“ (CEP) auf, der die wahre Punktlage mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% beschreibt. Der Radius des Fehlerkreises ist durch den 1.18-fachen Helmertschen Punktlagefehler definiert. Entspricht der Radius des Fehlerkreises dem $\sqrt{2}$ -fachen Wert des Helmertschen Punktlagefehlers, dann wird das zugehörige Fehlermaß auch als „Distance

Root Mean Square“ (DRMS) Fehler bezeichnet, der die wahre Punktlage mit einer Wahrscheinlichkeit von 63% beschreibt.

Im kinematischen Fall sind obige Genauigkeiten nur erreichbar, wenn die Ambiguitäten zuverlässig gelöst wurden und deren Konstanz während der Messungen auch ständig kontrolliert wird. Hierin liegt aber eine wesentliche Schwäche der kinematischen Vermessungen, da Hardware und Software prinzipiell nicht zwischen Phasenänderungen zufolge Antennenbewegung oder zufolge einer Änderung der Ambiguitäten unterscheiden können. Eine fehlerhafte Signalverarbeitung kann zu Fehlern der gemessenen Phasen um mehrere Wellenlängen führen, die nur durch häufige Neuinitialisierungen rechtzeitig erkannt werden. Die Ergebnisse umfangreicher Untersuchungen zu dieser Problematik wurden jüngst von [1] oder [7] veröffentlicht.

5.3. Zeitaufwand

Der Zeitfaktor hängt von der Beobachtungstechnik (statisch oder kinematisch) und bei kinematischen Beobachtungen auch von der Initialisierung (statisch oder kinematisch) ab.

Bei statischen Messungen werden die Ambiguitäten erst bei der Auswertung berechnet. Längere Beobachtungszeiten sind erforderlich. Die Sessionslänge ist abhängig von der Basislänge, der Satellitenanzahl, der Geometrie, der Genauigkeit der Beobachtungsgrößen, der Anzahl der Frequenzen sowie weiteren Faktoren wie Refraktion und Mehrfachreflexion. Dabei ist zu beachten, daß die ionosphärische Refraktion wiederum eine Funktion der Zeit (Tag und Jahr), des Ortes und der Sonnenaktivität ist. Die in Tabelle 7 stehenden Faustformeln berücksichtigen nur den Einfluß der Basislänge. Sie gelten für 5 Satelliten, einem PDOP-Faktor unter 5 und normalen atmosphärischen Bedingungen. Ein beobachtbarer Satellit mehr oder weniger kann die notwendige Beobachtungszeit um bis zu 20% verändern. Hingewiesen wird nochmals, daß die Lösung der Ambiguitäten auch innerhalb wesentlich kürzerer Zeit erfolgen kann. Doch kann dies auf Kosten der erzielbaren Genauigkeit gehen, da bei Mehrfachreflexionen erst nach einem Zeitraum von etwa 10 Minuten ein guter Teil davon eliminiert werden kann.

Frequenz	Normalmessung	Schnellmessung
L1	30 Minuten + 3 Minuten/km	20 Minuten + 2 Minuten/km
L1, L2	20 Minuten + 2 Minuten/km	10 Minuten + 1 Minute/km

Tabelle 7: Zeitaufwand für statische Beobachtungen

Bei kinematischen Beobachtungen müssen die Ambiguitäten im voraus bestimmt werden. Aus wirtschaftlichen Gründen kommen hierfür nur die statische Schnellmessung oder die kinematische OTF-Technik in Frage. Erwähnt werden muß, daß die OTF-Technik die Beobachtbarkeit von mindestens 5 Satelliten voraussetzt. Erinnert wird auch daran, daß zur Steigerung der Zuverlässigkeit eine häufige Kontrolle der einmal bestimmten Ambiguitäten vorzusehen ist.

5.4. Investitionskosten

Ein wesentlicher Faktor für die Investitionskosten ist die Wahl eines Einfrequenz- oder Zweifrequenzempfängers. Eine zusammenfassende Darstellung zu dieser Problematik ist in [6] enthalten. Danach erhält man bei (statischer) Beobachtung von Basislinien bis 10 km mit Einfrequenzgeräten etwa die gleichen Genauigkeiten wie mit Zweifrequenzgeräten. Jedoch sind bei Zweifrequenzgeräten kürzere Beobachtungszeiten zur Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten möglich.

