Institut für Erdmessung Universität Hannover Juni 1996

Abschlußbericht zum BMBF - Vorhaben

Präzise GPS-gestützte Höhenzuordnung für kontinuierliche Lotungsmessungen auf Gewässern

Förderungskennzeichen: MTK 0551

Bearbeiter:

Dipl.-Ing.V. Böder

Dr.-Ing. F. Heimberg

Dipl.-Ing. M. Schmitz

Projektleiter:

Prof. Dr. G. Seeber

<u>Inhaltsverzeichnis</u>

1	Einle	eitung	
	1.1	Zielsetzung des Vorhabens	
2	Verl	auf des Projekts und GPS-Systemzustand	•
	2.1	Wissenschaftlicher und technischer Status zu Beginn des Projektes	; •
	2.2	Verlauf der Arbeiten in den Jahren 1993 - 1995	
	2.3	GPS-Systemzustand	4
3	Vorb	bereitende Untersuchungen	(
	3.1	Nutzeranforderungen der kooperierenden Stellen	. (
		3.1.1 Allgemeine Anforderungen	(
		3.1.2 Genauigkeitsanforderungen	,
	3.2	Höhensysteme auf Binnengewässern und auf See	Õ
		3.2.1 Bezugshorizonte an der Nordseeküste	٥
		3.2.2 Beschickung von Lotungsmessungen	13
		3.2.3 Verknüpfung der Höhensysteme	13
	3.3	Verknüpfung der DGPS Höhe mit der Lotungsmessung	14
		3.3.1 Transformation der GPS Antennenkoordinate auf den Schwinger	16
	3.4	Untersuchungen zu wirksamen projektspezifischen Fehleranteilen	2]
4	Präzi	ise GPS-gestützte Positionsbestimmung in Echtzeit	24
	4.1	Datenübertragung der Korrekturen	24
		4.1.1 Datenfernübertragung	24
		4.1.2 Das RTCM-Datenformat	29
		4.1.3 DGPS-Datendienste	31

	4.2	DGPS	S-Echtzeitsysteme	33
		4.2.1	Das Programmsystem GEONAV	34
		4.2.2	Die Ashtech Z-12 DGPS Option	38
		4.2.3	Das Programmsystem GNRT	38
		4.2.4	Weitere hochpräzise Echtzeitsysteme auf dem Markt	39
5			ngen zur Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Operationalität Way"-Verfahren (OTW)	40
	5.1	Unters	suchungen im Postprocessing mit GEONAP	40
		5.1.1	Schnelligkeit und Zuverlässigkeit der OTW-Verfahren	41
		5.1.2	Untersuchung der OTW-Algorithmen auf Reichweite und Einsatz mehrerer Referenzstationen	48
		5.1.3	Genauigkeit der Positionierung mit GPS in kinematischen Anwendungen	51
	5.2	Unters	suchungen in Echtzeit mit GNRT	56
		5.2.1	Zuverlässigkeit und Schnelligkeit der OTW-Algorithmen in GNRT-K	56
		5.2.2	Genauigkeit von GNRT-K Lösungen	60
	5.3		suchung der Echtzeitmehrdeutigkeitslösung mit der Trimble OTF - Option	62
	5.4	Zusam	nmenfassung zu den Untersuchungen der OTW-Verfahren	65
6	Zusar	nmenfa	ssung und Ausblick	67
7	Litera	ıtur		70

Abkürzungsverzeichnis

AdV Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der

Bundesrepublik Deutschland

A-S Anti-Spoofing

BfG Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

BSH Bundesanstalt für Seeschiffahrt und Hydrographie, Hamburg

DGPS Differential GPS

DHHN Deutsches Haupthöhennetz
DREF Deutsches Referenzsystem
EPS Echtzeit-Positionierungs-Service
FOC / IOC Full/Initial Operational Capability

GHPS Geodätischer Hochpräziser Positionierungs-Service
GPPS Geodätischer Präziser Positionierungs-Service

GPS Global Positioning System

GSM Groupe Spécial Mobile, Global System for Mobile Communication

HEPS Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service

HPPS Hochpräziser Permanter Positionierungsservice der Niedersächsischen

Landesvermessung

IfE Institut für Erdmessung

IHO International Hydrographic Organization

INS Inertiales Navigationssystem

MSpNW Mittleres Springtiden Niedrigwasser
MWS / MSL Mittlerer Wasserspiegel / Mean Sea Level

NN Normalnull

OTW/OTF On-The-Way/ On-The-Move

PDGPS Precise DGPS
PN Pegelnull

PPS Precise Positioning Service

RDS Radio Data System

RTCM-SC Radio Technical Commission for Maritime Services - Special Committee

RT-DGPS Real-Time DGPS
RTK Real-Time Kinematic
SA Selective Availability

SAPOS Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung

SKN Seekartennull

SPS Standard Positioning Service SST Sea Surface Topography

VWFS Vermessungs-, Wracksuch- und Forschungsschiff

WEK Wasserstandserrechnungskarte WGS84 World Geodetic System von 1984

Präzise G	PS-gestützte	Höhenzuordnung	von kontinuierlich	hen Lotungsmessung	en auf Gewässer	m
. Iuzibe O	i o gostatzio	Hononzaoranang	von kommunente	non botungsmossume	chi aui Ocwassci	

1 Einleitung

Das Projekt "Präzise GPS-gestützte Höhenzuordnung für kontinuierliche Lotungsmessungen auf Gewässern" wurde vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) unter der Nummer MTK0551 3 gefördert. Die Laufzeit dauerte drei Jahre vom 1.1.1993 bis zum 31.12.1995. Die Untersuchungen wurden am Institut für Edmessung unter der Leitung von Professor Dr.-Ing. G. Seeber von den wissenschaftlichen Mitarbeitern Dr.-Ing. F. Heimberg (1993), Dipl.-Ing. M. Schmitz (1994) und Dipl.-Ing. V. Böder (1995) durchgeführt.

1.1 Zielsetzung des Vorhabens

Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens wurden Verfahren entwickelt und erprobt, um kontinuierlich durch relative GPS-Messungen die Höhenkomponente von bewegten Plattformen auf Gewässern mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern zu bestimmen. Ziel war die Entwicklung und Untersuchung eines Prototypsystems, um operationell eine genaue Höhenzuordnung bei Lotungsmessungen vorwiegend im küstennahen Bereich zu gewährleisten. Entsprechend den überwiegenden Nutzeranforderungen wurden drei Konzepte verfolgt:

- die operationelle Lage- und Höhenbestimmung in Echtzeit mit Nutzung von C/A-Code (L1) Empfängern, auch über größere Entfernungen. Basierend auf institutseigener Softwareentwicklung (GEONAV) wurde eine Genauigkeit besser als ein Meter angestrebt.
- die hochpräzise Höhenzuordnung unter Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten im Postprocessing (nachträgliche Berechnung). Es wurden "geodätische" Empfänger unter Bereitstellung möglichst aller Meßgrößen verwendet. Basierend auf wissenschaftlicher Software (GEONAP) beträgt die angestrebte Genauigkeit wenige Zentimeter.
- die hochpräzise Höhenzuordnung unter Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten in Echtzeit mit sogenannten OTW Verfahren. Auch hier wurden "geodätische" Empfänger verwendet. Das hauptsächlich für die Untersuchungen herangezogene Programmpaket GNRT ist auf Grundlage der GEONAP Software entstanden.

