

# **GPS-bezogene Ortungssysteme**

von

**Gerhard Wübbena und Andreas Bagge**

Geo++ Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und navigatorische  
Technologien mbH  
Osteriede 8-10, 30827 Garbsen, Tel. (05131) 4689-0

Beitrag zum

**37. DVW-Seminar**

**Hydrographische Vermesungen - heute**

vom 28.3. bis 29.3.1995 in Hannover

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	GPS-Positionsbestimmung.....	2
2.1	Differential GPS (DGPS).....	2
2.2	Real-Time Auswertung.....	4
2.3	Phasenmessungen für präzise Anwendungen.....	5
3	Begriffsbestimmungen.....	6
3.1	DGPS-Begriffe.....	6
3.2	Genauigkeitsbegriffe.....	9
4	Referenzstationen, Referenzdaten, Korrekturdaten und -formate.....	10
4.1	Positionskorrekturen.....	10
4.2	Entfernungskorrekturen.....	11
4.3	Fehlerspezifische Korrekturparameter.....	12
4.4	Datenübertragungskanäle.....	12
4.5	Aufdatierungsraten.....	12
4.6	DGPS-Dienste.....	13
5	Positions- und Zeitzuordnung.....	14
5.1	Räumliche Zuordnung.....	14
5.2	Zeitliche Zuordnung.....	15
5.3	Bezugssysteme.....	17
6	Systemkomponenten und Beurteilungskriterien GPS-bezogene Ortungssysteme.....	17
6.1	Referenzstation für RTDGPS / RTPDGPS.....	18
6.2	Mobilstation.....	19
6.3	Beurteilungskriterien.....	20
7	Ausblick.....	21

# 1 Einleitung

Das GPS ist nach seinem vollständigen Ausbau ein nicht mehr verzichtbares Ortungs- und Navigationssystem für alle Anwendungen in der Hydrographie. Eine Vielzahl von Systemen ist verfügbar und operationell im Einsatz.

Mit steigender Verfügbarkeit, Genauigkeit und Zuverlässigkeit der GPS-Technik werden neue Anwendungen und Einsatzmöglichkeiten erschlossen.

Die Anforderungen an die GPS-Systeme wachsen wiederum mit höheren Nutzeranforderungen. Neben Genauigkeit, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit stehen hier insbesondere Fragen der Integrationsfähigkeit in andere Systeme im Vordergrund.

Zur Ortung gehört im wesentlichen die Bestimmung der Position des eigenen Fahrzeuges bzw. eines anderen Objektes (herkömmlich z.B. durch Radarpeilung). Neben der Position ist insbesondere bei Integration mit anderen Daten (z.B. Lotungsmessungen) die korrekte und eindeutige Zeitzuordnung erforderlich. Im weiteren Sinne können zur Ortung auch die Bestimmung von Kurs und Geschwindigkeit gezählt werden.

GPS ist in der Lage, alle erforderlichen Informationen hochgenau in wohldefinierten Bezugssystemen zu liefern.

Der neue GPS-Anwender wird mit einer Vielzahl von Begriffen konfrontiert, die sehr uneinheitlich verwendet werden. Eine korrekte Beurteilung der Systeme ist nur bei Kenntnis der wesentlichen Fachbegriffe möglich.

Dieser Beitrag soll einen Überblick über die Möglichkeiten und Leistungsfähigkeit der GPS-Ortung geben, die unterschiedlichen DGPS-Techniken erläutern sowie die Besonderheiten für hydrographische Anwendungen aufzeigen.

## 2 GPS-Positionsbestimmung

### 2.1 Differential GPS (DGPS)

Das Prinzip der GPS-Positionsbestimmung ist hinreichend bekannt und soll an dieser Stelle nicht näher betrachtet werden. Für Anwendungen in der Hydrographie ist mit den damit verbundenen Genauigkeitsanforderungen der Einsatz von "Differential GPS" - DGPS - erforderlich.

Der Begriff DGPS wird nicht einheitlich verwendet, so daß an dieser Stelle eine kurze Definition sowie die Einführung weiterer, häufig verwendeter Begriffe erfolgen soll.

Im Bereich der Anwendung des GPS für hochgenaue Vermessungen wird seit langer Zeit von absoluter und relativer Positionsbestimmung gesprochen. Unter absoluter Positionsbestimmung wird dabei die Ermittlung der absoluten Koordinaten (im Bezugssystem WGS84) eines einzelnen (autonomen) GPS-Empfängers verstanden, in die nur die Meßinformation dieses Empfängers einfließt.

**Abb. 1:** absolute Positionsbestimmung mit GPS über 2 Stunden, Gitterabstand 10 m. Die durch SA hervorgerufenen periodischen Anteile lassen die Position innerhalb weniger Minuten um bis zu 100m streuen.

Der Fehlerhaushalt des GPS läßt bei aktivierter SA (Selective Availability, eine Maßnahme des Systembetreibers zur Begrenzung der GPS-Genauigkeit) eine solche absolute Positionsbestimmung nur mit einer Lagegenauigkeit in der Größenordnung von ca. 100 m (2 Sigma) zu (Abbildung 1). Wäre SA nicht eingeschaltet, so würden Genauigkeiten in der Größenordnung von ca. 10..20 m erreichbar sein.

Zur Erreichung höherer Genauigkeiten ist man auf Relativverfahren angewiesen. Aufgrund der großen Bahnhöhe der GPS Satelliten wirken die wesentlichen Fehleranteile aus Satellitenbahnen und -uhren (einschließlich der SA-Effekte) sowie aus der Atmosphäre an räumlich benachbarten Orten auf der Erdoberfläche hochkorreliert, so daß sie bei Bildung der Differenz zwischen zwei Stationen weitgehend eliminiert werden. Man spricht deshalb auch von *differentiellem* oder *Differential GPS* (DGPS).

