

Präzises DGPS in Echtzeit für Vermessung und GIS-Anwendungen¹

von

Gerhard Wübbena und Andreas Bagge

Geo++ Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und navigatorische
Technologien mbH
Steinriede 8-10, 30827 Garbsen, Tel. (05131) 4689-0
<http://www.geopp.de>
gerhard.wuebbena@geopp.de, andreas.bagge@geopp.de

1. Einleitung

Das Global Positioning System (GPS), ursprünglich als reines Navigationsverfahren konzipiert, hat bereits seit seinen Anfangstagen Bedeutung auch für Vermessungsanwendungen erlangt. Waren dabei zunächst statische Meßverfahren mit aufwendigem Postprocessing die einzig verfügbaren Methoden, so treten in jüngster Zeit Echtzeitanwendungen in den Vordergrund, die nicht nur die Einsatzmöglichkeiten und die Effektivität im Vermessungswesen erheblich steigern können, sondern das GPS auch für andere Fachgebiete, die genaue Koordinaten benötigen, wie z.B. GIS-Anwendungen interessant machen.

Die neuen Möglichkeiten, die sich durch die Echtzeitverarbeitung von GPS-Messungen mit hoher und höchster Genauigkeit ergeben, werden von der Praxis erst langsam erkannt. Dieser Beitrag soll die notwendigen Hintergrundinformationen zum Verständnis des Präzisen Differentiellen GPS (PDGPS) geben und die Einsatzmöglichkeiten in den genannten Bereichen aufzeigen.

2. Grundlagen

2.1 Grundprinzip des GPS

Das Grundprinzip des GPS besteht darin, daß Laufzeitmessungen zu Satelliten mit bekannter Position gemacht werden. Mit bekannter Lichtgeschwindigkeit kann von der Laufzeit auf die Entfernung zu den Satelliten umgerechnet werden. Da an der Laufzeitmessung zu jedem Satelliten prinzipbedingt immer zwei Uhren (Satelliten- und Empfängeruhr) beteiligt sind, die nicht miteinander synchronisiert sind, ist die Laufzeitmessung um den sogenannten Uhrfehler verfälscht. Die Synchronisation der Satellitenuhren untereinander wird bis zu einem gewissen Grad vom GPS-Systembetreiber durch hochgenaue Atomuhren und ständige Kontrolle gewährleistet. Aus Kostengründen verzichtet man im Empfänger jedoch auf hochgenaue Atomuhren. Es bleibt also ein Synchronisationsfehler zwischen der Empfängeruhr einerseits und den Satellitenuhren andererseits. Zur Positionsbestimmung gehört demnach neben den drei unbekanntenen Koordinaten noch ein Uhr- oder Synchronisationsfehler. Zur Bestimmung dieser vier Unbekannten sind mindestens vier Beobachtungen, hier Laufzeitmessungen, erforderlich. Weil diese Beobachtungen noch den Synchronisationsfehler enthalten, spricht man auch

¹ Beitrag zum DVW-Praxisseminar *DGPS-Anwendungen*, 19. - 20. Sept. 1995 in Hamburg
(Redaktionelle Überarbeitung 2000-07-25)

von Pseudolaufzeit- oder besser von Pseudoentfernungsmessungen.

Schreibt man in Matrizenschreibweise die Beobachtungen \underline{L} als Funktion $\underline{\psi}$ der Unbekannten \underline{X}

$$\underline{L} = \underline{\psi}(\underline{X}),$$

so sind zunächst in $\underline{\psi}$ die funktionalen Zusammenhänge zu beschreiben. Dies ist wie bei Entfernungsmessungen im wesentlichen der Pythagoras zwischen Satelliten- und Empfängerposition. Daraus lassen sich nach Linearisierung die Unbekannten durch Ausgleichung bestimmen:

$$\underline{x} = (\underline{A}^T \underline{A})^{-1} \cdot \underline{A}^T \underline{l} = \underline{Q}_{xx} \cdot \underline{A}^T \underline{l},$$

In der Matrix \underline{Q}_{xx} ist dabei die Geometrie des Lösungssystems, also die Satellitenposition etc., enthalten. Für eine Fehlerbetrachtung trennt man gern den Uhrfehler von den drei Koordinaten und komprimiert deren Genauigkeit zu einem skalaren Wert σ_x :

$$\sigma_x = \text{spur}(\underline{Q}) \cdot \sigma_L = \text{PDOP} \cdot \sigma_L.$$

Durch Wahl der entsprechenden Elemente in \underline{Q}_{xx} können auch andere Unbekannte z.B. die Genauigkeiten von Lage (HDOP), Höhe (VDOP) oder Uhrfehler (TDOP) berechnet werden. Seit dem vollständigen Ausbau des GPS-Weltraumsegments sind heute typischerweise die folgenden mittleren Werte zu erwarten:

PDOP (Position Dillution of Precision)	2...4
HDOP (Horizontal Dilution of Precision)	1,5...2,5
VDOP (Vertical Dilution of Precision)	2...3

Der DOP-Wert als Kenngröße der Geometrie ist vom Benutzer nicht veränderbar. Die Genauigkeit einer GPS-Messung ist damit im wesentlichen nur beeinflussbar durch die Genauigkeit σ_L einer Beobachtung, die wiederum abhängt von der Qualität des eingesetzten GPS-Empfängers und der verwendeten Meßgröße, wie im folgenden näher ausgeführt wird.

2.2 Differentielles GPS (DGPS)

Bei der Betrachtung im vorangegangenen Abschnitt sind wesentliche Fehlerquellen des GPS noch nicht berücksichtigt. So sind weder die Satellitenpositionen noch die Satellitenuhren fehlerfrei bekannt, außerdem breiten sich die Satellitensignale nicht im Vakuum, sondern in einer vielfältig differenzierten Atmosphäre aus. Zusätzlich werden die Signale vom Systembetreiber absichtlich verfälscht, um das Genauigkeitspotential des GPS für einen potentiellen Feind herabzusetzen. Alle diese Fehlereinflüsse bewirken, daß mit dem obigen Vorgehen bestenfalls eine Genauigkeit schlechter als 20-30 Metern erreicht werden kann.

Dennoch läßt sich die Genauigkeit des GPS erheblich steigern, wenn man sich die Eigenschaft der meisten der genannten Fehler zunutze macht, daß wegen der großen Flughöhe der GPS-Satelliten ihre räumliche Korrelation sehr hoch ist. Das bedeutet, daß der Einfluß z.B. eines Positionsfehlers in den Satellitenkoordinaten auf die Entfernungsmessung zwar groß sein kann, für benachbarte Standpunkte aber fast genauso groß sein wird. In der Differenz der Signale benachbarter Stationen wird der Fehler also weitgehend eliminiert sein. Ähnliches gilt für die Fehler der Signalausbreitung in der Ionosphäre und bis zu einem gewissen Grad in der Troposphäre. Die Uhrfehler der Satelliten werden sogar vollständig eliminiert.

Voraussetzung für diese Technik der Fehlerreduzierung ist also, daß die Signale von zwei benachbarten Stationen gleichzeitig verarbeitet werden. Dann liefert dieses Verfahren die relative Position der beiden Stationen mit wesentlich verbesserter Genauigkeit von bis zu einem Meter. Generell muß jedoch beachtet werden: je weiter die Empfänger voneinander entfernt sind, desto größer wird der in

der Differenz zurückbleibende Fehleranteil.

Die absolute Position bleibt aber nach wie vor ungenau. Zur Koordinatenbestimmung installiert man deshalb meist eine der beiden Stationen auf einem koordinatenmäßig bekannten Punkt und hängt den zweiten Punkt mit der hohen relativen Genauigkeit an diesen an. Dieses Verfahren wird gewöhnlich als Differentielles GPS oder kurz DGPS bezeichnet.