Operationelle Navigation mit mittlerer Genauigkeit (1-2 m) ist zunehmend durch Firmenprodukte im Zusammenhang mit permanenten Referenzstationen unter kommerzieller und staatlicher Kontrolle möglich. Für eine zuverlässige, echtzeitfähige, zeitvariable, dreidimensionale Positionsbestimmung mit Genauigkeiten im cm-Bereich sind verschiedene Fragestellungen von Bedeutung, insbesondere hinsichtlich der Verfahren der operationellen OTW ('On The Way') Mehrdeutigkeitslösung, des Einflusses der GPS Systemsicherungsmaßnahmen (Anti-Spoofing A-S, Selective Availability SA), der Nutzung flächendeckender

Netze von Referenzstationen, der Sicherung der Datenübertragungswege sowie der hochpräzisen Schiffslagebestimmung.

Die Hauptarbeitsschritte im Rahmen des Vorhabens waren deshalb

- die Untersuchung der wirksamen Fehlereinflüsse, insbesondere zur Zuverlässigkeit und Operationalität von Mehrdeutigkeitslösungen (OTW-Verfahren) in Abhängigkeit von Meßanordnung, Hardware-Konzept und Systemsicherungsmaßnahmen (A-S, SA)
- die Entwicklung von Systemkonfigurationen
- die Erprobung für die Praxis in Kooperation mit Anwendern (z.B. Küstenschutz, Hydrographie).

2 Verlauf des Projekts und GPS-Systemzustand

2.1 Wissenschaftlicher und technischer Status zu Beginn des Projektes

Als Grundlage für die durchzuführenden Untersuchungen und Entwicklungen standen zu Beginn des Vorhabens am Institut für Erdmessung zwei Programmsysteme zur Auswertung von Beobachtungen des GPS Satellitennavigationssystem zur Verfügung. Es handelt sich hierbei um die Programmsysteme GEONAV (GEOetic NAVigation Software) und GEONAP (GEOdetic NAVSTAR Positioning). Die Funktionsfähigkeit der beiden Auswertekonzepte konnte in den vergangenen Jahren anhand verschiedener Datensätze im Postprocessing nachgewiesen werden.

Das Programmsystem GEONAV wurde für navigatorische Anwendungen entwickelt und ist unabhängig vom Empfängertyp. Mit Hilfe der KALMAN-Filtertechnik werden unter Nutzung von trägergeglätteten Code-Messungen Positionen und Geschwindigkeiten von bewegten Plattformen bereitgestellt. Das Modell arbeitet im Absolut- und im Relativmodus. Bedingt durch das Auswertekonzept (Relativmessungen mit trägergeglätteten Codephasen) liegen die erreichbaren Genauigkeiten im Bereich von \pm 1-10 m. Eine modifizierte GEONAV Version ist echtzeitfähig. Für Genauigkeitsforderungen im dm-Bereich und besser ist dagegen ein auf Trägerphasenbeobachtungen basierendes Auswertekonzept erforderlich, wie es in dem Programmsystem GEONAP implementiert ist.

Das Programmsystem GEONAP ist ein sehr flexibles und universelles geodätisches Auswerteprogramm, das in der Grundversion am Institut für Erdmessung der Universität Hannover
entwickelt wurde. GEONAP erlaubt die Verarbeitung von statischen, kinematischen sowie
pseudokinematischen Daten der unterschiedlichsten Empfängertypen. Das Programm
verwendet hierzu die undifferenzierten GPS-Beobachtungen. Die Lösung der Mehrdeutigkeitsschätzung erfolgt dabei wahlweise durch Kombination von Code- und Trägerphasen, der
geometrischen Methode oder durch ionosphärische Modellierung. Hierbei können verschiedene
Linearkombinationen der L1- und L2- Meßgrößen und Techniken des wide- und extrawidelaning verwendet werden (Wübbena 1989). Im Gegensatz zu Verfahren der Differenzbildung (single-, double- and triple differences) werden in GEONAP sämtliche
anfallenden Parameter im Zuge einer Ausgleichung geschätzt. Die Anwendung des
Programmsystems GEONAP ist nur im Postprocessing möglich.

Am Institut für Erdmessung steht ein Prototyp eines echtzeitfähigen Differentiellen GPS Systems aus abgestimmten Hard- und Softwarekomponenten zur Verfügung, um in Echtzeit dem Nutzer die gewünschten Positions- und Geschwindigkeitsinformationen zur Verfügung zu stellen. Wesentlicher Bestandteil des echtzeitfähigen Meß- und Auswertesystems war zu Beginn des Projektes das Programmsystem GEONAV.

2.2 Verlauf der Arbeiten in den Jahren 1993 - 1995

Die Arbeiten wurden im wesentlichen 1993 von Dr.-Ing. Frank Heimberg, 1994 von Dipl.-Ing. Martin Schmitz und 1995 von Dipl.-Ing. Volker Böder durchgeführt.

Die durchgeführten Arbeiten orientierten sich an den für den Projektzeitraum geplanten Zielen (Abb. 2.1), wurden aber auch veränderten Rahmenbedingungen angepaßt. So wurde die Weiterentwicklung der GEONAV-Software nicht weiter verfolgt, da sie für die Implementierung von Mehrdeutigkeitslösungen weniger geeignet ist und da sich im Verlaufe des Projektes vergleichbare und leistungsfähigere Softwareprodukte auf dem Markt etablierten. Dem Institut steht für weitere Untersuchungen das Programmsystem GNRT zur Verfügung, das aus der GEONAP-Software entwickelt wurde. Mit dem Modul GNRT-K ist es dem Hersteller Geo++ GmbH - Gesellschaft für satellitengestützte und navigatorische Technologien, Garbsen - gelungen, hochpräzise Positionen mit Subdezimetergenauigkeit bereitzustellen.

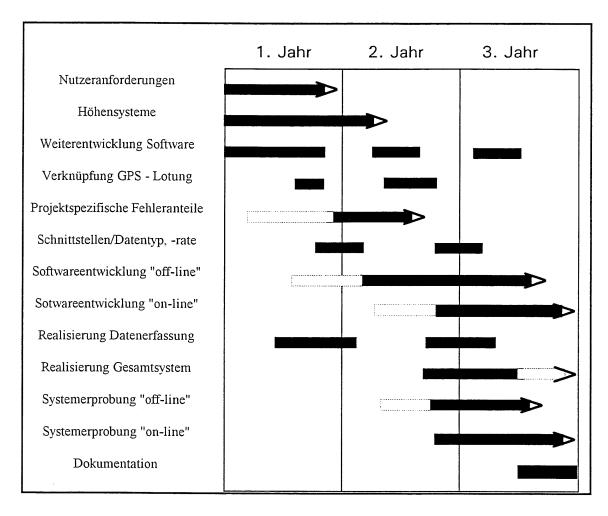


Abb. 2.1: Balkenplan

Dementsprechend wurde im zweiten und dritten Projektjahr ein wesentlicher Schwerpunkt auf die wissenschaftliche Untersuchung der Zuverlässigkeit, Schnelligkeit und Operationalität der Mehrdeutigkeitssuchalgorithmen vorhandener RTK-Software gelegt.