Das Ergebnis einer solchen *relativen* Positionsbestimmung sind die Koordinatendifferenzen zwischen den beteiligten Stationen. Sind die absoluten Koordinaten einer der beiden Stationen, der Referenzstation, bekannt, was zumindest näherungsweise für das Verfahren erforderlich ist, so werden durch Addition der Positionsdifferenzen zu diesen Koordinaten ebenfalls absolute Koordinaten für den mobilen Empfänger als Ergebnis erhalten. Die mit diesem Verfahren erreichbare Genauigkeit der relativen Koordinaten liegt etwa bei 0,5 bis 20 Metern (Abb. 2). dargestellt ist ein Vergleich zwischen einem DGPS-System ( Navstar XR5M mit GNRT-Software) und einem Laser-Tracking-System (Navitrack). Die absolute Positionsbestimmung mit DGPS stimmt innerhalb 0,5 m mit Navitrack überein, die Nachbarschaftsgenauigkeit ist sogar noch besser.

**Abb. 2:** Erreichbare Genauigkeit mit DGPS (Navstar XR5M und GNRT). Man beachte den unterschiedlichen Maßstab in beiden Koordinatenrichtungen. (Andree 1995)

Bei allen Abschätzungen zur Genauigkeit muß beim DGPS ein entfernungsabhängiger Fehleranteil berücksichtigt werden, der für die hier betrachteten GPS-bezogenen Ortungsverfahren etwa in der Größenordnung von 1...10 ppm (mm pro km) liegt. Bei größeren Entfernungen kann es deshalb oft sinnvoll sein, ein Netz von Referenzstationen aufzubauen und die Mobilstation jeweils an eine oder mehrere nächstgelegene Referenzstationen anzuschließen.

Die Auswertung solcher Meßdaten kann grundsätzlich auf zwei verschiedenen Wegen erfolgen. Die erste Möglichkeit besteht in der gemeinsamen Auswertung der Messungen beider GPS-Empfänger, die zweite Möglichkeit besteht in der Ableitung von Korrekturdaten aus den Meßgrößen des Referenzempfängers. Theoretisch führen beide Ansätze zu identischen Ergebnissen, jedoch unterscheiden sie sich algorithmisch u.U. erheblich.

Während für hochgenaue Vermessungsanwendungen in der Vergangenheit praktisch nur der erste Ansatz zum Einsatz kam, wurde im Bereich der Navigation, bei geringeren Genauigkeitsanforderungen, meist der zweite Ansatz gewählt.

Im Bereich der Vermessungsanwendungen wurden die o.g. Begriffe der *absoluten* und *relativen* Positionsbestimmung sowie nach Meßanordnung Bezeichnungen wie *statische*, *kinematische*, *pseudokinematische* und *"Stop-and-Go"-kinematische* Punktbestimmung gewählt.

Bei Navigationsanwendungen wurde die relative Positionsbestimmung hingegen schon immer als DGPS bezeichnet.

## 2.2 Real-Time Auswertung

Neben dem Unterschied im Auswerteansatz ist ein wesentlicher weiterer Unterschied in der zeitlichen Verfügbarkeit der Positionsergebnisse zu sehen. Hochgenaue Vermes-

sungsanwendungen wurden und werden vorwiegend im sog. "Postprocessing" verarbeitet, während im Bereich der Navigation die Verfügbarkeit der Ergebnisse in Echtzeit erforderlich ist.

## 2.3 Phasenmessungen für präzise Anwendungen

Für hochgenaue Positionsbestimmung muß die Trägerphasenmessung herangezogen werden. Im Gegensatz zu den Codemessungen können die Trägerphasen mit einer Genauigkeit von Millimetern gemessen werden (siehe nächste Abbildung 3). Das Hauptproblem bei der Verwendung der Trägerphasen besteht in der Lösung der Mehrdeutigkeiten dieser Messungen. Für Real-Time Anwendungen ist dazu modernste Software erforderlich. Mit diesem Verfahren sind Positionsgenauigkeiten bis in den Millimeterbereich möglich.

**Abb. 3:** Erreichbare Genauigkeit mit PDGPS. Dargestellt ist die Fehllage aus einer Gleisvermessung im Hin- und Rückweg. Die gute Übereinstimmung beider Kurven belegt die PDGPS-Wiederholgenauigkeit im Bereich von wenigen Millimetern.

Für Anwendungen im Vermessungswesen unterscheidet man die Art der Punktbesetzung, die sich im wesentlichen an den Möglichkeiten der Mehrdeutigkeitsbestimmung orientiert: Statik, Pseudokinematik (oder "Reoccupation"), Stop and Go Kinematik, Real-Time Kinematik, Kinematik.

Zur Erläuterung dieser Begriffe sei auf andere Quellen verwiesen (z.B. Wübbena 1992).

Beim Einsatz des GPS als Ortungsverfahren muß die Bestimmung der Mehrdeutigkeiten i.d.R. während der Messung und/oder im bewegten Modus durchgeführt werden. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von "*On the Way-*" oder "*On the Fly-*" Lösungen.

Die rasante Entwicklung im Bereich der hochgenauen kinematischen GPS-Anwendungen und ihre Realisierung in Echtzeit führten in letzter Zeit zu einer Begriffsverschmelzung. So wird z.B. der Begriff DGPS neuerdings auch für Vermessungsanwendungen verwendet,

während andererseits Begriffe wie kinematisches GPS auch im Navigationsbereich zu finden sind.