Im Gegensatz zu der oben beschriebenen Differenzbildung zwischen den Meßgrößen bzw. den Stationen berechnet man aus den bekannten Satelliten- und Empfängerkoordinaten sowie der gemessenen Pseudoentfernung eine sogenannte Pseudoentfernungskorrektur, die dann an die Meßgrößen der zweiten Station angebracht wird.

2.3 Präzises differentielles GPS (PDGPS)

Für viele Anwendungen, insbesondere im Vermessungswesen und GIS-Bereich, ist die mit einfachen DGPS-Techniken erreichbare Genauigkeit von vielleicht einem Meter nicht ausreichend. Der begrenzte Fehlereinfluß ist dort die Auflösung des verwendeten Meßsignals. Eine weitere Genauigkeitssteigerung ist möglich, wenn statt des aufmodulierten C/A-Codes die Trägerphase direkt als Meßsignal herangezogen wird. Damit sind bei der heutigen Empfängertechnologie Auflösungen bis zu einem Millimeter möglich.

Leider hat die Trägerphase jedoch den Nachteil, daß meßtechnisch nur das sogenannte Phasenreststück gemessen werden kann. Der Wertebereich für eine gemessene Trägerphase liegt zwischen 0 und einer Wellenlänge, d.h. etwa 20 cm. Die Anzahl der nicht meßbaren ganzen Wellenzyklen ist zunächst unbekannt. Eine aus der Trägerphasenmessung abgeleitete Pseudoentfernung ist deshalb nicht eindeutig. Dies ist das sogenannte Mehrdeutigkeitsproblem (Ambiguity) bei Phasenmessungen, das auch in der elektrooptischen Entfernungsmessung auftritt. Glücklicherweise sind hochwertige GPS-Empfänger heute in der Lage, während des laufenden Betriebs die Veränderungen in den vollen Wellenzyklen mitzuzählen, so daß pro Satellit nur eine einzige unbekannte Mehrdeutigkeit zu bestimmen ist, solange keine Störungen im Satellitensignal (z.B. durch kurzzeitige Abschattungen) auftreten. Gelingt die Lösung des Mehrdeutigkeitsproblems, so erhält man Pseudoentfernungen zum Satelliten mit einer Auflösung im Millimeterbereich.

Beherrscht man die Techniken zur Mehrdeutigkeitsbestimmung, so können durch dieses Verfahren Genauigkeiten bis unter einen Zentimeter erzielt werden. Man spricht deshalb auch von Präzisem Differentiellem GPS oder kurz PDGPS.

2.4 Einfrequenz- / Zweifrequenzempfänger

Die GPS-Satelliten senden ihre Signale grundsätzlich auf zwei Frequenzen. Der Sinn eines zweiten Signals liegt hauptsächlich darin, daß die Ausbreitungseigenschaften in der Ionosphäre als dispersivem Medium durch Messung auf zwei unterschiedlichen Frequenzen weitgehend erfaßt werden können. Ein wesentlicher Fehlereinfluß für die absolute, aber auch für die relative Positionsbestimmung ist damit entscheidend reduziert.

In der Diskussion um die Qualität einzelner Empfängertypen ist ein daher wichtiges Merkmal, ob ein Empfänger auf einer oder auf zwei Frequenzen arbeitet. Grundsätzlich sind bei zivilen Empfängern Code-Beobachtungen nur auf der ersten Frequenz möglich. Die Trägerphasen können mit geeigneten Techniken aber auch auf der sonst geheim verschlüsselten zweiten Frequenz genutzt werden. Natürlich hat diese Technik ihren Preis, so daß Zweifrequenzempfänger in der Regel doppelt so teuer sind wie vergleichbare Einfrequenzempfänger.

Ein weiterer Vorteil von Zweifrequenzempfängern liegt darin begründet, daß mit der zweiten Frequenz nicht nur doppelt so viele Beobachtungen vorliegen, sondern auch Phasenmessungen mit unterschiedlichen Wellenlängen, die durch geschickte Kombination die Bestimmung der Mehrdeutigkeiten wesentlich beschleunigen können.

2.5 Postprocessing / Echtzeitauswertung

In der Anfangszeit des GPS gab es im wesentlichen zwei Benutzergruppen: einmal die Navigations-Anwender, die an geringer Genauigkeit, aber in Echtzeit interessiert waren, und zum anderen Anwender aus z.B. dem Vermessungswesen, die höchste Genauigkeit benötigten, dafür aber unter Umständen Tage oder Wochen auf das Ergebnis warten konnten.

Im Laufe der Zeit wuchsen die Anforderungen beider Gruppen ständig, bis sie schließlich in jüngster Zeit weitgehend verschmolzen sind. Die Navigation kann mit Genauigkeiten im Bereich weniger Zentimeter arbeiten, und Vermessungen mit GPS können in Echtzeit ausgewertet werden, so daß sogar zentimetergenaue Absteckungen mit GPS vorgenommen werden können.

2.6 Korrekturdatenformate (RTCM)

Voraussetzung für hohe Genauigkeiten sind, wie oben beschrieben, die differentiellen GPS-Verfahren. Darüber hinaus müssen für eine Echtzeitauswertung die Meßinformationen der Referenzstation auch auf der Mobilstation verfügbar sein. Hier kommt dem verwendeten Übertragungskanal und der zur Verfügung stehenden Bandbreite eine entscheidende Bedeutung zu. Eine Übertragung der Empfänger-Rohdaten kommt aus Kapazitätsgründen oft nicht in Frage. Statt dessen werden auf der Referenzstation die Meßwerte soweit aufbereitet, daß nur noch Korrekturwerte für die beobachteten Satelliten übertragen werden müssen. Eine Übertragung von Positionskorrekturen, obwohl prinzipiell möglich, wird meist nicht verwendet, weil dazu exakt dieselbe Satellitenkonfiguration auf beiden Stationen vorausgesetzt werden muß.

Zur Standardisierung der Korrekturdatenformate wurde 1990 von der Radio Technical Commission for Marine Services, Special Committee 104, ein Format RTCM SC-104 Version 2.0 (oder kurz RTCM-2.0) verabschiedet, welches für die Übertragung von einfachen Code-Korrekturen ausreichend war. 1993 wurde es als Format RTCM-2.1 überarbeitet und um zusätzliche Felder für Code- und Trägerphasenkorrekturen erweitert. Während ein kompletter Datensatz für die Codekorrekturen von 12 Satelliten in RTCM-2.0 noch in 1200 Bits unterzubringen war, sind für Phasenkorrekturen im RTCM-2.1 mehr als 4800 Bits erforderlich. Da die wichtigen Übertragungsfrequenzen eine zuverlässige Übertragung nur bis 2400 Bits pro Sekunde (bps) gewährleisten, ist eine befriedigende Taktrate von 1 Datensatz pro Sekunde mit dem Standardformat RTCM-2.1 oft nicht möglich.

Aus diesem Grunde wurde von Geo++ das Format RTCM++ entwickelt, welches den vollen Informationsgehalt von RTCM-2.1 enthält, aber dank geschickter Datenreduktion und -komprimierung mit 2400 Bits auskommt und trotzdem kompatibel zum RTCM-Standard bleibt. Die Landesvermessungsbehörden der Bundesrepublik Deutschland werden für ihren eigenen Referenzstationsdienst Korrektursignale im Format RTCM-AdV aussenden, welches voraussichtlich die für das RTCM++ entwickelten Techniken verwendet.

2.7 Statische / Kinematische Punktbestimmung

Ein weiterer Unterschied zwischen Navigations- und Vermessungsanwendungen löst sich immer weiter auf. Waren ursprünglich die Vermessungsanwendungen immer statisch, d.h. mit einer längeren Verweildauer auf einem Vermessungspunkt verbunden, so ging die Entwicklung über die sogenannten pseudo-kinematischen, Stop-and-Go- oder Rapid-Static-Verfahren zuletzt bis hin zu voll kinematischen Verfahren. Mit der neuesten Generation der GPS-Auswertesoftware, z.B. GNRT, kann die GPS-Antenne frei bewegt werden, ein einziger Meßzeitpunkt reicht zur Bestimmung eines Punktes aus.