2.3 GPS-Systemzustand

Das GPS-Raumsegment gilt seit dem erfolgreichen Start und der Inbetriebnahme des 24. Block II Satelliten im März 1994 als vollständig ausgebaut (Full Operational Capability, FOC). Somit sind jederzeit weltweit mindestens vier Satelliten, meistens jedoch 6 bis 9 Satelliten gleichzeitig für die Positionierung verfügbar. Die offizielle Erklärung der Operationalität des GPS -

Systems hatte die permanente Aktivierung der Systemsicherungsmaßnahmen Selective Availabilty (SA) und Anti-Spoofing (AS) zur Folge.

Mit Selective Availability wird die künstliche Verschlechterung der Satellitenuhr und der in den Navigationsdaten gesendeten Bahnparameter bezeichnet. SA ist mit Unterbrechungen seit 1990 eingeschaltet und erlaubt zivilen Nutzern eine Positionsgenauigkeit von 100 m in der Lage bzw. 150 m in der Höhe. Unter Anti-Spoofing wird die Verschlüsselung des präzisen P-Codes auf beiden Trägerphasen L1 und L2 zum sogenannten Y-Code verstanden. AS wird seit 1992 getestet und ist seit dem 31. Januar 1994 permanent eingeschaltet. Damit stehen dem zivilen Nutzer grundsätzlich nur noch der Standard Positioning Service (SPS) mit dem unverschlüsselten C/A-Code auf L1 und die absolute Positionierungsgenauigkeit unter SA zur Verfügung. Weiterentwicklungen in den Empfängertechnologien machen es aber möglich, auf L2 sowohl die Codemessungen unter Verschlechterung des Rauschverhaltens als auch die Phasenmessungen verfügbar zu machen. Dies ist für relative Verfahren von Belang. Autorisierte Nutzer (Militär) des Precise Positioning Service (PPS) können durch zusätzliche Empfängerkomponenten die ursprünglichen Satellitensignale wiederherstellen. Ihnen steht eine Absolutgenauigkeit von 20 m in der Lage und 30 m in der Höhe zur Verfügung.

Höhere Genauigkeiten auch für den zivilen Nutzer liefern DGPS Verfahren, die zunehmend auch in Echtzeit verfügbar sind (Real Time DGPS, RTDGPS). Sie werden nicht wesentlich durch SA gestört und erreichen Genauigkeiten unter 10 m bis zu wenigen Dezimetern. Als ein Beispiel sei das die Nord- und die Ostsee abdeckende Differential Beacon System mit Stationen auf Helgoland und Wustrow genannt, das Korrekturen im Seefunkfeuerfrequenzband bei Reichweiten bis 200 km aussendet (*Speckter* 1991). DGPS Dienste für Norddeutschland sind in *Bichtemann, Hankemeier* (1994) beschrieben.

Die Einrichtung von Präzisen DGPS-Diensten mit Übertragung von Trägerphaseninformationen ist aufgrund der verfügbaren Frequenzen mit ausreichender Datenkapazität und
der dadurch eingeschränkten Reichweite schwieriger umzusetzen. Verfahrenslösungen werden
unter anderem innerhalb des Hochpräzisen Permanten Positionierungsservice (HPPS) der
Niedersächsischen Landesvermessung (Augath et. al. 1993) in Niedersachsen untersucht. Das
HPPS als flächendeckendes Netz von Permanentstationen mit einem durchschnittlichen
Abstand von 30 - 50 km besitzt beste Voraussetzungen, um Mehrdeutigkeitslösungen in einem
flächendeckenden DGPS Dienst zu ermöglichen. Die Arbeitsgruppe GPS-Referenzstationen
der Arbeitsgemeinschaft deutscher Vermessungsverwaltungen (AdV) ist seit dem Herbst 1994
eingesetzt, um länderübergreifende Belange zu koordinieren und allgemeine Standards
festzusetzen. Ziel ist es, einen DGPS-Dienst der Vermessungsverwaltungen einzurichten. Der
gegenwärtige Zustand des SAPOS (Satellitenpositionierungsdienst der deutschen
Landesvermessungen) ist in Hankemeier (1996) dokumentiert (siehe auch Kapitel 4.1.4).

3 Vorbereitende Untersuchungen

3.1 Nutzeranforderungen der kooperierenden Stellen

Die nachfolgend vorgestellten Nutzeranforderungen berücksichtigen die von den kooperierenden Stellen gemachten Angaben über Genauigkeitsansprüche. Bestehende allgemeine Anforderungen der International Hydrographic Organization (IHO) und des Binnenpeilwesens werden grundsätzlich bestätigt.

3.1.1 Allgemeine Anforderungen

Die jeweiligen Nutzeranforderungen an Position und Lotung richten sich insbesondere nach den individuell durchzuführenden Aufgaben und deren Genauigkeitsforderungen. Allgemeine Kriterien für die Nutzung eines Positionierungssystem in der Gewässervermessung sind:

- Genauigkeit
- Reichweite
- Anwendbarkeit
- Wirtschaftlichkeit.

Diese Kriterien lassen sich analog auf Lotungsmessungen übertragen. Durch die Abhängigkeit der Lotungsmessung von der Positionsbestimmung besteht bereits ein enger Zusammenhang. Für die Verknüpfung von Positions- und Lotungsmessungen ist zusätzlich die Synchronisation beider Systeme erforderlich, so daß eine Unterscheidung in Position, Lotung, sowie Zeitmessung und Beschickung notwendig wird (Abbildung 3.1).

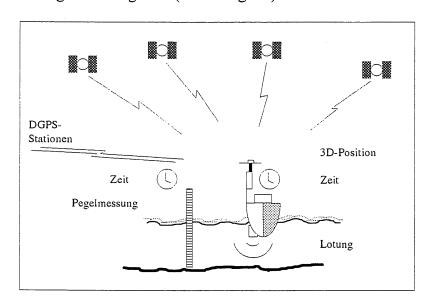


Abb. 3.1: Positionsbestimmung, Lotung und Beschickung

Für den Einsatz von GPS zur Positionsbestimmung in Form eines DGPS für Echtzeitanwendungen sind die genannten allgemeinen Kriterien sehr stark voneinander abhängig. Von Bedeutung ist insbesondere die Abhängigkeit von Genauigkeit und Reichweite. Betrachtet man nur den deutschen Küstenbereich, so ergeben sich maximale Enfernungen bis zu 400 km von der Küste. Im Binnenbereich ist eine maximale Reichweite des Systems von eher untergeordneter Bedeutung. Grundsätzlich sollte jedoch zwischen zwei Entfernungsgruppen, bis 20 km und größer als 20 km, unterschieden werden, die dann unterschiedliche Genauigkeitsgruppen darstellen. Ausgangspunkt für diese Einteilung sind besonders Aspekte der Datenübertragung (s. Kap. 4.1) und Entfernungsabhängigkeiten der OTW-Verfahren (s. Kap. 5.2).

3.1.2 Genauigkeitsanforderungen

Im Rahmen des Vorhabens ist insbesondere die Anforderung an die Tiefenmessung von Bedeutung. Allgemeine Empfehlungen zur Positions-und Tiefengenauigkeit werden von der International Hydrographic Organization (*IHO* 1987) in der Special Publication No. 44 (S-44) angegeben; sie sind vor allem für die Überwachung der Sicherheit auf Schiffahrtswegen definiert worden sind.