### 3 Begriffsbestimmungen

#### 3.1 DGPS-Begriffe

Die folgende Übersicht (Tabelle 1) stellt die im Zusammenhang mit DGPS verwendeten Bezeichnungen und Abkürzungen zusammen.

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

<b>Kürzel</b>	<b>Bezeichnung und Erläuterungen</b>
<b>WA</b>	<p><b>Wide Area</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Netz</u> von Referenzstationen, um ein größeres Gebiet mit Referenz signalen zu versorgen</li> <li>• im Gegensatz zu einer einzelnen Referenzstation</li> <li>• nur sinnvoll im Zusammenhang mit Differential</li> <li>• bisweilen Unterscheidung in Local Area (LA) und Wide Area (WA)</li> </ul>
<b>GNSS</b>	<p><b>Global Navigation Satellite System</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Oberbegriff</u> für einsetzbare Satellitennavigationssysteme, z.B. GPS, Glonass u.a.</li> </ul>

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

Aus den oben genannten Bezeichnungen ergeben sich vielfältige Kombinationsmöglichkeiten, die aber nur in bestimmten Kombinationen eine sinnvolle Anwendung ermöglichen. Aus historischen Gründen haben sich in Navigation und Vermessung unterschiedliche Bezeichnungen eingebürgert, wobei die für das jeweilige Fachgebiet selbstverständlichen Kennzeichnungen oft nicht explizit genannt, sondern implizit unterstellt werden. Die in letzter Zeit häufig genannten Bezeichnungen sind in der folgenden Übersicht aufgeführt:

<i>RT</i>	<i>K</i>	<i>S</i>	<i>I</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>D</i>	<i>GPS</i>	<i>Bezeichnung, Beispiel</i>
(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	GPS	<b>GPS</b> allgemein alle Anwendungen aus Navigation und Vermessung
						D	GPS	<b>Differential GPS</b> Anwendungen mit Genauigkeit <20m
*	*				R	D	GPS	<b>Relative Differential GPS</b> z.B. Landeanflug auf Flugzeugträger
	*	*		P	R	D	GPS	<b>Precise Relative Differential GPS</b> z.B. Lagebestimmung ("Orientierung") eines Schiffes
	(*)	*	I	(*)	(*)	D	GPS	<b>Inverse Differential GPS</b> z.B. Positionierung von Treibkörpern (Bojen)
		*		P		D	GPS	<b>Precise Differential GPS</b> Standardverfahren der Vermessung
RT	(*)	(*)		*		D	GPS	<b>Real-Time Differential GPS</b> z.B. Absteckung mit GPS
RT	K			*		*	*	<b>Real-Time Kinematic</b> in Vermessung benutzter Name, meint eigentlich RT-PDGPS
* = implizit unterstellt (*) = je nach Anwendung implizit unterstellt								

**Tabelle 2:** Gebräuchliche Begriffe für DGPS-Beobachtungsverfahren

Drei der wichtigsten Beobachtungsverfahren sind auf den folgenden Abbildungen (Abb. 4-6) exemplarisch dargestellt. Diese und viele weitere Anwendungen lassen sich z.B. mit dem Softwarepaket GNREF/GNRT (bzw. GNRT-K für Precise Differential GPS) realisieren.



**Abb. 4:** Differential GPS mit GNREF auf einer permanenten Referenzstation, die beispielsweise von einer Landesvermessungsbehörde betrieben wird, und GNRT bzw. GNRTK auf der Mobilstation. Die Position einer Mobilstation wird relativ zu einer (auf der Mobilstation) Referenzstation bestimmt.

**Abb. 5:** Reverse (oder Inverse) Differential GPS. Eine Masterstation sammelt die Meßinformation der Mobilstation und berechnet selbst die Position der Mobilstation.

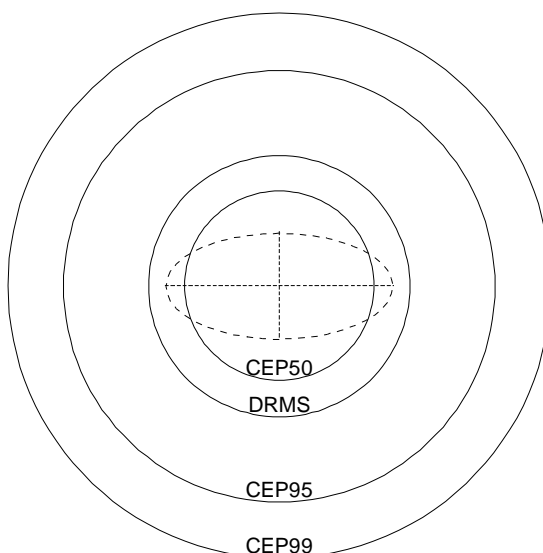
### 3.2 Genauigkeitsbegriffe

Bei der Beurteilung von GPS- und DGPS-Systemen werden zur Angabe der Genauigkeit sehr unterschiedliche Maße verwendet. Dabei ist zu beachten, ob eine 1-D, 2-D oder 3-D-Genauigkeit angegeben wird, und welchen Konfidenzbereich die Angabe umfaßt. Für einen 68% Konfidenzbereich des Lagefehlers läßt sich bei sonst gleichen Voraussetzungen eine viel bessere Genauigkeit angeben als für den 95%-Konfidenzbereich des (3-D) Punktfehlers.

Die häufig genannten Bezeichnungen sind in der folgenden Übersicht zusammengestellt.