2.8 Häufig verwendete DGPS-Begriffe

Im Zusammenhang mit DGPS, PDGPS etc. werden viele Begriffe und Abkürzungen verwendet, deren Bedeutung nicht immer ganz klar ist. Die folgende Aufstellung in Tabelle 1 soll eine kleine Hilfestellung geben.

Kürzel	Bezeichnung und Erläuterungen
D	Differential <ul style="list-style-type: none"> • <u>2 simultan</u> messende Empfänger, deren Beobachtungen zur Elimination von systematischen Fehlern <u>gemeinsam</u> ausgewertet werden • relative Positionsbestimmung der beiden Empfänger zueinander • im Gegensatz zur absoluten Positionsbestimmung mit nur einem einzelnen Empfänger • Im Vermessungswesen meist implizit unterstellt
R	Relative <ul style="list-style-type: none"> • Positionsbestimmung relativ zu einem (z.B. bewegten) Referenzpunkt, dessen <u>absolute Position nicht bekannt</u> ist • im Gegensatz zur Positionsbestimmung relativ zu einem Referenzpunkt mit bekannten Absolutkoordinaten • nur sinnvoll im Zusammenhang mit Differential
P	Precise <ul style="list-style-type: none"> • Positionsbestimmung unter Verwendung von <u>Phasenmessungen</u> • im Gegensatz zu Code-Messungen • im Vermessungswesen oft implizit unterstellt • meist nur sinnvoll im Zusammenhang mit Differential
I	Inverse (oder Reverse) <ul style="list-style-type: none"> • Berechnung der Mobilstation-Koordinaten <u>auf der Referenzstation</u>, • im Gegensatz zur Berechnung auf der Mobilstation (oder im "Postprocessing")
K	Kinematic <ul style="list-style-type: none"> • <u>Bewegte</u> Antenne, • im Gegensatz zu unbewegter Antenne (Static) • in Navigation implizit unterstellt • im Vermessungswesen auch als Bezeichnung eines speziellen Meßverfahrens verwendet
S	Static <ul style="list-style-type: none"> • <u>Unbewegte</u> Antenne • im Gegensatz zur bewegten Antenne (Kinematic) • im Vermessungswesen oft implizit unterstellt
RT	Real Time <ul style="list-style-type: none"> • <u>sofortige Verfügbarkeit</u> des Meßergebnisses, quasi in Echtzeit, • im Gegensatz zum "Postprocessing". • in Navigation meist implizit unterstellt
WA	Wide Area <ul style="list-style-type: none"> • <u>Netz</u> von Referenzstationen, um ein größeres Gebiet mit Referenzsignalen zu versorgen • im Gegensatz zu einer einzelnen Referenzstation • nur sinnvoll im Zusammenhang mit Differential • bisweilen Unterscheidung in Local Area (LA) und Wide Area (WA)
GNSS	Global Navigation Satellite System <ul style="list-style-type: none"> • <u>Oberbegriff</u> für einsetzbare Satellitennavigationssysteme, z.B. GPS, Glonass u.a.

Tabelle 1: Begriffe im Zusammenhang mit Differential GPS (DGPS)

Viele Genauigkeitsangaben von Hard- und Softwareherstellern sind nicht direkt miteinander vergleichbar, weil unterschiedliche Konfidenzbereiche vorausgesetzt werden. Auch werden 2D-Lagegenauigkeit und 3D-Positionsgenauigkeit oft nicht sauber getrennt. Die folgende Tabelle 2 versucht eine

Aufklärung der Begriffsvielfalt.

RMS	Root Mean Square Standardabweichung, 68.3% Konfidenzbereich
CEP	Circular Error Probable $0.59 * (\sigma_\phi + \sigma_\lambda)$, ebener (kreisförmiger) 50% Konfidenzbereich
CEP95	95% CEP $CEP * 2.08$, ebener (kreisförmiger) 95% Konfidenzbereich
CEP99	99% CEP $CEP * 2.58$, ebener (kreisförmiger) 99% Konfidenzbereich
MSPE	Mean Square Position Error $SQRT(\sigma_\phi^2 + \sigma_\lambda^2)$, "mittlerer Lagefehler", 68.3% Konfidenzbereich
DRMS	Distance RMS wie MSPE
2DRMS	double DRMS $2 * DRMS$, 95% Konfidenzbereich
MRSE	Mean Radial Spherical Error $SQRT(\sigma_\phi^2 + \sigma_\lambda^2 + \sigma_h^2)$, "mittlerer (3-dim.) Punktfehler", 68,3% Konfidenzbereich
SEP	Spherical Probable Error $0,51 * (\sigma_\phi + \sigma_\lambda + \sigma_h)$, räumlicher (kugelförmiger) 61%-Konfidenzbereich
PDOP	Position Dilution of Precision Umrechnungsfaktor Entfernungsgenauigkeit nach Positionsgenauigkeit, abhängig nur von der Satellitenkonstellation, normalerweise gilt PDOP ca. 2-3

Tabelle 2: Im Zusammenhang mit GPS verwendete Genauigkeitsmaße (Seeber 1993)

Wie stark die von den verschiedenen Fehlerbegriffen abgedeckten Bereiche voneinander abweichen, wird in einer graphischen Darstellung deutlich (Abb. 1). Man beachte, daß für alle dargestellten Fehlermaße der gleiche Zahlenwert gilt.

Den meisten Fehlermaßen liegt der Begriff der Standardabweichung (engl. Root Mean Square, RMS) zugrunde, der aber mit 68,3% Sicherheitswahrscheinlichkeit nur etwa zwei Drittel der Meßwerte der tatsächlich vorkommenden Variationsbreite erfaßt. Realistischer ist meist ein 95%-Konfidenzbereich, der immerhin 95% aller möglichen Meßwerte umfaßt. Zu seiner korrekten Beschreibung muß allerdings die Standardabweichung mit etwa dem Faktor 2 multipliziert werden. Mit anderen Worten, bei einer gegebenen Standardabweichung σ muß realistischerweise etwa mit einer Streuung der Meßwerte von $\pm 2\sigma$ gerechnet werden.