Tiefe	< 30 m	30 - 100 m	> 100 m
Genauigkeit	0.3 m	l m	1 % der Tiefe

Tab. 3.1: Tiefenmeßgenauigkeit laut IHO 1987

Ordnung	1	2	3	4
Beispiele für Einsatzgebiete	Kritische Schiff- fahrtsstraßen, Häfen mit minimaler Kiel- freiheit, Schiffs- anleger	Schiffahrtsstraße, empfohlene Routen, Häfen und Hafen- anfahrten	Nicht in 1. und 2. Ord. beschriebene Küstengebiete oder Gebiete mit bis zu 200 m Wassertiefe	Offshore
horizontale Positions- genauigkeit (2* σ)	+/- 2 m	+/- 5 m	+/- 20 m	+/- 150 m
Genauigkeit für reduzierte Tiefen (2* σ)	a = 0,2 m b = 0,0075	a = 0,5 m b = 0,013	a = 1,0 m b = 0,023	siehe 3. Ordnung
Genauigkeit des bathym. Modells (2* σ)	a = 0.2 m b = 0.0075	a = 1,0 m b = 0,026	a = 2,0 m b = 0,05	a = 5,0 m b = 0,05
Typische Anwendungs- bereiche	Handel, Ingenieurwesen und Bau, Naßbaggerei	Handel, Fischerei, Navigation auf und unter Wasser	Handel, Freizeit, Fischerei, Navigation auf und unter Wasser	Forschung und Entwicklung, Fischerei, Rohstofferkundung, Navigation unter Wasser

Tab. 3.2: "Minimum Standards of Hydrographic Surveys" (nach Rohde 1996)

mit a: Summe aller konstanten Tiefenfehler

b: Faktor der von der Tiefe d abhängigen Fehler

b*d: Tiefenabhängiger Fehler.

Aktuell wird seit 1992 eine neue Edition entwickelt, die jedoch noch nicht von der IHO veröffentlicht wurde. *Rohde* (1996) berichtet über die "Minimum Standards for Hydrographic Surveys", die vermutlich demnächst als Empfehlung für hydrographische Vermessungen ausgegeben werden.

Die detaillierten Anforderungen der einzelnen kooperierenden Stellen sind größtenteils bereits in einer Klassifizierung der Informationsgenauigkeit im Binnenpeilwesen berücksichtigt (Tabelle 3.3). Die Informationsgenauigkeit ist die Abweichung des Tiefenwertes eines beliebigen Sohlenpunktes von der tatsächlichen Tiefe mit einer Unsicherheit der einfachen Standardabweichung (Behrens 1993a, 1993b).

	Informationsgenauigkeit	Verfahren
Qualitätsstufe I	0.10-0.15 m	Meßsystem höchster Präzision
	(1 σ)	(Polarortung, direkte Beschickung)
Qualitätsstufe II	> 0.15 m	andere Meßsysteme
	(1 σ)	

Tab. 3.3: Klassifizierung der Informationsgenauigkeit/Peilgenauigkeit (nach *Behrens* 1993b)

Grundsätzlich ist zu bedenken, daß einer Steigerung der Lotungsgenauigkeit natürliche und technische Grenzen gesetzt sind. So wird die Genauigkeitsforderung für die Überprüfung von Strandvorspülarbeiten mit besser als 10 cm angegeben. Eine höhere Genauigkeit als 5 cm ist jedoch durch topographischen Strukturen (z.B. Riffeln) nicht sinnvoll (*Ragutzki* 1994). Ein technische Grenze stellt die Bestimmung der Reflektionsfläche bei schlickbedeckten Gewässersohlen dar, die der Tiefenmessung mit Echolotsystemen beeinflußt (*Aster und Meyer* 1990).

Die Genauigkeitsforderungen der kooperierenden Stellen werden grundsätzlich durch den IHO-Standard bzw. die Informationsgenauigkeit erfaßt. Die Informationsgenauigkeit ist insbesondere für Binnengewässer maßgebend, wohingegen die allgemeinen IHO-Forderungen im Küstenbereich und auf Hoher See angewendet werden können. Für den Bereich der Deutschen Bucht ergeben sich Wassertiefen von bis zu ca. 50 m, so daß zusammenfassend die Nutzeranforderung an die Tiefenmessung im deutschen Binnen-, Küsten- und Seebereich zwischen 10-30 cm liegt.

Gewässerbereich	Genauigkeitsanforderung der Ortung		
Hohe See	>> 10 m		
Küstenbereich	< 10 m		
Ästuarien und Tideflußgebiet	3-5 m		
Binnenwasserstraßen			
(freifließende, stauende Flüsse,	>> 1 m		
Kanäle)			
Binnenseen, Teiche	i.a. << 1 m		
kleine Flüsse, Bäche	i.a. << 1 m		

Tab. 3.4: Ortungsgenauigkeit nach Behrens (1992, 1993a)

Zur Vollständigkeit werden die Anforderungen an die Ortung in Tabelle 3.4 angegeben. Die Möglichkeiten der bisherigen Ortungsverfahren haben unterschiedliche Genauigkeitsklassen in Abhängigkeit von der Entfernung zur Küste definiert, die auch aus der Sicht der Verkehrsicherungspflicht und der Nutzeranforderungen durchaus sinnvoll sind. Der Einsatz von GPS bzw. DGPS hebt diese Notwendigkeit nicht vollständig auf. Aufgrund unterschiedlicher Zielrichtungen der kooperierenden Stellen muß jedoch auch beim Einsatz von GPS bzw. DGPS zwischen Küsten- und Binnenbereich sowie Hoher See unterschieden werden.

Da DGPS alle drei Koordinatenkomponenten mit vergleichbarer Genauigkeit liefert, ist bei vorgegebener Tiefengenauigkeit auch die Lagegenauigkeit definiert. Die Lagekoordinaten sind gegenüber der Höhe im allgemeinen um den Faktor 1 bis 1.5 besser zu erwarten. Die Anforderungen der Tabelle 3.4 können somit als zwingende Echtzeitanforderungen aufgefaßt werden, wobei bei der Verknüpfung von Positions- und Lotungssystem die jeweiligen Fehleranteile bzw. die wirksamen Fehleranteile des Gesamtsystems zu berücksichtigen sind. Auf der anderen Seite ermöglichen die Genauigkeitsanforderungen der Ortung grundsätzlich die Unterteilung in echtzeitfähige mittlere DGPS Genauigkeiten während der Meßfahrt und nachträglicher präziser Genauigkeit im Postprocessing.

3.2 Höhensysteme auf Binnengewässern und auf See

In der Hydrographie sind unterschiedliche Bezugssysteme in Gebrauch, die sich durch den Einsatz von GPS um das WGS 84 erweitert haben. Grundsätzlich werden, wie auch in der Landesvermessung üblich, zwei Bezugssysteme, jeweils für die Lage und für die Höhe, definiert. Auf die Lagebezugssysteme wird im folgenden nicht weiter eingegangen.

3.2.1 Bezugshorizonte an der Nordseeküste

Als Höhenbezug sind im Bereich der Deutschen Bucht und der Binnengewässer die folgenden Bezugshorizonte zu nennen:

- Seekartennull (SKN)
- Pegelnull (PN)
- Normal-Null (NN)
- WGS 84.