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

**Tabelle 3:** Im Zusammenhang mit GPS verwendete Genauigkeitsmaße (Seeber 1993)



**Abb. 7:** Darstellung der gebräuchlichen Fehlermaße für die Lagegenauigkeit bei sonst gleichen Voraussetzungen

## 4 Referenzstationen, Referenzdaten, Korrekturdaten und -formate

### 4.1 Positionskorrekturen

Die einfachste Möglichkeit, um die Position einer mobilen Station zu korrigieren, besteht darin, auf der Referenzstation die aus den Meßgrößen bestimmte Position mit den bekannten Koordinaten zu vergleichen und die ggf. geglätteten Differenzen als Korrekturwerte an die Mobilstation zu übertragen.

Um empfängerabhängige systematische Einflüsse zu vermeiden, sind auf beiden Stationen gleiche Empfänger erforderlich.

Leider ist die berechnete Position sehr stark abhängig von der Satellitenkonstellation, so daß dieses Verfahren nur zufriedenstellend arbeiten kann, wenn auf beiden Stationen exakt dieselbe Satellitenkonstellation beobachtet wird.

Außerdem sind die Algorithmen zur Positionsberechnung (Kalman-Filter) auf Referenz- und Mobilstation vom gesamten Zustandsvektor beeinflusst, so daß eine Übernahme nur der Positionskorrekturen oft nicht ausreicht.

Sinnvoll ist die Anbringung von Positionskorrekturen allenfalls bei "Inverse Differential GPS"-Anwendungen, wo die Auswahl der Satelliten auf der Referenzstation auf die Verhältnisse an der Mobilstation abgestimmt werden kann.

Für allgemeine DGPS-Anwendungen ist dieses Verfahren in der Praxis nicht einsetzbar.

### 4.2 Entfernungskorrekturen

Ein zwar aufwendigeres, dafür aber universelleres Verfahren besteht darin, mit Hilfe der bekannten Referenzposition Korrekturen für die Pseudorange-Beobachtungen (Code und/oder Phase) zu berechnen und diese zur Mobilstation zu übertragen. Die Korrekturdaten sind weniger oder gar nicht abhängig von der Empfängerhard- und -software und der Satellitenkonfiguration. Die Menge der Korrekturdaten ist jedoch, insbesondere bei höheren Genauigkeitsansprüchen, wesentlich größer als bei Positionskorrekturen, was eine ausreichende Bandbreite im Übertragungskanal erfordert.

Zur Steigerung der Genauigkeit wird zusätzlich meist noch die zeitliche Änderung der Entfernungskorrekturen ("Range-Rate") übertragen.

Wegen der Empfängerunabhängigkeit und der fast beliebig erreichbaren Genauigkeit ist die Übertragung von Entfernungskorrekturen heute das Standardverfahren beim DGPS.

Als empfängerunabhängiges Format für die zu übertragenden Informationen hat sich das sogenannte RTCM-Format der US-amerikanischen *Radio Technical Commission for Maritime Services* etabliert (RTCM SC 104). Für unterschiedliche Anforderungen existieren verschiedene RTCM-Spezifikationen.

RTCM 2.0 wurde 1990 definiert und enthält Pseudorange- und Range-Rate-Korrekturen der Codebeobachtungen sowie die Koordinaten der Referenzstation und ASCII-Mitteilungen der Referenzstation. Alle wesentlichen Informationen für einen Meßzeitpunkt (Epoche) können in 1200 Bits untergebracht werden.

Wegen der begrenzten Auflösbarkeit der RTCM-Datenfelder (im Message Typ 1) können Entfernungskorrekturen unter SA-Bedingungen oft nur auf 30 cm angegeben werden.

RTCM 2.1 enthält zusätzlich L1- und L2-Phasenkorrekturen und stellt damit praktisch eine PDGPS-Erweiterung von RTCM 2.0 dar. Die Informationsmenge umfaßt mehr als 4800 Bits pro Epoche.

RTCM++ wurde entwickelt für RTPDGPS-Anwendungen im Einsatz auf den Referenzstationen der Landesvermessungsämter (AdV, NordNAV). Es ist in seiner Datenstruktur kompatibel zum RTCM-Standard und hat den gleichen Dateninhalt wie RTCM 2.1, benötigt aber dank besserer Datenverdichtung weniger als 2400 Bits pro Epoche. Es werden die im RTCM für "Proprietary Messages" vorgesehenen Datenfelder verwendet, was eine einfache Zugangskontrolle durch den Betreiber des DGPS-Dienstes ermöglicht. RTCM++ ist im Gegensatz zu RTCM 2.0/2.1 auch RDGPS-fähig.

### 4.3 Fehlerspezifische Korrekturparameter

Eine dritte Möglichkeit, die Positionsbestimmung auf der Mobilstation zu verbessern, besteht darin, die Fehler, die auf der Referenzstation bestimmt wurden, bestimmten Fehlerquellen zuzuordnen und damit die Parameter von geeigneten Fehlermodellen zu bestimmen. Diese Parameter können dann zur Mobilstation übertragen werden und dort mit Hilfe derselben Fehlermodelle in Positions- oder Entfernungskorrekturen umgerechnet werden. Prinzipiell, allerdings auf einem wesentlich geringeren Genauigkeitsniveau, ist dies bereits in den Uhr- und Ionosphärenparametern der Satelliten-Broadcast-Message realisiert.

Ein Vorteil dieses Verfahrens ist, daß hiermit für ein Netz von Referenzstationen flächendeckend Korrekturparameter bestimmt werden könnten.

Der entscheidende Nachteil besteht in der hohen Informationsdichte, die für ausreichend genaue Positionierungsaufgaben (PDGPS) erforderlich wäre und mit den gegenwärtigen RTCM-Formaten nicht bewältigt werden kann. Deshalb ist dieses Verfahren zur Zeit nicht aktuell, könnte aber in Zukunft für WADGPS-Anwendungen an Bedeutung gewinnen.