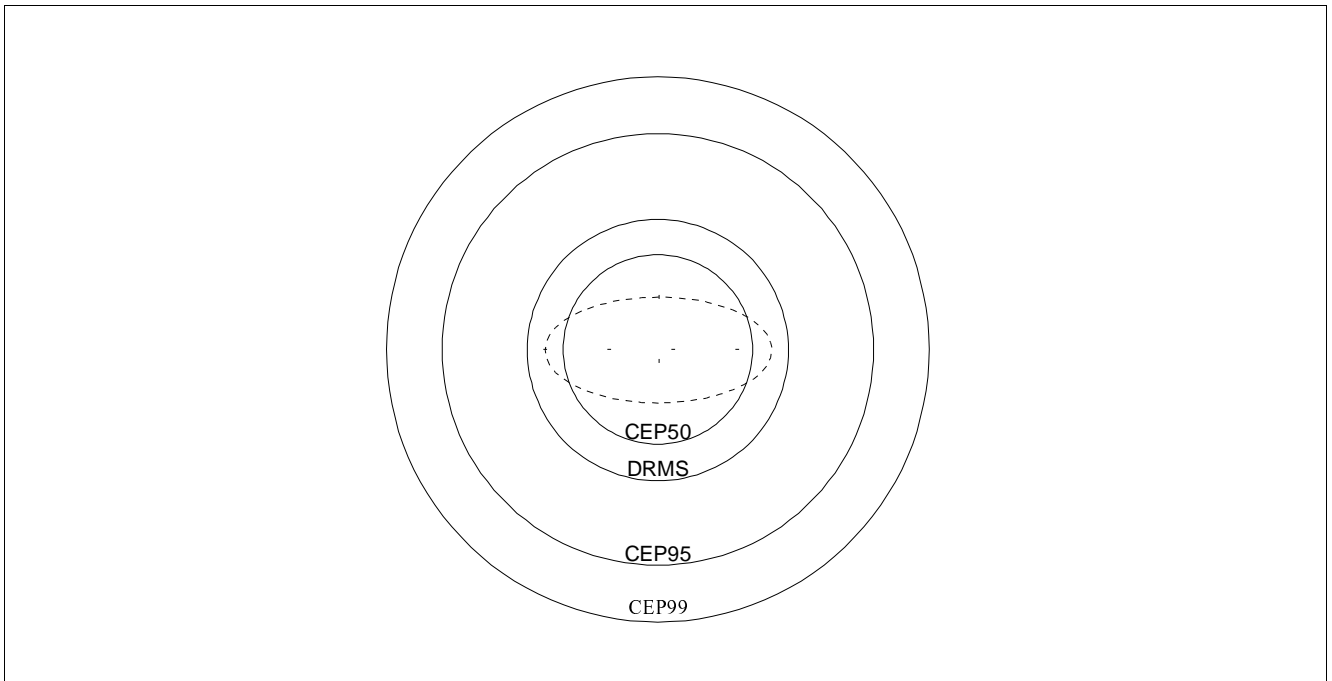


Abb. 1: Darstellung der gebräuchlichen Fehlermaße für die Lagegenauigkeit bei sonst gleichen Voraussetzungen

Unberücksichtigt bleibt bei allen genannten skalaren Fehlermaßen auch die Tatsache, daß es ähnlich wie bei Lage und Höhe auch unterschiedliche Fehler in den Lagekomponenten geben kann, die zutreffend nur durch eine Fehler- oder Konfidenzellipse beschrieben werden können, wozu jedoch ein skalarer Parameter nicht mehr ausreicht.

3. Realisierung eines PDGPS-Systems am Beispiel GNRT-K

3.1 Allgemeines

Im Bereich der Echtzeit-PDGPS-Anbieter gibt es in den letzten Jahren eine sich überschlagende Entwicklung. Die meisten Produkte in diesem Bereich sind kombinierte Hard- und Softwareprodukte, die vom GPS-Gerätehersteller direkt angeboten werden. Neben den Vorteilen, die ein Bezug aller Komponenten aus einer Hand bietet, dürfen aber auch die Nachteile nicht übersehen werden. Hierzu zählen die Festlegung auf einen bestimmten Empfängerhersteller, die oft mangelnde Unterstützung von standardisierten Schnittstellen wie z.B. RTCM-2.0/2.1 oder RTCM-AdV oder die fehlende freie Auswahl der Kommunikationskanäle.

Mit dem DGPS-Softwaresystem GNRT bietet die Geo++ GmbH eine in herstellerunabhängige, flexible Echtzeit-DGPS-Software an, die den gesamten Genauigkeitsbereich von einem Meter bis zu besser als einem Zentimeter abdeckt.

3.2 Konzeption von GNRT

Bei der Entwicklung einer Echtzeitsoftware wie GNRT standen die nachfolgend genannten Konzeptionsmerkmale im Vordergrund.

3.2.1 Modularer Aufbau

Die einzelnen Module von GNRT sind als unabhängige Programme konzipiert, die unter einem modernen Multitasking-Betriebssystem für den Benutzer unbemerkt zusammenarbeiten. Dazu gehören Empfängermodule, das RTCM-Input- und das RTCM-Output-Modul, das eigentliche GNRT-Modul,

das die Unbekannten bestimmt, das GNRT-K-Modul für die Verarbeitung der Trägerphasen und die Mehrdeutigkeitsbestimmung, sowie diverse Transformations-, Status-, Kontroll- und Ausgabemodule. Wegen seiner Modularität kann das System sehr schnell und flexibel für unterschiedliche Aufgaben konfiguriert werden.

3.2.2 Empfängerunabhängigkeit

Als reine Softwarelösung arbeitet GNRT mit allen wichtigen am Markt verfügbaren Empfängertypen zusammen. Als Empfängermodule sind zur Zeit die geodätischen Empfänger von Ashtech, Navstar, Novatel, Trimble und Zeiss verfügbar. Leica ist in Vorbereitung, andere Empfängertypen können bei Bedarf sehr schnell implementiert werden.

3.2.3 Trend zum GPS-Sensor

Viele Hersteller von GPS-Empfängern haben den Trend der Zeit erkannt und bieten vermehrt sogenannte GPS-Sensoren an, die die volle GPS-Empfängertechnologie beinhalten, aber von aufgabenfremden und teuren Komponenten wie RAM-Speicher, Tastatur und Display sowie eigener Software befreit sind, die besser und kostengünstiger in einen externen Rechner verlagert werden können. Diesem Trend kommt GNRT entgegen, indem es die Software ebenfalls auf einem externen Rechner ablaufen läßt.

3.2.4 AdV-Kompatibilität

Für einen kostengünstigen Einsatz eines PDGPS-Systems wird es in Zukunft von großem Vorteil sein, wenn man sich des DGPS-Dienstes der AdV bedienen kann. Zum einen entfällt die Notwendigkeit, eine eigene Referenzstation zu betreiben, zum anderen kann das erhöhte Genauigkeitspotential, das aus der Vernetzung der AdV-Stationen resultiert, ausgenutzt werden.

3.2.5 Kommunikation über verschiedene Kanäle

Für einen flexiblen Einsatz ist es unumgänglich, für den jeweiligen Einsatzort den günstigsten Kommunikationskanal für die Korrektursignale zu wählen. Solange der DGPS-Dienst der Landesvermessungen auf der Basis von 2-Meter-Frequenzen noch nicht flächendeckend verfügbar ist, kommen alternativ Verbindungen über Mobiltelefone (D-Netz) in Betracht. Auch lokale Referenzstationen mit eigenen Sendern im 70cm-Band bei allerdings beschränkter Reichweite können verwendet werden. Letztlich läßt GNRT alle Kanäle zu, die über eine serielle Schnittstelle ihre Daten liefern können.

3.2.6 Offen für zukünftige Erweiterungen der DGPS-Dienste

Durch das qualifizierte Know-How der Geo++ GmbH bei der Entwicklung von DGPS-Referenzstationssoftware (GNREF wird heute bereits von den meisten Landesvermessungen eingesetzt) und die flexible Erweiterbarkeit ist GNRT in der Lage, auch zukünftige Weiterentwicklungen der DGPS-Dienste unverzüglich für den Endanwender nutzbar zu machen.

3.2.7 Feldtauglichkeit / grafische Benutzeroberfläche

Ein PDGPS-System muß für den praktischen Feldeinsatz tauglich sein. Für die Software bedeutet dies, daß die wichtigsten Informationen schnell und übersichtlich präsentiert werden. Die Benutzereingaben müssen intuitiv sein und auf das nötigste beschränkt bleiben. Dies ist am besten mit einem sogenannten grafischen Feldbuch möglich, wo alle Interaktionen mit einem Stift und ohne Keyboard erfolgen können.

3.2.8 Integrationsfähigkeit

Der modulare Aufbau von GNRT erlaubt es, auch benutzereigene Erweiterungen oder Weiterverarbeitungsprogramme einfach in das Gesamtsystem zu integrieren. Als Beispiele dienen das OS/2-Programm HYMAS der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, und das DOS-Programm SEADAT von HPC, Hamburg. Auch die Vermessungssoftware verm/pro von Schwarz+Partner, Hildesheim, arbeitet in idealer Weise mit GNRT zusammen.

3.2.9 Verwendung von Standardformaten

Um einen maximalen Investitionsschutz zu gewährleisten, muß eine Software heute die wichtigen internationalen Standards unterstützen. Auf dem Gebiet DGPS sind dies heute RTCM-2.0 und RTCM-2.1, im nationalen Bereich auch RTCM-Adv. Für Nachprozessierung und Sicherung der Rohdaten wird das empfängerunabhängige RINEX-Format unterstützt. Zur Kommunikation mit externen Programmen oder Navigationsanlagen dient z.B. das standardisierte NMEA-Protokoll.