Die Tiefenangaben einer Seekarte sind auf das lokale Seekartennull (SKN) bezogen. Das Kartennull wird gewöhnlich so tief festgelegt, daß der tatsächliche Wasserstand nur selten darunter fällt. In gezeitenfreien Gewässern wie dem deutschen Teil der Ostsee wird das NN als Kartennull verwendet. In den Gezeitengebieten der Deutschen Bucht fällt jedoch der Wasserspiegel im allgemeinen bei jedem Niedrigwasser unter NN. Für das Küstenmeer bzw. für küstennahe Bereiche einschließlich Watten und Ästuare wurde deshalb 1982 einheitlich das jeweilige örtliche mittlere Springniedrigwasser (MSpNW) als SKN festgelegt (Schleider 1988). Er ergibt sich aus der Mittelung der größten negativen Werte der halbmonatlichen Ungleichheit in Niedrigwasserhöhe (NWH) und liegt unter der mittleren Niedrigwasserhöhe (MNWH) (Pijarowki 1984, BSH 1992). Für die Berechnung der halbmonatlichen Ungleichheit sollten Pegelbeobachtungen eines Jahres vorliegen.

Das SKN wird an vielen Pegeln im Küstenbereich jährlich neu bestimmt, wobei Änderungen um wenige Zentimeter auftreten. Die Festlegung des Seekartennulls dient insbesondere der Sicherheit der Schiffahrt in flachen Gewässern. Als Grundlage des Seekartennull ergibt sich eine insgesamt schwer beschreibbare Fläche, die zudem noch zeitlich veränderlich ist.

Für Wasserstandsbeobachtungen an Betriebspegeln wird das **Pegelnull** benutzt. Das Pegelnull ist einheitlich auf 5,00 m unter NN festgelegt, um negative Wasserstände zu vermeiden.

Die Höhenbezugsfläche des Deutschen Haupthöhennetz (DHHN) verläuft durch den Normal-Nullpunkt und wird als Normal-Null (NN) bezeichnet. Der ursprüngliche Normal-Nullpunkt von 1879 an der zerstörten Berliner Sternwarte bezog sich auf den durch Pegelmessungen festgelegten Nullpunkt des Amsterdamer Pegels und schließt somit an den mittleren Meeresspiegel der Nordsee an. Weil bei der Anlage des DHHN keine Schwerewerte zur Reduktion der Nivellementslinien vorlagen, wurde eine normalorthometrische Korrektion mit einer fiktiven Normalschwere angebracht. Die Höhenbezugsfläche ist somit nicht exakt das Geoid, sondern eine Annäherung an das Geoid (Augath und Kummer 1988). Das Normalnull des Deutschen Haupthöhennetzes liegt aufgrund von Unsicherheiten bei der Höhenübertragung und wegen der fehlenden Schweremessungen entlang der Nivellementslinie ca. 14 Zentimeter über dem mittleren Wasserstand am Amsterdamer Pegel (Pijarowski 1984, Rosengarten 1987).

Das Referenzsystem für das GPS ist das World Geodetic System von 1984 (WGS 84). Im Gegensatz zu dem NN- und SKN-Höhensystemen handelt es sich um ein globales, erdfestes, geozentrisches und dreidimensional kartesisches Koordinatensystem. Ellipsoidische Koordinaten sind auf einem Referenzellipsoid definiert, wobei die ellipsoidischen Höhen rein geometrisch und vom Schwerefeld unabhängig sind. Das Referenzellipsoid ist ein dem Geoid bestangepaßtes Rotationsellipsoid, auf dem die Differenzen zwischen ellipsoidischer Höhe und Geoid minimiert werden.

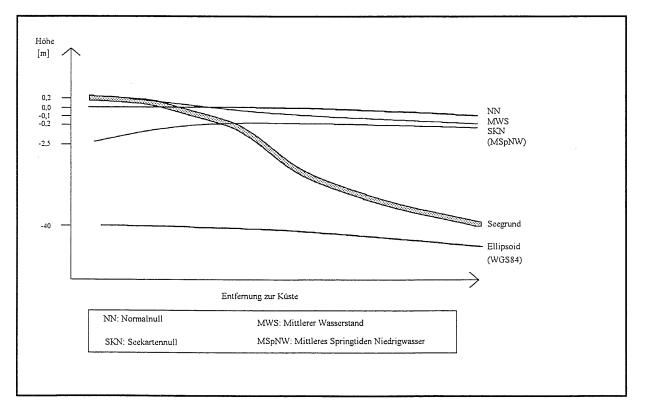


Abb. 3.2: Höhenbezugssysteme im Nordseeküstenbereich (nach Ellmer 1993)

3.2.1 Beschickung von Lotungsmessungen

Der Begriff Beschickung beschreibt die Zuordnung der Tiefenwerte zu einem Höhenbezugssystem. Dabei werden grundsätzlich zwei Vorgehensweisen getrennt:

- die direkte oder geometrische Höhenübertragung auf das Meßschiff
- die indirekte Höhenübertragung über den Wasserspiegel.

Bei der direkten Höhenübertragung wird das Schiff von Land durch ein begleitendes Nivellement oder trigonometrische Höhenbestimmung beobachtet. Die Genauigkeit und Reichweite wird durch Refraktionseinwirkungen stark eingeschränkt.

Die indirekte Höhenübertragung (siehe Abb. 3.3) geht davon aus, daß sich der Wasserspiegel an einem Pegel gleich dem Wasserspiegel am Peilschiff verhält oder um bestimmbare Korrekturen abweicht. Dazu können lokale Pegel für die Vermessung installiert werden oder es kann auf vorhandene Pegel im Küstenbereich zurückgegriffen werden. Zugleich muß die Höhendifferenz des Pegelnullpunkts zum Bezugssystem bekannt sein. Der Stand des Wasserspiegels zum Bezugshorizont läßt sich aus der Summe von Höhendifferenz und Pegelwert ableiten. Der Wasserspiegel am Pegel unterscheidet sich bei ruhiger See und kurzen Distanzen nur um wenige Dezimeter von dem Wasserspiegel am Peilschiff. Im Küstenbereich ist die Beschickung vor allem durch die Gezeiten beeinflußt. Als zusätzliche Einflüsse ist besonders das Heben und Senken des Schiffes in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Wassertiefe (Saugwert bzw. Squat) zu nennen. Der Squateffekt läßt sich nur schwer modellieren und kann bei Meßschiffen kleiner Bauweise bis zu 20 cm betragen (*Braun* 1992, *Heddinga* 1993).

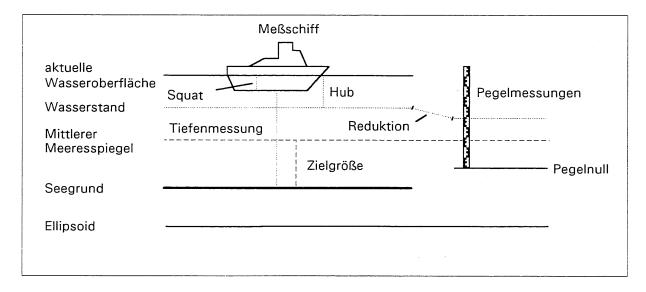


Abb. 3.3: Prinzipskizze zur indirekten Beschickung über Pegelmessungen

Der Einfluß der Gezeiten kann als fortschreitende Tidewelle mit unterschiedlichen Amplituden betrachtet werden. Nur wenige Orte haben zur gleichen Zeit Hoch- bzw. Niedrigwasser, so daß am Pegel- und Lotungsort nicht gleichzeitig gleiche Wasserstände eintreten. Zudem muß der unterschiedliche Tidenhub abhängig vom Ort berücksichtigt werden. Diese Einflußgrößen werden in Wasserstandserrechnungskarten (WEK) jeweils bezogen auf einen Pegel dargestellt, in dem Linien gleichen Hochwassereintritts und Linien gleichen mittleren Springtidenhubs dargestellt werden.