### 4.4 Datenübertragungskanäle

Für die Wahl der Übertragungskanäle von der Referenzstation kommen prinzipiell mehrere Wege in Betracht. Entscheidend ist dabei die Frage, wieviele Mobilstationen von einer Referenzstation aus bedient werden sollen. Für viele Mobilstationen kommen nur Broadcast-Verteilungen in Frage. Allerdings sind geeignete Übertragungskanäle (freie Frequenzen) oft nur schwer zu bekommen.

Für lokale DGPS-Systeme mit einem oder wenigen Nutzern ist die Kommunikation über (Mobil-) Telefon schnell und problemlos zu realisieren, ist aber im laufenden Betrieb bei den gegenwärtigen Mobilfunk-Tarifen überaus kostenintensiv.

Ein weiteres Kriterium ist die angestrebte Genauigkeit, die wegen der zu übertragenden Informationsmenge eine gewisse Bandbreite erforderlich macht. Nicht alle Übertragungskanäle erlauben die Übertragung von PDGPS-Korrekturen. Einen Überblick gibt die folgende Tabelle 4.

<i>Bezeichnung</i>	<i>Nutzer</i>	<i>Reichweite</i>	<i>Bandbreite</i>	<i>Betrieb *)</i>
Funk 2 m	Broadcast	70 km	2400 bps	semi-duplex
Funk 70 cm	Broadcast	wenige km	9600 bps	semi-duplex

<i>Bezeichnung</i>	<i>Nutzer</i>	<i>Reichweite</i>	<i>Bandbreite</i>	<i>Betrieb *)</i>
Funk LW	Broadcast	500 km	300 bps	simplex
Seefunk	Broadcast	200 km	300 bps	simplex
Rundfunk UKW/RDS	Broadcast	50 km	100 bps	simplex
Rundfunk MW/AMDS	Broadcast	100-200 km	100 bps	simplex
Mobilfunk C,D1,D2, E1	1 pro Kanal	in Dtl. / Euro- pa fast unbe- grenzt	9600 bps	voll-duplex
*) für den Einsatz mit RT-DGPS ist normalerweise nur Simplex-Betrieb erforderlich.				

**Tabelle 4:** Datenübertragungskanäle für DGPS

## 4.5 Aufdatierungsraten

Die hohe Dynamik der SA-Effekte mit Beschleunigungen bis  $1 \text{ cm/s}^2$  (siehe nächste Abbildung) und das Fehlen von Beschleunigungsparametern im RTCM-Format machen es für bestimmte Genauigkeitsanforderungen erforderlich, die Aufdatierung der Korrektursignale in möglichst kurzen Abständen erfolgen zu lassen. Da sich die Beschleunigungseffekte quadratisch auf den Positionsfehler auswirken, ist ab ca. 30 Sekunden bereits mit einem 10 m Positionsfehler zu rechnen. Für Genauigkeiten von 1 m sind Aufdatierungsraten von weniger als 10 Sekunden, für Dezimeter bereits 3 Sekunden erforderlich. Zentimetergenauigkeiten schließlich sind nur mit einer Aufdatierungsrate von einer Sekunde oder weniger erreichbar.

**Abb. 8:** Differentielle Korrekturen, erzeugt von einer DGPS-Referenzstation. Die kurzperiodischen Anteile mit Perioden von wenigen Minuten bei Amplituden von über 50 m bedeuten Beschleunigungen von bis zu  $1 \text{ cm/s}^2$ .

Da das Datenvolumen einer RTCM Nachricht fest ist, sind bestimmte Genauigkeiten nur bei ausreichender Bandbreite des Übertragungskanals möglich.

## 4.6 DGPS-Dienste

Während DGPS-*Systeme* für den Einsatz in der Hydrographie bisher häufig als *Komplettsysteme* konfiguriert wurden, werden heute und in Zukunft verstärkt *DGPS-Dienste* aufgebaut. Dabei sorgt ein Anbieter des DGPS-Dienstes innerhalb eines bestimmten Geltungsbereiches für die notwendige Bereitstellung der Korrekturdaten für die mobilen Nutzer.

In letzter Zeit sind in Deutschland verschiedene DGPS-Dienste erprobt worden, von denen einige in nächster Zukunft ihren regulären Betrieb aufnehmen werden.

- "Seezeichenversuchsfeld" (SZV) der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes mit 2 Referenzstationen (Wustrow und Helgoland), z.Zt. im Probetrieb
- experimenteller Langwellensender des Instituts für Angewandte Geodäsie (IfAG)
- Rundfunk/RDS Abstrahlung durch Landesvermessungsämter, zur Zeit im Probetrieb in NRW, Rheinland-Pfalz, Baden Württemberg, Berlin/Brandenburg

Diese Dienste bieten DGPS auf der Basis von RTCM 2.0 an.

Einige Landesvermessungen in der sogenannten Nordnav-Gruppe arbeiten bereits mit mehreren Referenzstationen im 2m-Band, die PDGPS auf der Basis von RTCM++ möglich machen.

In der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen des Bundes und der Länder (AdV) gibt es Bestrebungen, die verschiedenen Dienste zu einem flächendeckenden Dienst, auch für höchste Genauigkeiten, zu integrieren.