3.2.10 Zugriff auf Datenbanken / digitale Karten

Für eine hohe Produktivität kann ein direkter Online-Zugriff auf Datenbanken von entscheidender Bedeutung sein. Zum einen kann eine digitale Karte als Hintergrundbild die Orientierung in der Örtlichkeit wesentlich erleichtern, zum anderen können die zu erfassenden Daten, zu denen neben der eigentlichen Position oft auch wichtige andere Informationen gehören, direkt in die Datenbank übernommen werden. Dadurch wird eine sofortige Kontrolle der erfaßten Daten möglich. GNRT ist in der Lage, über eigene Module oder über externe Programme (z.B. verm/pro) auf entsprechende Datenbanken zuzugreifen. Für den Import und Export von Daten stehen damit Schnittstellen wie GIAP, EDBS u.a. zur Verfügung. CAD-Programme wie GEOgraf, CARD/1, CADDY u.a., sowie Vermessungsprogramme wie MINKA 2000, DAC100, REC500 und Ashtech PRISM werden unterstützt.

3.2.11 On-the-Fly, On-the-Way Mehrdeutigkeitslösung

Für einen flüssigen Messungsablauf vor Ort ist es entscheidend, daß zur Lösung des Mehrdeutigkeitsproblems keine besonderen Initialisierungsphasen erforderlich sind. Gute Echtzeit-PDGPS-Software wie GNRT ist in der Lage, die Mehrdeutigkeiten auch bei bewegter GPS-Antenne zu bestimmen, so daß ein flüssiger Messungsablauf gewährleistet ist.

3.2.12 TTFA (Time to fix Ambiguities)

Eng verknüpft mit dem vorangegangenen Punkt ist die Frage, wie lange die Software braucht, um die richtigen Mehrdeutigkeiten zu finden. Wenn auch eine On-the-Fly Bestimmung möglich ist, so bleibt doch die Genauigkeit während dieser Zeit geringer. Die benötigte Zeit zum Festsetzen der Mehrdeutigkeiten (Time to fix Ambiguities) ist bei Einfrequenzempfängern stark abhängig von der Entfernung zur Referenzstation. Bei Zweifrequenzempfängern, die ohnehin eine wesentlich schnellere Mehrdeutigkeitslösung erlauben, ist die Entfernungsabhängigkeit viel weniger stark ausgeprägt (siehe Abb. 2). Darüber hinaus bietet GNRT-K die Möglichkeit der Initialisierung über einem bekannten Punkt, was die Mehrdeutigkeitsbestimmung nochmals deutlich beschleunigen kann.

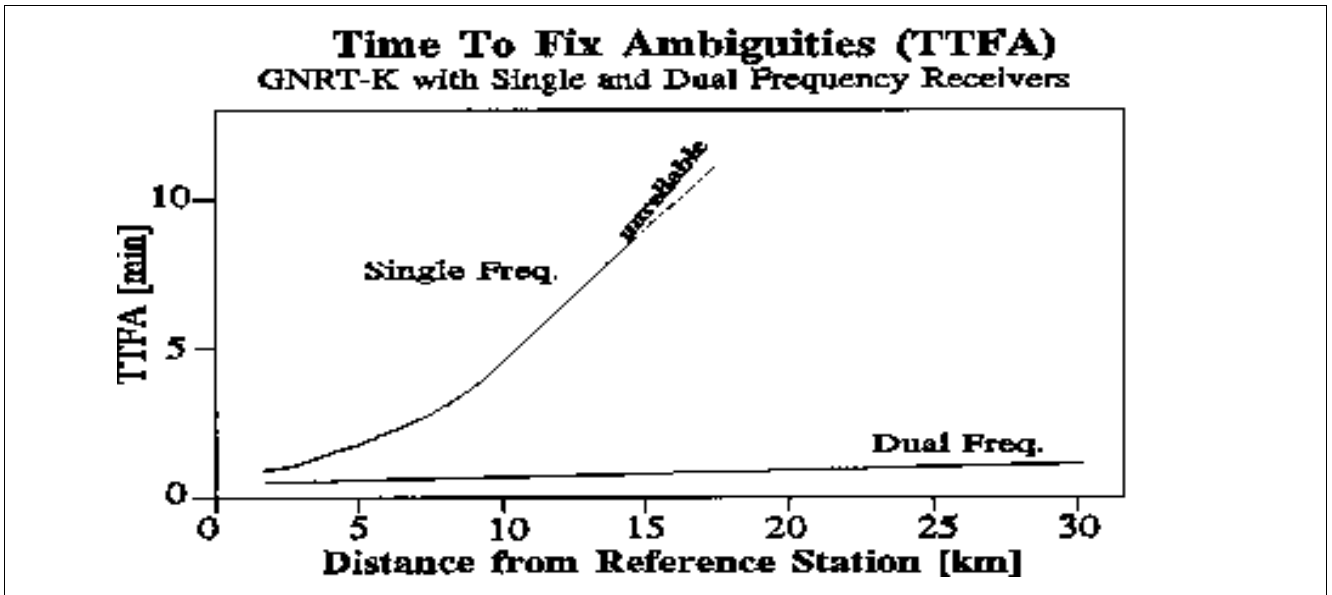


Abb. 2: Zeit bis zur Festsetzung der Mehrdeutigkeiten, für Ein- und Zweifrequenzempfänger. Zweifrequenzempfänger sind wesentlich schneller und sicherer.

3.2.13 Korrektursignalunterbrechungen

GNRT ist in der Lage, auch ohne permanente Versorgung mit Korrektursignalen zu operieren, wenn z.B. für den Weg zwischen zwei zu bestimmenden Punkten höchste Genauigkeit nicht erforderlich ist. Dies ist insbesondere von Vorteil bei der Kommunikation über gebührenpflichtige Kanäle (z.B. Mobiltelefon), weil ab gewissen Punktabständen eine kurze Kontaktaufnahme mit der Referenzstation kostengünstiger sein kann als eine permanente Verbindung.

3.2.14 Genauigkeit

Jeder gewünschte Genauigkeitsbereich von einem Meter bis zu besser als einem Zentimeter kann von GNRT abgedeckt werden. Eine Genauigkeit von etwa einem Meter kann mit den Standard-RTCM-2.0 Korrekturdaten erreicht werden. Für Submetergenauigkeit reicht RTCM-2.0 nicht mehr aus. Mit GNRT und RTCM++ kann aber durchaus auch mit Codebeobachtungen eine Genauigkeit von einem halben Meter erreicht werden. Für Genauigkeiten von wenigen Dezimetern bis zu einem Zentimeter oder besser ist das Trägerphasenmodul GNRT-K erforderlich. Generell besteht eine Abhängigkeit der Genauigkeit von der Entfernung zur Referenzstation, bei Einfrequenzempfängern wesentlich ausgeprägter als bei Zweifrequenzgeräten. Mit der Etablierung von GNREF-Referenzstationsnetzen wird die Entfernungsabhängigkeit, auch für Einfrequenzgeräte, für mit RTCM++-Modulen ausgestattete Mobilstationen deutlich reduziert werden können (Abb. 3).