Der mittlere Fehler einer Beschickung wird laut *Rohde* (1989) in der Deutschen Bucht mit einem Dezimeter angenommen. *Wachsmuth und Kögel* (1990) geben eine Genauigkeit der Tiefenmessung aufgrund der Beschickung und Echolotung von \pm 20 cm an.

Das präzise DGPS ist als direktes Verfahren der Beschickung von Lotungsmessungen einzuordnen. Die dreidimensionale Position einer Antenne an Bord des Meßschiffes wird hochgenau bezüglich einer Referenzstation an Land bestimmt. Die Koordinatendifferenzen beziehen sich auf das Referenzellipsoid WGS84. Eine Datumstransformation, bei der über große Entfernungen auch Geoidinformationen einbezogen werden müssen, liefert die Position in einem in der Hydrographie üblichen System. Die Antennenposition muß auf den Schwinger reduziert werden; für hohe Genauigkeiten ist die Berücksichtigung der Schiffslagewinkel (Rollen, Stampfen, Kurs) notwendig. Zusätzliche Informationen über Hub und Squat sind zunächst nicht notwendig. Die Genauigkeit der GPS-Positionierung mit gelösten Mehrdeutigkeit liegt im allgemeinen unter 10 cm für das Antennenphasenzentrum.

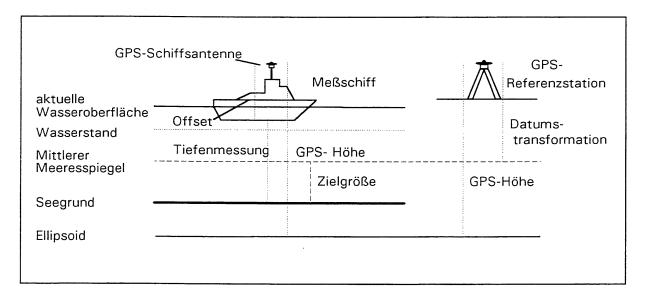


Abb. 3.4: Prinzipskizze zur direkten Beschickung mit GPS-Verfahren

Die Genauigkeiten des indirekten Verfahrens über Pegelmessungen und der direkten Beschickung mit GPS konnten anhand eines Vergleiches von Pegeldaten und Ergebnissen einer Peilfahrt mit dem Vermessungschiff Nynorderoog in Zusammenarbeit mit der Forschungsstelle Küste vor Norderney bestätigt werden (siehe *Heimberg* 1994). Die GPS Auswertung erfolgte im Postprocessing mit der GEONAP Software. Die Transformation vom WGS 84 in das Landessystem (NN-Höhe) wurde über einen identischen Punkt vorgenommen (*Böder* 1994). Ein Vergleich der DGPS Höhenbestimmung mit den Pegelablesungen ist in den Untersuchungen kleiner 10 cm ohne Berücksichtigung von Schiffsneigungen (siehe Kap. 5.1.3).

3.2.2 Verknüpfung der Höhensysteme

Die Beschickung der Lotungsmessungen wurde weitestgehend unabhängig von den Höhenbezugssystemen dargestellt. Die Verknüpfung der Höhensysteme verlangt im Idealfall einen Übergang von jedem Höhensystem in ein anderes. Die Höhensysteme unterscheiden sich jedoch aufgrund ihrer Referenzflächen

- gemittelter Meeresspiegel
- Äquipotentialfläche
- Rotationsellipsoid.

Das Geoid ist definiert als eine Äquipotentialfläche, die im Sinne einer Ausgleichung den mittleren Meeresspiegel approximiert. Ein mittlerer Meeresspiegel (Mean Sea Level, MSL) stellt jedoch durch unterschiedliche physikalische Einflüsse keine Äquipotentialfläche (*Rapp und Balasubramania* 1992) dar. Die Differenz zwischen Geoid und MSL wird im internationalen Sprachgebrauch im allgemeinen mit Sea Surface Topography (SST) bezeichnet. Das SKN bezieht sich wie das MSL auf einen über einen längeren Zeitraum gemittelten und örtlich unterschiedlichen Wasserspiegel. Demgegenüber sind die ellipsoidischen Höhen rein geometrisch in bezug auf ein Referenzellipsoid definiert.

Eine Verknüfung der Höhensysteme wird zweckmäßigerweise unterteilt in die Übergänge ellipsoidische Höhe auf orthometrische Höhe sowie orthometrische Höhe auf Seekartennull.

Verknüpfung ellipsoidischer und orthometrischer Höhe

Zwischen ellipsoidischer Höhe und orthometrischer Höhe besteht mit der Geoidundulation die fundamentale Beziehung (*Torge* 1975):

$$h = H + N$$

mit h ellipsoidische Höhe

H orthometrische Höhe

N Geoidundulation.

Grundsätzlich besteht somit die Möglichkeit, über die ellipsoidische Höhe, bestimmt mit GPS, sowie der Geoidundulation Lotungsmessungen z.B. auf NN zu reduzieren. Globale Geoidmodelle liefern für den Meeresbereich Geoidundulationen mit einer Genauigkeit von ± 25 cm (*Rapp und Balasubramania* 1992). Regionale oder lokale Geoidmodelle besitzen Genauigkeiten von wenigen Zentimetern, sind jedoch räumlich begrenzt.

Mit der Transformation der Höhen ist meist ein allgemeiner Datumsübergang vom globalem Satellitendatum WGS84 zum lokalen Datum verbunden (siehe Seeber 1993). Die Anwendung auf Gewässern, insbesondere im Küstenbereich, wird dadurch erschwert, daß der mittlere Wasserspiegel (MSL) vom Geoid um die SST abweicht. Zusätzlich wirken zeitliche Änderungen auf die SST ein, so daß nach Carrera und Vanicek (1995) gilt:

$$SST(t) = MSL(t) - Geoid(t)$$
.

Die Differenz zwischen aktuellem Wasserspiegel zum Zeitpunkt einer Messung und dem Geoid wird mit Ocean Topography h₀ bezeichnet (*Visser et al.* 1993, *Tsaoussi und Koblinski* 1993). Sie setzt sich aus einem semipermanenten Anteil, der dynamischen Höhe der Ozeanoberfläche über dem Geoid (Dynamic Sea Surface Topography SST) und der zeitlich veränderlichen Sea

Surface Variability zusammen. Unter der letzteren Bezeichnung werden die Einflüsse der Gezeiten der Ozeane und der festen Erde h_T und die Auswirkungen des Drucks atmosphärischer Massen h_a zusammengefaßt.

$$h_0 = SST + h_T + h_a$$

Die Größenordnung der SST kann bis zu 2 m erreichen (Vanicek und Krakiwsky 1986, Rapp und Balasubramania 1992), im Bereich der Deutschen Bucht beträgt sie zwischen -10 cm und +20 cm (Ellmer 1994). Im wesentlichen wird die SST durch permanente Meereströmungen verursacht. Zusätzlich wirken jedoch auch zeitliche lokale und regionale Einflüsse wie Änderung des Salzgehaltes und der Temperatur (Dichteschichtung), Windeinfluß und Luftdruckeinfluß. Auswirkungen haben jedoch auch Änderungen des Strömungsverhaltens, Änderung des Flußzulaufs (Schmelzwasser), Änderung der Meeresbodentopographie durch Ablagerungen etc. Die Größe der einzelnen zeitlichen Einflüsse können mehrere Zentimeter betragen. Für den Nordseebereich wurden Windeinfluß und Luftdruckeinfluß jeweils mit 4-5 cm abgeschätzt (Lassen 1989).