## 5 Positions- und Zeitzuordnung

Die Bestimmung hochgenauer Positionen ist nur dann sinnvoll, wenn die räumliche und zeitliche Zuordnung für die eigentliche Zweckbestimmung korrekt erfolgt. So wird z.B. bei der Bestimmung statischer Vermessungspunkte die räumliche Zurordnung durch Zentrierung der GPS-Antenne über dem Punkt sowie Messung der Antennenhöhe erreicht. Die zeitliche Zuordnung ist in diesem Falle von untergeordneter Bedeutung.

Im Falle kinematischer Anwendungen stellt sich die Zuordnungsproblematik schwieriger dar.

### 5.1 Räumliche Zuordnung

So ändert sich z.B. bei GPS-gestützten Bildflügen die räumliche Zentrierung zwischen der GPS-Antenne und einer photogrammetrischen Aufnahmekammer in Abhängigkeit von der Flugbewegung laufend. Die Erfassung dieser Zentrierung ist eine der schwierigen Aufgaben bei präzisen GPS-gestützten Bildflügen.

Auch bei hydrographischen Vermessungen stellt sich ein ähnliches Problem bei der Integration von GPS mit anderen Systemen, z.B. Lotungseinrichtungen. Für die Übertragung der Koordinaten von der GPS-Antenne zu den anderen Systemen muß die Orientierung (oft auch Lage, engl. Attitude, genannt) der Meßplattform bekannt sein, müssen also bei einem Schiff Informationen über Heading, Rollen und Stampfen vorliegen. Diese Informationen können entweder über externe Sensoren bereitgestellt oder auch mit Hilfe mehrerer GPS-Antennen durch PRDGPS bestimmt werden (z.B. COMPASS-System). Hiermit ist die Orientierung auf etwa 0,1° möglich, d.h. bei einer mittleren Schiffsgröße von 10m sind die Koordinaten innerhalb des Schiffes mit einer Genauigkeit von 2 cm möglich, sofern die

Geometrie zwischen GPS-Antenne und den anderen Systemen genau genug bekannt sind.

**Abb. 9:** Räumliche Zuordnung durch Bestimmung der Orientierung der Meßplattform mittels PRDGPS, hier durch das Lagebestimmungssystem COMPASS von Geo++.

## 5.2 Zeitliche Zuordnung

Die zeitliche Zuordnung ist ein weiteres Problem. Problematisch ist hier nicht die Zuordnung der Positionsdaten zur GPS-Zeit. Diese ist mit einer Genauigkeit von besser als 1 Mikrosekunde gewährleistet. Die Problematik entsteht dann, wenn eine Verknüpfung mit Daten anderer Sensoren erfolgt, deren Zeitbasis i.a. nicht mit der GPS-Zeit synchronisiert ist.

Die Lösung erfolgt bei Bildflügen i.allg. durch Erzeugung eines elektrischen Impulses zum Zeitpunkt der Öffnung des Kameraverschlusses und Einspeisung desselben in den GPS-Empfänger, der den exakten Zeitpunkt an der mit der GPS-Zeit synchronisierten Empfängeruhr abliest und registriert. Beim späteren Postprocessing erfolgt die Interpolation der in diskreten Zeitintervallen von z.B. 1 Sekunde erfolgten GPS-Messungen für den Aufnahmezeitpunkt.

**Abb. 10:** Datenalter im Zusammenhang mit einer GPS-Positionsbestimmung. Wichtig ist, daß sich GPS-Messung und andere Beobachtungen auf dieselbe Beobachtungsepoche beziehen.

Wird aber z.B. eine Echolotmessung in einem separaten Datenerfassungsrechner empfangen und abgespeichert, so erfolgt die zeitliche Zuordnung meist durch Ablesung der Rechneruhr. Die oben genannte Genauigkeit setzt somit voraus, daß die Rechneruhr entsprechend mit der GPS-Zeit synchronisiert wird.

Daneben ist zu beachten, daß die Prozessierung der Meßsignale in GPS-Empfängern und den nachgeordneten Systemen eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt. So dauert die Verarbeitung selbst in hochwertigen Empfängern ca. 0,5 bis 3 Sekunden. Durch die Übertragung über serielle Schnittstellen kommen je nach Übertragungsgeschwindigkeit noch einmal 0,1 bis 1 Sekunde hinzu. Das Datenalter der GPS-Information kann also bis zu einigen Sekunden betragen. Zudem ist die Verarbeitungszeit nicht konstant. Bei wechselnder Satellitenanzahl z.B. sind Variationen von bis zu einer Sekunde möglich.

Das Ergebnis der GPS-Positionsbestimmung steht auf einem externen Rechner also erst bis zu einigen Sekunden nach der Messung zur Verfügung. Für eine Verknüpfung von GPS und anderen Daten (Echolot) ist aber der Zeitpunkt der *GPS-Messung* maßgebend, nicht der Zeitpunkt, in dem das *GPS-Ergebnis* vorliegt. Selbst wenn GPS und Echolot syn-



chronisiert sind, so muß dennoch das Datenalter der GPS-Positionsbestimmung berücksichtigt werden (siehe nächste Abbildung).

Für eine korrekte zeitliche Zuordnung ist ein definiertes Zeitverhalten, d.h. eine Kenntnis des Datenalters, erforderlich. Nur dann kann von entsprechend ausgestatteten Auswerteprogrammen (z.B. GNRT) durch eine Prädiktion die Zuordnung auf den aktuellen Zeitpunkt erfolgen, um so ein besseres Echtzeitverhalten zu erreichen.

Je höher die Genauigkeitsforderungen an die Positionsbestimmung sind, desto höher sind auch die Anforderungen an die Genauigkeit der zeitlichen Zuordnung dieser Positionsdaten. Bewegt sich z.B. ein Peilschiff mit einer Geschwindigkeit von 5 m/s, so ist bei einer Positionsgenauigkeit von +/- 1 m die zeitliche Zuordnung besser als +/- 0.2 s zu gewährleisten.