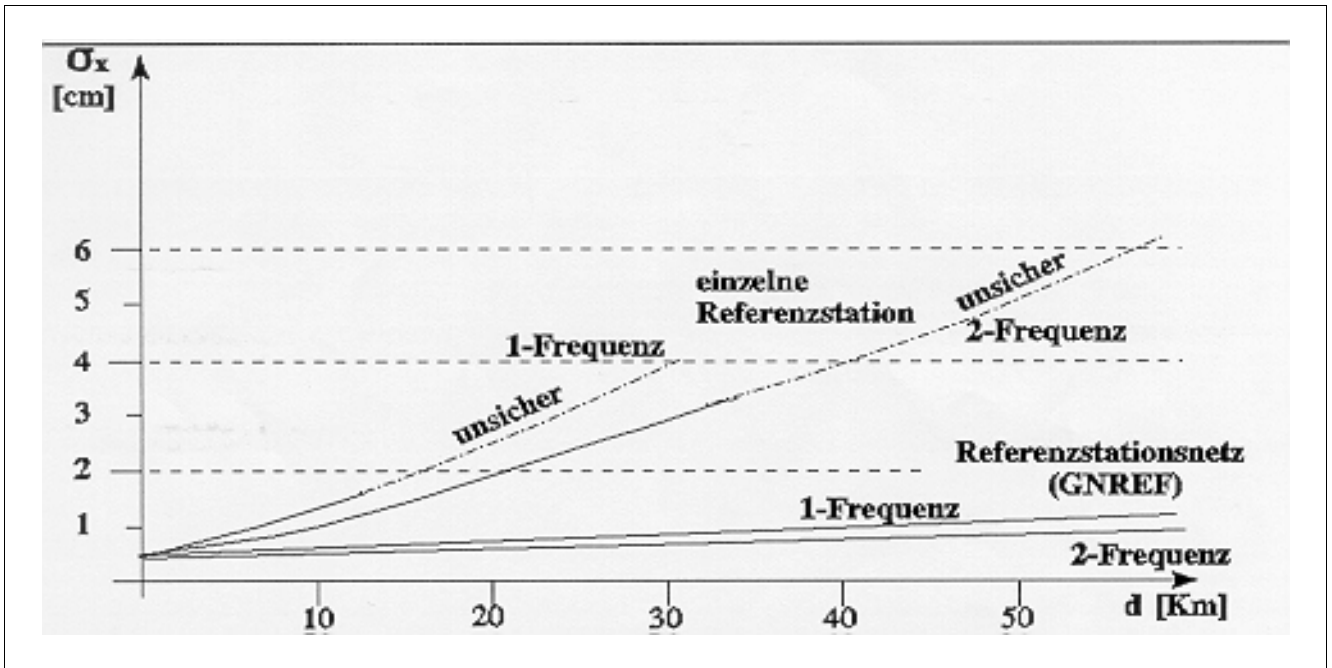


Abb. 3: Entfernungsabhängigkeit der PDGPS-Genauigkeit, unterschieden nach Empfängertyp sowie für eine einzelne Referenzstation bzw. für ein GNREF-Referenzstationsnetz.

3.2.15 Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit eines PDGPS-Ergebnisses hängt im wesentlichen von zwei Faktoren ab: zum einen von der Zuverlässigkeit der Korrekturdaten, und zum anderen von der Zuverlässigkeit der eigenen Beobachtungen. Stützt man sich auf die Korrektursignale der AdV, so ist die Zuverlässigkeit der Korrekturdaten weitestgehend gewährleistet. Die Zuverlässigkeit der eigenen Beobachtungen kann nur durch wiederholte unabhängige Besetzungen erhöht werden. Das GNRT-System selbst optimiert die Zuverlässigkeit, indem es durch geeignete Strategien und Tests z.B. innerhalb von GNRT-K die Wahrscheinlichkeit für falsche Mehrdeutigkeitsfestsetzungen möglichst gering hält.

3.2.16 lokale Koordinaten, Nachbarschaft, Netzspannungen

Die Benutzbarkeit der Echtzeit-Ergebnisse ist daran gebunden, daß die erzeugten Koordinaten im gewünschten Bezugssystem zur Verfügung stehen. Dies ist durch Transformationsprogramme mit bekannten Parametern relativ leicht zu realisieren. Das Prinzip der Nachbarschaft muß auch bei GPS-bestimmten Punkten gewahrt bleiben. Solange kein homogenes Bezugssystem, z.B. auf DREF aufbauend, realisiert ist, kommt bei Landeskoordinaten das Problem der Netzspannungen erschwerend hinzu. GNRT bietet hier den Vorteil, daß es aufgrund seiner engen Kontakte zum deutschen Markt die notwendigen, auch kleinräumigen Transformationsprobleme schnell und effizient zu lösen imstande ist.

3.2.17 freie Stationierung einer Referenzstation

Falls kurzfristig eine eigene lokale Referenzstation errichtet werden muß, ist GNRT in der Lage, diese frei zu stationieren, d.h. der Zwang zum Aufbau über einem bekannten Punkt entfällt. Statt dessen wird zu Beginn der Messung mit der Mobilstation einmal kurz ein bekannter Punkt aufgesucht und von dort aus fernbedient die Absolutposition zur lokalen Referenzstation übertragen. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt im wesentlichen darin, daß für die Referenzstation ein optimaler, abschattungsfreier Standort gewählt werden kann.

3.3 Konfigurationsmöglichkeiten von GNRT

Ein modulares DGPS-Echtzeitsystem wie GNRT läßt sich je nach individueller Anwendung unterschiedlich konfigurieren.

Im Normalfall wird GNRT als Mobilstation konfiguriert. Hier empfängt GNRT die Korrektursignale, bringt sie an die eigenen Beobachtungen an und berechnet daraus die eigene Position.

Bei einer Konfiguration als Referenz- oder Basisstation werden aus bekannter Satelliten- und Empfängerposition und beobachteten Pseudoentfernungen die gesuchten Korrekturwerte berechnet und über einen oder mehrere gewünschte Übertragungskanäle abgegeben. (Zum Betrieb als permanente Referenzstation mit Vernetzungsoption sollte auf GNREF zurückgegriffen werden.)

GNRT läßt sich auch als sogenanntes reverses oder inverses DGPS-Echtzeit-System einsetzen, wenn die Position der Mobilstation nur auf der Basisstation benötigt wird. Hierbei werden auf der Mobilstation nur die eigentlichen GPS-Beobachtungen gewonnen und direkt zur Basisstation gesendet. Eine ausreichende Bandbreite auf dem Übertragungskanal muß gewährleistet sein. Auf der Basisstation laufen dann die beiden Prozesse GNRT-Basis und GNRT-Mobil parallel ab, d.h. die Korrekturdaten verlassen den Rechner nicht, sondern werden direkt von einem Prozeß an den anderen übermittelt. Bei hohen Genauigkeitsanforderungen und ausreichender Bandbreite des Übertragungskanals kann mittels Zuschaltung einer Trägerphasenauswertung mit GNRT-K auch hier die Zentimetergenauigkeit erreicht werden.

Beim relativen DGPS kommt es nur auf die relative Positionsbestimmung zweier bewegter Objekte zueinander an. Als Beispiel mag der Landeanflug eines Helikopters auf ein Schiffsdeck dienen. Eine Masterstation (hier das Schiff) ermittelt DGPS-Korrekturwerte und sendet sie zur Slavestation (dem Helikopter), wo die Position relativ zum bewegten Deck mit DGPS-Genauigkeit berechnet wird. Mit Trägerphasen und GNRT-K kann hier ebenfalls eine Genauigkeit von wenigen Zentimetern erreicht werden.

Eine wichtige Rolle spielen in der Zukunft sicherlich die DGPS-Dienste z.B. der AdV, die flächendeckend Referenzstationen betreiben und Korrektursignale versenden. Durch die Vernetzung der Stationen untereinander (Abb. 4) wird die Qualität der Korrektursignale hinsichtlich homogener Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit wesentlich verbessert, was auch die Einsatzmöglichkeiten eines PDGPS-Systems erweitert.