Verknüpfung orthometrische Höhe und Seekartennull

Ist als Höhenbezugssystem Seekartennull definiert, so muß der Abstand zwischen Geoid und Seekartennull bekannt sein, um orthometrische Höhen zu reduzieren. Dies erlaubt dann ebenfalls die Reduktion ellipsoidischer Höhen mit orthometrischen Höhen als Zwischenschritt. Die Abweichungen betragen in Abhängigkeit vom Tidenhub einige Dezimeter (-0.2 m) bis zu einigen Metern (-2.5 m) (*Ellmer* 1994). SKN ist eine stetige, orts- und zeitabhängige Fläche. Für eine Verknüpfung wird versucht, den Unterschied zwischen NN und SKN flächenhaft mit Küstenpegeln oder Hochseepegel zu modellieren (*Schleider* 1993). Die Genauigkeit derartiger Modelle ist nicht bekannt.

3.3 Verknüpfung der DGPS-Höhe mit der Lotungsmesssung

Die dreidimensionalen Koordinaten der GPS Antenne an Bord des Meßschiffes müssen auf das Zentrum des Tiefenmessystem zentriert werden. Im allgemeinen handelt es sich bei akustischen Systemen um den sogenannten Echolotschwinger. Um die Beziehung zwischen Antenne und Schwinger herstellen zu können, müssen beide Punkte in einem dreidimensionalen Schiffs-Koordinatensystem bekannt sein. Das Schiffs-Koordinatensystem bewegt sich aufgrund veränderlichen Rotationen um die Schiffsachse.

Das mathematische Schiffs-Koordinatensystem sei gegeben durch den Schwerpunkt des Schiffes als Ursprung, der Längsachse als x-Achse mit positiver Richtung voraus, der Querachse als y-Achse mit positiver Richtung steuerbords (in Fahrtrichtung rechts) und der Vertikalachse als z-Achse. Die Schiffsbewegungen lassen sich beschreiben durch drei Translationen in Richtung der Achsen (Schnellen, Versetzen, Tauchen) und drei Rotationen um die Achsen (Rollen, Stampfen, Gieren). Abbildung 3.5 gibt eine Übersicht über die möglichen Schiffsbewegungen und -neigungen und deren Bezeichnungen.

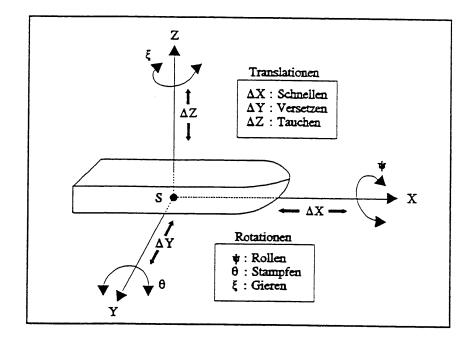


Abb. 3.5: Komponenten der dreidimensionalen Schiffsbewegung

Die Bezeichnungen samt Vorzeichenregelung zeigt Tabelle 3.5:

Translation in Richtung	positiv nach	deutsche Bezeichnung	englische Bezeichnung
X	vorwärts	schnellen	surge
у	steuerbord	versetzen	sway
Z	abwärts	tauchen	heave
Rotation um	positiv, wenn	deutsche Bezeichnung	englische Bezeichnung
X	steuerbord niedriger als backbord	rollen	roll
у	Bug höher als Heck	stampfen	pitch
Z	Bug nach steuerbord	gieren	yaw

Tab. 3.5: Komponenten der dreidimensionalen Schiffsbewegungen (aus Böder 1994)

Die Schiffsbewegungen und -neigungen sind zum Zeitpunkt der Messung zu berücksichtigen, so daß eine Synchronisation mit dem Positionierungs- und Lotungssystem notwendig ist. Bei ausreichend genauer Synchronisierung haben die Translationen auf die Lagegenauigkeit einen vernachlässigbar geringen Einfluß.

Die Synchronisation kann durch die Steuerung über eine gemeinsame Uhr geschehen, wobei sich die hochgenaue Zeitinformation des GPS anbietet. Ausgehend von einer Schiffsgeschwindigkeit von einem Meter pro Sekunde in der Vertikalen und einer gewünschten Genauigkeit der Verknüpfung von einem Zentimeter ist eine Zeitsynchronisation auf zehn Millisekunden notwendig. Um eine Lagegenauigkeit von einem Meter bei Schiffsgeschwindigkeiten von fünf Metern pro Sekunde in der Horizontalen erreichen zu können, muß die Synchronisation eine Genauigkeit von 0.2 Sekunden erreichen.

3.3.1 Transformation der GPS Antennenkoordinate auf den Schwinger

Für die weiteren Betrachtungen wird von einem vernachlässigbaren Einfluß der Zeitkomponente ausgangen. Es ist offensichtlich, daß die Translationen in der durchzuführenden Transformation auf einen gemeinsamen Bezugspunkt keine Auswirkungen haben. Die Transformation kann so auf die drei Rotationen des Differenzvektors Antenne-Schwinger aus dem Schiffs-Koordinatensystem in das örtliche Bezugssystem beschränkt werden. Zentrum der Rotationen ist der Schwerpunkt des Schiffes, der im folgenden als fest angenommen werden kann. Die Transformationsgleichung lautet dann:

$$X_S = X^{GPS} + R(\alpha \Theta \Psi) \cdot X_S^{GPS}$$

mit

$$R(\alpha\Theta\Psi) = \begin{cases} \cos\alpha\cos\Theta & -\sin\alpha\cos\psi & \sin\alpha\sin\Psi \\ & +\cos\alpha\sin\Theta\sin\Psi & +\cos\alpha\sin\Theta\cos\Psi \end{cases}$$

$$R(\alpha\Theta\Psi) = \begin{cases} \sin\alpha\cos\Theta & \cos\alpha\cos\psi & -\cos\alpha\sin\Psi \\ & +\sin\alpha\sin\Theta\sin\Psi & +\sin\alpha\sin\Theta\cos\Psi \end{cases}$$

$$-\sin\theta & \sin\Psi\cos\Theta & \cos\theta\cos\Psi \end{cases}$$

Die Neigungsbestimmung kann über Neigungsmesser erfolgen. Eine weitere Möglichkeit zur Messung ist der Einsatz von mindestens drei GPS-Empfängern an Bord, deren Antennenraumstrecken bekannt sind. Mit dieser Informationen ist es möglich, die Trägerphasenmehrdeutigkeiten zu lösen und so die Lage der Antennen zueinander im WGS 84 zu berechnen. Aus den Lageveränderungen lassen sich Rückschlüsse auf die Schiffsneigungen sowie den Kurs ziehen (siehe *Heimberg* 1994).