Bei vielen heute am Markt verfügbaren Geräten ist diese Forderung nicht erfüllt. Zwar wird mit Positionsgenauigkeiten im Submeterbereich geworben, aber über die zeitliche Zuordnung der Daten ist häufig keine Angabe enthalten.

## 5.3 Bezugssysteme

### Geodätisches Datum

Bei DGPS-Diensten werden Bezugssystem und Korrekturen generell im WGS84 vorliegen. Damit liegen die Koordinaten der mobilen Station ebenfalls im WGS84 vor, die durch eine Datumstransformation in das Datum der Gebrauchskoordinaten transformiert werden müssen. Die dazu notwendigen Transformationsparameter können entweder von den DGPS-Diensten zur Verfügung gestellt werden oder müssen von dem Benutzer über die Besetzung von bekannten Punkten im Meßgebiet selbst bestimmt werden.

### Höhenbezugsfläche

DGPS liefert einen ellipsoidischen Höhenbezug. Bei Kenntnis des Geoids bzw. der NN-Undulationen können daraus orthometrische bzw. NN-Höhen berechnet werden. Entsprechendes gilt für die in der Hydrographie verwendete Höhenbezugsfläche "Seekarten-Null" (SKN). Das Geoid ist z.Zt. nur aus Veröffentlichungen wissenschaftlicher Institutionen zu erhalten, NN-Undulationen sind in Zukunft vielleicht bei den Landesvermessungen verfügbar. Die SKN-Bezugsfläche wäre noch zu bestimmen. Für lokale Projekte ist denkbar, aus den Offsets in umliegenden bekannten Punkten einfache lineare Modelle zu berechnen.

## 6 Systemkomponenten und Beurteilungskriterien GPS-bezogene Ortungssysteme

Die wichtigsten Systemkomponenten einer DGPS-Referenzstation sind in der folgenden Abbildung am Beispiel von GNREF dargestellt. GNREF 2.0 ist grundsätzlich auch in der Lage, als PDGPS-Referenzstation zu dienen.

**Abb. 11:** Funktionsweise einer DGPS-Referenzstation am Beispiel von GNREF.

## 6.1 Referenzstation für RTDGPS / RTPDGPS

Folgende Komponenten sind notwendig oder wünschenswert, um eine Referenzstation für Real-Time DGPS bzw. PDGPS zu betreiben. Komponenten, die nur für PDGPS benötigt werden, sind durch ein (P) gekennzeichnet. Einige Komponenten sind besonders wichtig für in einem Verbund vernetzte Referenzstationen.

- GPS-Empfänger
  - "All in View" (12 Kanäle)
  - Zweifrequenz
  - C/A-Code, P-(Y-) Code
  - L1/L2-Trägerphasen (P)
- Referenzstationsrechner und -software
  - Rohdatenübernahme vom GPS-Empfänger
    - Pseudoentfernungen (C/A-,P(Y)-Code)
    - Trägerphasen (L1,L2,LQ) (P)
    - Dopplermessungen (L1,L2)
    - Satellitenbahndaten (Navigation Message)
  - Integrity- Monitoring
    - Satellitenbahnen- und uhren
    - Satellitensignale, -zustand
    - Ionosphäre
    - Monitoring anderer Ref.-Stationen (LADGPS/WADGPS)
  - Generierung von DGPS/PDGPS Korrekturdaten
    - RTCM 2.0
    - RTCM 2.1 (P)
    - RTCM++ (P)
    - Rohdatenspeicherung (Postprocessing, Beweissicherung)

- RINEX (Receiver Independent EXchange Format)
- Korrekturdatenspeicherung (Beweissicherung)
- Vernetzung (LADGPS, WADGPS), Integrity
- Versendung der Echtzeitkorrekturdaten
  - Funk
  - Mobilfunk (GSM,...), Telefon (Modem)
  - ISDN - LADGPS/WADGPS
  - LAN/WAN - LADGPS/WADGPS
  - RDS, AMDS
  - Zugangskontrolle (Gebühren)
- Bereitstellung von Rohdaten/Korrekturdaten in einer Mailbox
  - Postprocessing DGPS
  - Postprocessing PDGPS (P)
  - Datenaustausch LADGPS/WADGPS
- Kommunikationshardware
  - Funksender
  - Standleitungen
  - Telefonnetz
  - Mobilfunkgeräte (GSM,...)
    - geringere Kosten im Vgl. zu Leitungsnetz
  - LAN/WAN
  - Modem
  - RDS Coder
- Stromversorgung
- Redundanz
  - auf der Station: Dopplung aller Komponenten
  - im Netz (LADGPS)

## 6.2 Mobilstation

Für eine Mobilstation sind prinzipiell zwei Realisierungen denkbar. Entweder sind möglichst viele Komponenten im GPS-Empfänger integriert, oder es werden möglichst viele Funktionen auf einen separaten Feldrechner ausgelagert. Letzteres hat zwar den Nachteil, daß zunächst mehr Komponenten mit unterschiedlichem Bedienungskonzept erforderlich sind, die eventuell auch zusätzliche Kosten verursachen.

Demgegenüber stehen jedoch der große Vorteil, daß eine größere Flexibilität möglich ist und ein externer Datenerfassungsrechner meist ohnehin erforderlich ist, wenn Informationen von anderen Meßsystemen registriert werden sollen.

Zudem können eventuell teure "Zusatzoptionen" am GPS-Empfänger entfallen.

Mit modernen Betriebssystemen ist die parallele Erfassung und Prozessierung von mehreren Signalen kein Problem, wobei auch die Ergebnisse optisch ansprechender präsentiert werden können.