Die kinematische Vermessung in Echtzeit (RTK) wird in der geodätischen Praxis unbedingt nur für hochpräzise Steuerungsaufgaben und für Absteckungsarbeiten benötigt. Irreführend ist die Behauptung, daß Echtzeitleösungen zu 100% ein Ergebnis garantieren. Ein Ergebnis wird zwar sicher erhalten, unsicher ist jedoch dessen Richtigkeit, wie die obigen Ausführungen über die Zuverlässigkeit kinematischer Vermessungen beweisen. Die Option der Echtzeitfähigkeit erfordert den Einsatz der telemetrischen Datenübertragung. Dies erhöht die Investitionskosten und schränkt gleichzeitig den Anwendungsbereich von GPS ein, da im allgemeinen Funkeinrichtungen nur mit geringer Reichweite und mit bestimmten Frequenzen genehmigt werden. Ein weiterer Nachteil der RTK-Technik ist die Verwendung der durch SA verfälschten Bahndaten sowie das Problem der Datumstransformation. Trotzdem besteht kein Zweifel, daß RTK-Verfahren in Zukunft verstärkte Anwendung finden werden.

Die geodätische Vermessung mittels DGPS setzt neben der notwendigen Telemetrieausrüstung voraus, daß die Referenzstation das RTCM V2.1-Format aussendet. Dieses Format enthält neben den Korrekturwerten für die Code-Entfernungen auch solche für die Phase. Diesbezügliche Studien sind derzeit unter anderem in Deutschland, vgl. [3], Österreich und der Schweiz im Gange.

Einen wesentlichen Faktor für Nachfolgekosten stellen die Serviceleistungen des Produktherstellers oder -anbieters dar. Dazu zählen auch die Kompatibilität des Empfängers und die Möglich-

keit der Nachrüstung. Beim Einsatz von GPS ist verstärkt auf das Angebot von Leihgeräten im Fall von größeren Projekten oder während Reparaturarbeiten an den Empfängern zu achten.

6. Zusammenfassung

Die Absicht der Autoren mit diesem Beitrag war es, elementare Grundlagen für den Praktiker in möglichst kompakter Form zu liefern. Die Aufgabenstellung verlangte neben den Begriffsdefinitionen auch Entscheidungshilfen für die Wahl von GPS-Empfängern, wobei Genauigkeitsanforderungen für die Katastervermessung (± 10 cm für Standpunkte, ± 15 cm für Grenzpunkte) sowie für den ingenieurgeodätischen Bereich (einige Zentimeter bis zu 1 cm) vorgegeben waren. Nach dem Studium dieses Beitrags sollte der Praktiker in der Lage sein, aus den tabellarischen Übersichten einerseits die möglichen Beobachtungsverfahren auszuwählen und andererseits beim Kauf oder beim Ausleihen von Empfängern auf die richtigen Kriterien zu achten, damit die Ergebnisse mit den Erwartungen übereinstimmen.

Der Erhöhung der Zuverlässigkeit vor allem bei RTK-Verfahren kommt in Zukunft eine wichtige Bedeutung zu. Den sichersten Weg jedoch bietet nach wie vor die altbewährte geodätische Regel, wonach eine Messung allein keine Messung ist.

Literatur

- [1] Bačić Ž., Kalafut M., Lichtenegger H., Wagner J. (1995): Some investigations on precise kinematic GPS surveys. In: Proceedings of the International Symposium on GPS Technology Applications, Bukarest, Rumänien, 26.–29. September.
- [2] Dierendonck A.J. van (1994): Understanding GPS receiver terminology: a tutorial on what those words mean. In: The University of Calgary (Hrsg): Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, Banff, Canada, 30. August – 2. September.
- [3] Hankemeier P. (1995): DGPS-Dienst der Vermessungsverwaltungen. Zeitschrift für Satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation (SPN), Heft 3.
- [4] Hofmann-Wellen Hof B., Kienast G., Lichtenegger H. (1994a): GPS in der Praxis. Springer, Wien New York.
- [5] Hofmann-Wellen Hof B., Lichtenegger H., Collins J. (1994b): GPS – theory and practice. Springer, Wien New York, Dritte Auflage.
- [6] Stummer H. (1995): GPS-Einfrequenzempfänger kontra Zweifrequenzempfänger – ein Genauigkeitsvergleich. Diplomarbeit am Institut für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie der TU Wien.
- [7] Wylde G., Featherstone W. (1995): An evaluation of some stop-and-go kinematic GPS survey options. The Australian Surveyor, September 1995.

Anschrift der Verfasser:

a.o. Univ.-Prof. Dr. Bernhard Hofmann-Wellen Hof und Univ.-Doz. Dr. Herbert Lichtenegger, Abteilung für Landesvermessung und Landinformation, Institut für Angewandte Geodäsie und Photogrammetrie, Technische Universität Graz, A-8010 Graz, Steyrergasse 30.