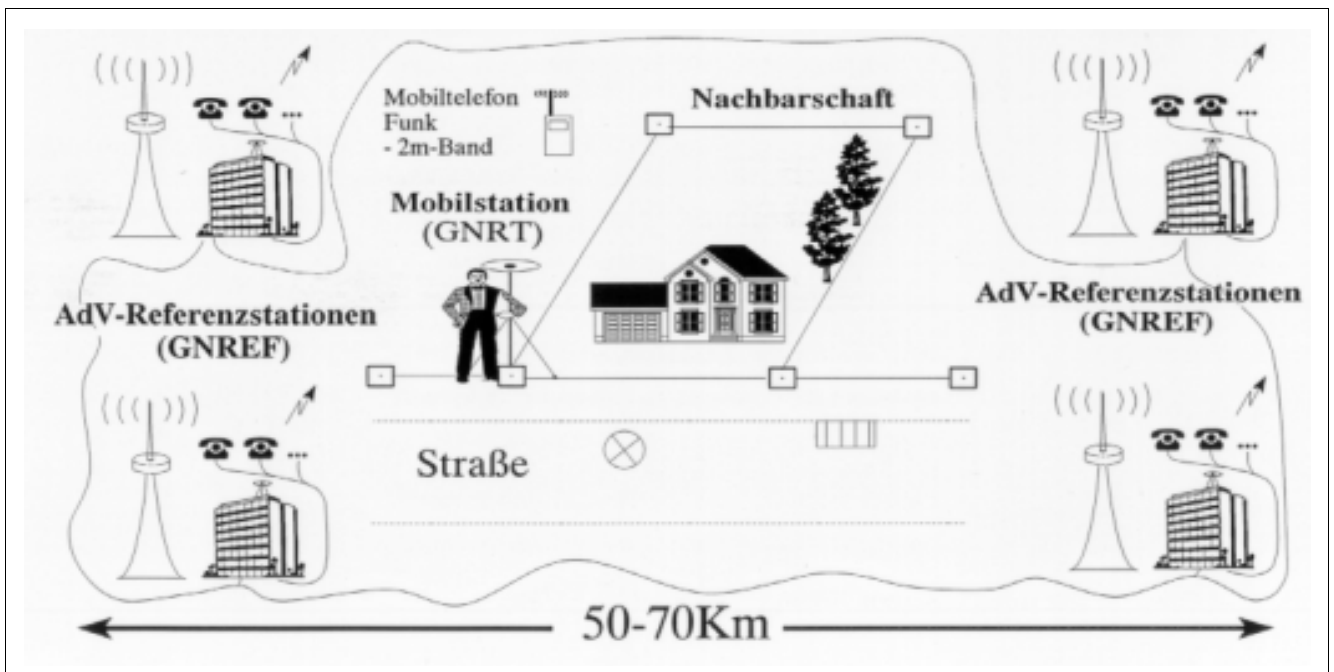


Abb. 4: GNRT im Einsatz in einem DGPS-Referenzstationsnetz

4. Anwendungsbeispiele

Ein PDGPS-Echtzeit-Vermessungssystem läßt sich überall dort gewinnbringend einsetzen, wo genaue oder hochgenaue Koordinaten in Echtzeit zur Verfügung stehen müssen. Eine ausreichende Horizontfreiheit ist wie bei allen GPS-gestützten Verfahren natürlich Bedingung. Systeme mit On-the-Way Mehrdeutigkeitsbestimmung wie GNRT-K können auch mit größeren oder ungünstigen Abschattungen fertig werden, solange mindestens vier Satelliten ständig empfangen werden können.

Ein großer Anwendungsbereich liegt in der Zukunft bei GIS-Anwendungen, z.B. in der Leitungsvermessung, wo Versorgungseinrichtungen wie Gas-, Wasser- oder Stromleitungen eingemessen oder in der Örtlichkeit wiedergefunden werden müssen. Die erforderliche Genauigkeit liegt meist im Dezimeterbereich. Dies macht die Verwendung von Trägerphasenmessungen mit GNRT-K erforderlich.

Auch in der Kanalvermessung liegt eine Einsatzmöglichkeit für ein PDGPS-System. Hier liegen die Anforderungen an die Lagegenauigkeit im Dezimeterbereich, die geforderte Höhengenaugigkeit liegt aber, insbesondere wenn auch die Kanalsohle bestimmt werden soll, bei wenigen Zentimetern. Auch diese Anforderungen lassen sich mit GNRT-K erfüllen. Mit einem GPS-Kanalmeßstab und geeigneter Software können sogar die Sohlenhöhen direkt und in Echtzeit bestimmt werden.

Viele Bereiche der klassischen Vermessung, wie z.B. Absteckung und Aufnahme im Katasterbereich, lassen sich technisch sehr elegant mit PDGPS lösen. Aufwendige Anschlußmessungen sind durch das Konzept des "aktiven Festpunktfeldes" nicht mehr nötig. Insbesondere in Kombination mit modernen Tachymetern, wie sie z.B. mit dem Grafischen GPS-Tachymeter GART-12 möglich wird, lassen sich die Vorteile von GPS und Tachymetrie sehr effektiv vereinen.

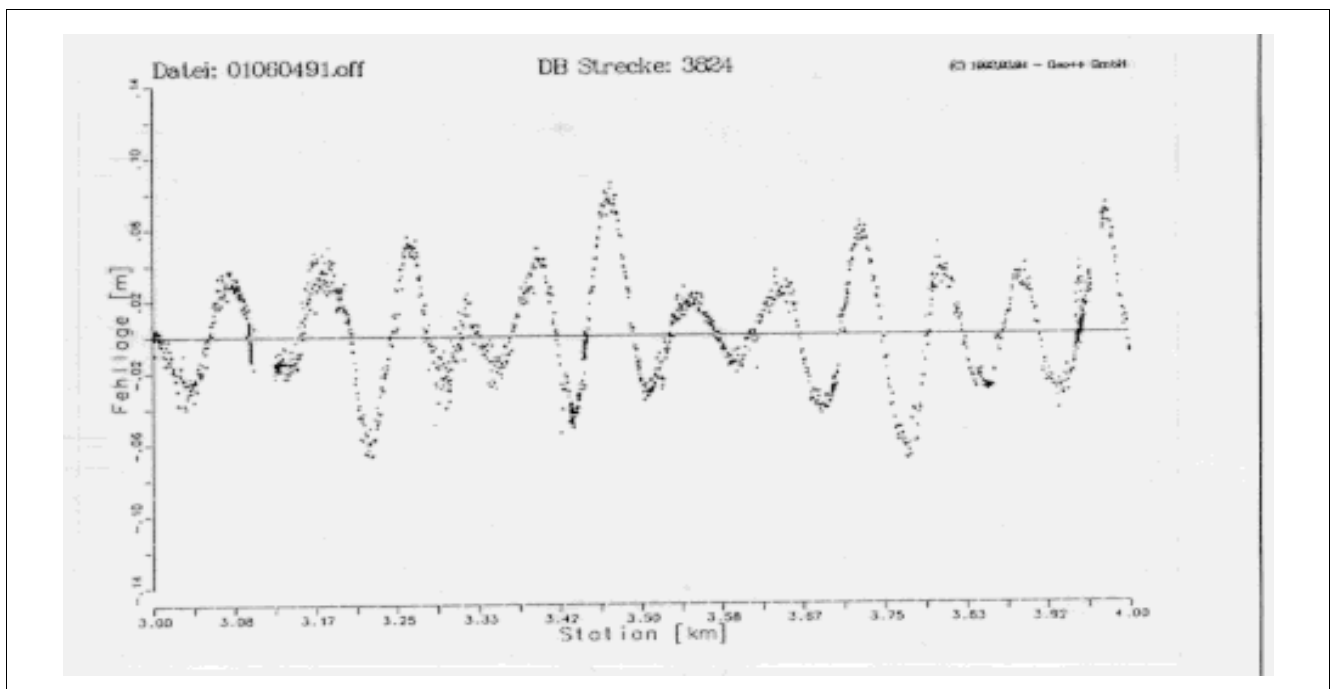


Abb. 5: Fehlloge aus einer Gleisvermessung. Die gute Übereinstimmung der beiden Kurven für Hin- und Rückweg belegt die PDGPS-Genauigkeit von wenigen Millimetern.