Einige Komponenten sind sogar nur mit einem externen Rechner realisierbar, wie z.B. eine spezielle Aufschaltprozedur zu GPS-Diensten über Mobilfunk.

Zudem sind viele empängerinterne Komponenten oft herstellerabhängig, so daß eine Kombination unterschiedliche Empfängermodelle erst mittels externer Rechner möglich wird.

- GPS-Empfänger

- Anzahl der Kanäle (All in View ?)
- Meßsignale (C/A - P-Code? , L1,L2 Phasen)
- DGPS/PDGPS-Fähigkeit (RTCM !)
- Schnittstellen (Standards?)
- Aufdatierungsrate
- Zeitverhalten
- Bezugssysteme (Geod. Datum, Höhenbezugsfläche)
- Unterstützung von Kommunikationskanälen
- GPS-Verarbeitungsrechner und -software alternativ zu Kompaktlösung im Empfänger)
  - GNSS2
  - Schnittstellen
    - GSM -> PCMCIA
    - RDS -> Decode
    - Mobilfunk -> Aufschaltprozeduren
  - Datensicherung
  - Verarbeitung von Stützinformation
    - integrierte Lösung
    - PDGPS
  - gleichzeitige Datenerfassung für weitere Sensoren
  - Datenzuordnung
    - Zeit
    - Position
      - Einbindung von Orientierungsinformation
- Kommunikationshard- und -software
  - Mobilfunk
    - Modemunterstützung (PCMCIA)
    - Zugangsprotokoll auf der Referenzstation
  - Funk
    - automatische Kanalumschaltung

### 6.3 Beurteilungskriterien

- Kosten
  - Investitionskosten in Höhe von 5.000 DM je Station für DGPS bis 100.000 DM für ein PDGPS Komplettsystem inklusive Referenzstation und Software.
  - Betriebskosten pro Monat für den Betrieb der Referenzstation 1.000 DM bis 10.000 DM, für Datenkommunikation 20 DM (Funk) bis 5.000 DM (Mobilfunk)
- Leistungsfähigkeit
  - Genauigkeit / Zuverlässigkeit
  - "All-in-View"-Fähigkeit (ausreichend Kanäle)
- Offenheit (standardisierte Schnittstellen)
  - Hardware (RS232,..)
  - Software (RTCM)
  - Integrierbarkeit in bestehende Positionierungssysteme
- Flexibilität
  - Anpassung an lokales geodätisches Datum / Höhenbezugsfläche
  - Wahl der Datenkanäle (Modem, Funk)
- Zeitverhalten
  - zeitl. Auflösung (Taktrate)

- Datenalter (Verarbeitungszeit)
- Bedienung
  - Benutzerführung
  - Möglichkeit zum unbedienten Betrieb (Referenzstation)
  - Ergebnisdarstellung numerisch/graphisch
  - Event-Marker
  - Kommunikationssoftware zum Aufbau der DGPS-Datenkanäle
- Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
  - aktiv, darf Bord-Elektronik nicht stören
  - passiv, einige Empfänger sehr empfindlich bei L2-Signalen (Problem bei PDGPS)

## 7 Ausblick

Abschließend sei ein Überblick über den gegenwärtigen und vielleicht zukünftig möglichen Entwicklungsstand GPS-bezogener Ortungssysteme erlaubt.

Bereits heute ist das differentielle GPS (DGPS) mit einer Referenzstation operationell verfügbar, mit dem Genauigkeiten von ca. 1 m in Real-Time erreicht werden können. Ein flächendeckender DGPS-Dienst ist im Aufbau.

In naher Zukunft wird präzises differentielles GPS (PDGPS) flächendeckend verfügbar sein. Bereits heute arbeiten einige PDGPS-Referenzstationen, die im Probetrieb Genauigkeiten von einem Dezimeter bis zu 1 Zentimeter plus einem entfernungsabhängigen Anteil von wenigen ppm realisierbar machen.

In ferner Zukunft sind ganze Netze von miteinander verbundenen Referenzstationen denkbar (LADGPS), die sich untereinander unterstützen und kontrollieren, so daß damit Genauigkeiten bis zu wenigen Millimetern in Real-Time möglich sein werden (LAPDGPS).

Für weniger hohe Genauigkeitsansprüche, aber größere Ausdehnung geht der Trend in Richtung Wide Area Differential GPS (WADGPS), das letztlich sogar eine globale Positionierung mit Meter-Genauigkeit mit Differential GPS möglich machen könnte.

## Literatur

Andree, P., 1995: *GPS in der Marine-Archäologie*. SPN , 4, Heft 1, (im Druck)

Bichtemann, G., P. Hankemeier, 1993: *DGPS-Dienste in Norddeutschland*. SPN, 2, Heft 1, 27-31

RTCM, Radio Technical Commission for Marine Services, 1990: *RTCM recommended Standards for Differential Navstar GPS Service*. Washington

Seeber, G., 1993: *Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications*. deGruyter, Berlin, New York

Wübbena, G., 1991: *Zur Modellierung von GPS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 168, Universität Hannover

Wübbena, G., 1992: *Verfahren der GPS-Positionsbestimmung: Beobachtungs- und Auswertetechniken*. in: GPS - eine universelle geodätische Methode. Schriftenreihe DVW, Band 11, Verlag Konrad Wittwer, 55-77

## Autorenanschrift

Dr.-Ing. Gerhard Wübbena  
Dipl.-Ing. Andreas Bagge  
Geo++ Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und navigatorische Technologien mbH  
Osteriede 8-10  
D-30827 Garbsen