Wichtige Aufgaben der Ingenieurvermessung lassen sich mit PDGPS-Verfahren künftig geschickter lösen, ob es sich dabei um die Aufmessung von Straßenbauwerken, Brücken oder anderen Anlagen handelt. Ein Beispiel aus der Gleisvermessung mag dies verdeutlichen. Zur Bestimmung der Ist-Gleislage wird ein GPS-Empfänger zusammen mit einem Inclinometer und einem Spurweitenmesser auf einem speziellen Wagen montiert und über das Gleis bewegt. Damit stehen in Echtzeit die absolute Lage und die Längs- und Querneigung des Gleiskörpers zur Verfügung. Die erreichbare Genauigkeit lag bei bisherigen Einsätzen bei ± 5 mm und besser in der Lage (Abb. 5), bzw. weniger als ± 10 mm in der Höhe, wobei die Referenzstation in maximal 2 km Entfernung lag.

Ein weiteres Beispiel ist die Deichvermessung zur Überprüfung der Höhe der Deichkrone. Diese bisher durch aufwendiges Nivellement nur punktweise zu erfassenden Daten können mit einem auf ei-

nem kleinen Rollwagen montierten PDGPS-System in fast beliebiger Punktdichte einfach und kostengünstig ermittelt werden. Je nach Bodenbeschaffenheit können 2 bis 4 Kilometer Deichlinie pro Stunde gemessen werden, wobei ein einziger Mann zur Bedienung des Systems ausreicht. Die erreichte Genauigkeit lag bei ersten Tests auf Grasnarbe bei ± 2 cm in der Höhe (Abb. 6).

Interessante Aufgabengebiete liegen auch in anderen Bereichen der Ingenieurvermessung, z.B. für permanente und automatische Überwachungsmessungen von Staudämmen oder Brücken mit Millimetergenauigkeit.

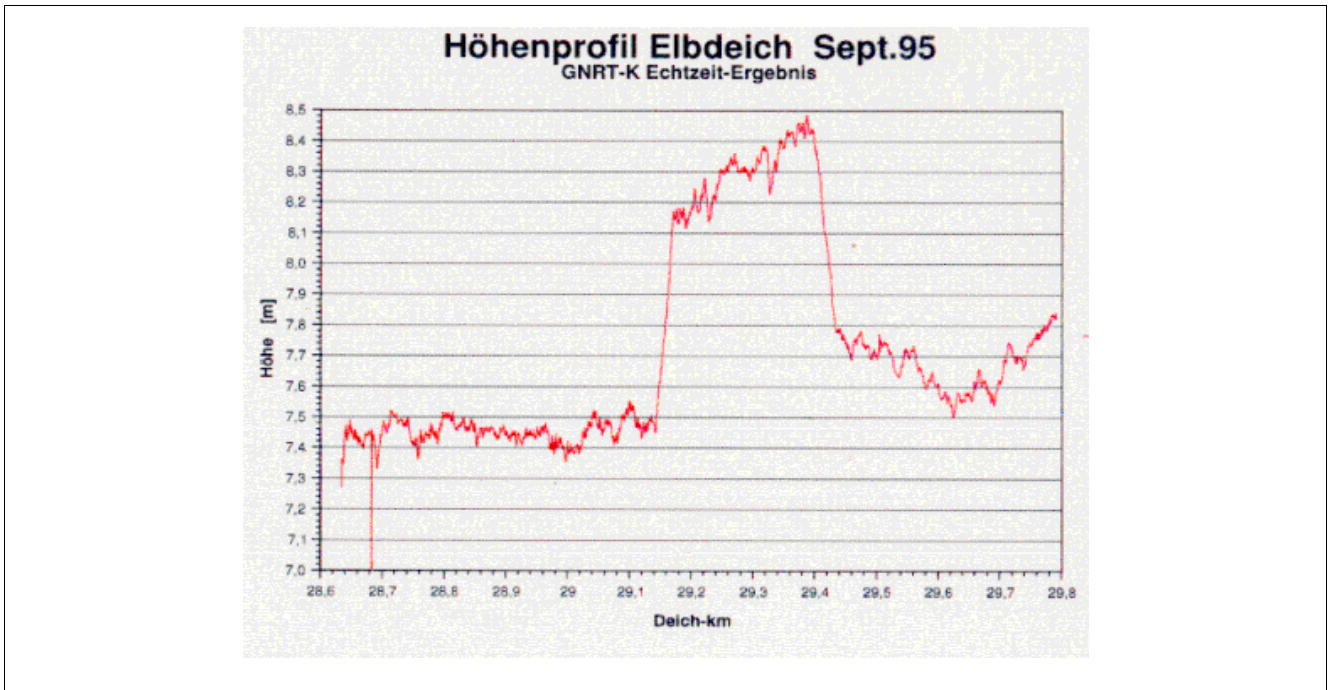


Abb. 6: Deichvermessung mit GNRT-K. Deutlich ist neben einer Erhöhung bei Deich-km 29.3 auch die Feinstruktur der Deichlinie zu erkennen.

In der Zukunft werden sich die Einsatzmöglichkeiten rasch noch weiter ausdehnen, wenn durch die Verfügbarkeit von Referenzstationsnetzen zum einen die Verwendung von Einfrequenzempfängern leichter wird und zum anderen die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Korrektursignale steigt.

5. Rentabilitätsabschätzung

Bei allen Vorteilen, die das PDGPS-Meßverfahren bietet, ist die Rentabilität eines solchen Systems natürlich abhängig von verschiedenen Kosten.

Die notwendigen Investitionen für ein PDGPS-System bestehen in erster Linie aus der zu beschaffenden Hard- und Software, also einem GPS-Empfänger, einem feldtauglichen Rechner (z.B. Pentop), einer Kommunikationseinrichtung (z.B. Funkgerät), der notwendigen Zusatzausrüstung wie Tragevorrichtung, Stromversorgung etc. und z.B. GNRT als Softwarepaket. Je nach gewünschter Genauigkeit (Ein- oder Zweifrequenzempfänger) und ob eine eigene Referenzstation erforderlich ist, muß mit Kosten in Höhe von ca. 40.000,- DM bis 120.000,- DM gerechnet werden. Die Schulungskosten für den Bediener sollten dank anwenderfreundlicher Benutzeroberfläche minimal ausfallen.

An laufenden Kosten fallen im günstigsten Fall Personalkosten für ein Ein-Mann-System an. Bei einer Funkübertragung entfallen in der Regel die Betriebskosten. Im Falle von Mobiltelefon-Verbindungen (z.B. D-Netz) muß mit ca. 30-40 DM pro Stunde Online-Zeit gerechnet werden, wobei für typische Anwendungen von 2 bis 4 Stunden Online-Zeit pro Arbeitstag ausgegangen werden kann, wenn die Online-Zeit möglichst kurz (wenige Sekunden/Minuten pro Standpunkt) gehalten werden kann.

Weiterhin muß langfristig mit Gebühren an die Serviceanbieter der DGPS-Dienste, z.B. der AdV, gerechnet werden, deren Höhe aber noch unbekannt ist. Denkbar wäre eine Jahresgebühr von einigen

tausend D-Mark, die auf jeden Fall weit unter den Betriebskosten einer eigenen Referenzstation liegen sollte.

Für die Produktivität vor Ort sind kurze Initialisierungszeiten, möglichst unter 2 Minuten, im Idealfall als On-The-Fly-Lösung, erforderlich. Ein weiterer Kostenvorteil ergibt sich, weil kein aufwendiges häusliches Postprocessing erforderlich ist. Durch die Bereitstellung der Ergebnisse in Echtzeit sind in der Regel keine oder nur geringe häusliche Nachbearbeitungen nötig.

Seinen vollen Nutzen kann ein GPS-Meßverfahren naturgemäß nur ausspielen, wenn ausreichende Sichtbarkeit zu den Satelliten gewährleistet ist. Dies vorausgesetzt, steht mit dem beschriebenen PDGPS-Verfahren ein leistungsfähiges Meßverfahren für Aufnahme und Absteckung zur Verfügung, das die notwendigen Vor- und Nachbereitungszeiten und die Meßzeit vor Ort erheblich verkürzen kann.