Die Auswirkung der Neigungen auf die Genauigkeit der Lage- und Höhenbestimmung des Schwingers ist abhängig von der Entfernung der GPS-Antenne zum Schwinger (Abb. 3.6).

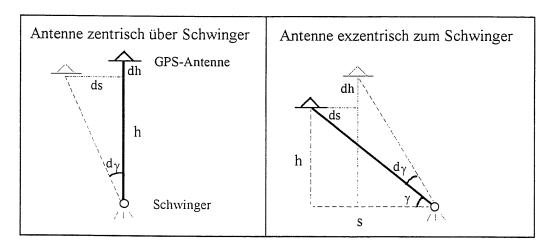


Abb. 3.6: Auswirkung der Schiffsneigung dγ auf die Lage- und Höhengenauigkeit des Schwingers

Als vereinfachtes Modell sei angenommen, daß der Schwinger unter dem Schwerpunkt des Schiffes angebracht ist. Eine Schiffsneigung dγ in Richtung der Lagekomponente s wirkt sich auf die Höhe h und auf die Lagekomponente s aus (*Böder* 1994):

$$dh = |h - \sin(\gamma \pm d\gamma) \cdot (s^{2} + h^{2})^{1/2}|$$

$$ds = |s - \cos(\gamma \pm d\gamma) \cdot (s^{2} + h^{2})^{1/2}|$$

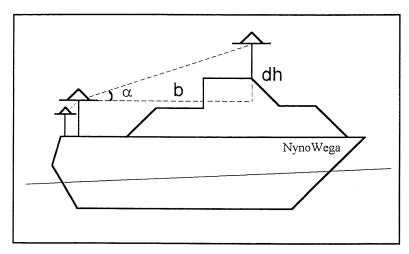
Die Tabelle 3.6 gibt Aufschluß über Lagefehler ds und Höhenfehler dh bei veränderlicher Schiffsneigung dγ, Höhenunterschied h und Lageunterschied s. Beispielhaft wurden die Fehleranteile für verschiedene Ablagen eines Meßschiffes berechnet. Die Angaben gelten allgemein für eine Schiffsneigung zur Horizontalebene um den Winkel dγ, unabhängig davon, ob sie von Rollen oder Stampfen verursacht wird.

		dγ 0,1°		dγ 1°		d γ 3 °		d γ 5 °	
		ds	dh	ds	dh	ds	dh	ds	dh
	s = 0 $h = 5.0$	0.009	0	0,087	0,001	0,262	0,007	0.436	0,019
γ = 90°	s = 0 $h = 10$	0,017	0	0,175	0,002	0,523	0.014	0.872	0,038
	s = 0 h = 25	0,044	0	0,436	0,004	1,308	0,034	2,179	0,095
γ = 45°	s = 5.0 h = 5.0	0,009	0,009	0,088	0,087	0,269	0,255	0,455	0,417
Nyno	siehe oben	0,027	0,012	0,272	0,115	0,816	0,335	1,358	0,533

Tab.3.6: Auswirkung von Schiffsneigungen auf die Transformation GPS-Antenne - Schwinger; Angabe in [m]

Grau unterlegt sind die Werte, die die Genauigkeit der Beschickung beeinflussen. Als Grenzwerte werden hier 1 cm in der Höhenkomponente und 0,5 m in der Lagekomponente verwendet. Es wird ersichtlich, daß bereits Neigungswerte von 3° Genauigkeitseinbussen von mehreren Zentimetern hervorrufen können. Die Werte in der Spalte "Nyno" entsprechen einem Aufbau während einer Meßfahrt mit der Nynorderoog vor Norderney. Die Ablagewerte zum Echlotschwinger betrugen dx = 7,07 m, dy = 0,36 m und dh = 6,80 m.

Wie bereits erwähnt, kann zur Bestimmung der Schiffsorientierungen ein Array aus mindestens zwei, sinnvollerweise jedoch aus mindestens drei GPS-Antennen verwendet werden. Die Genauigkeit der Parameter hängt wesentlich von der Genauigkeit ab, in der die Antennen in das Schiffssystem eingemessen sind. Zur Fehlerabschätzung wird die Auswirkung einer falschen Einmessung in horizontaler (b) und vertikaler Komponente (dh) auf die in Abb. 3.7 gezeigte Basis zweier GPS-Antennen gezeigt.



- b: Basis längs einer Schiffsachse
- dh: Unterschied in der Höhenkomponente
- α: Winkel, der um die Schiffslage verändert wird (hier: Stampfen)

Abb. 3.7: Zur Auswirkung eines Einmessfehlers auf die Bestimmung der Schiffslagekomponenten

Die folgenden Gleichungen beschreiben die Berechnung des Winkels α und die Auswirkung der Fehler in der Höhe dh (=>ddh) bzw. der Basis b (=>db).

$$\alpha = \arctan \frac{dh}{b}$$

$$d \alpha = \sqrt{\frac{1}{b^2 + dh^2} * ddh^2 + \frac{dh^2}{(b^2 + dh^2)^2} * db^2} * \rho$$

Exemplarisch wird d α für einige Fälle in der Tabelle 3.7 berechnet. Sie zeigt die Auswirkungen der Fehler ddh und db auf den Winkel α bei unterschiedlichen Höhenunterschieden dh und Basislängen b zwischen den Antennen.

dh →	≤0.10			1 m			20 m			
		m								
$b \rightarrow$	5 m	10 m	50 m	5 m	10 m	50 m	5 m	10 m	50 m	
db↓				ddh	=	0				
1 cm	≤ 0.003	≤ 0.001	0.000	0.022	0.006	0.000	0.027	0.023	0.004	
5 cm	≤ 0.011	≤ 0.003	0.000	0.110	0.110 0.028 0.001			0.135 0.115		
ddh ↓				db	=	0				
0,1 cm	0.011	0.006	0.001	0.011	0.006	0.001	0.003	0.003	0.001	
1 cm	0.115	0.057	0.011	0.112	0.057	0.011	0.028	0.026	0.011	
5 cm	0.573	0.286	0.057	0.562	0.285	0.057	0.139	0.128	0.053	

Tab. 3.7: Auswirkung falscher Antenneneinmessungen in das Schiffssystem auf die Neigungswinkel Rollen und Stampfen

Grau unterlegt sind die Auswirkungen, die eine Genauigkeitseinbusse für die Zentrierung der Antennenposition erbringen können. Als Grenzwert ist hier 0°,1 gewählt worden. Dieser Wert muß in Abhängigkeit der GPS-Antennenposition für jedes Schiff berechnet werden, siehe dazu die Betrachtungen zu der Tabelle 3.6. Erkennbar ist, daß eine möglichst große Basis zur Messung der Neigung verwendet werden sollte. Die Tabelle bezieht sich besonders auf die

Bestimmung von Rollen und Stampfen. Für die Bestimmung des Kurses gelten ähnliche Bedingungen, man vertausche jedoch den Höhenunterschied dh mit einer seitlichen Ablage dy von der Schiffslängsachse.

Die Einmessung der Antennen untereinander kann einfacher über GPS erfolgen. Dies gelingt üblicherweise mit Subzentimetergenauigkeit. Die Einmessung der Antennen in das Schiffssystem muß den Gegebenheiten angepaßt werden (Tachymetermessungen auf Werft, Aufnahme identischer Punkte mit GPS, usw.).

Erprobung einer Schiffslagebestimmung

Im Juli 1994 wurde eine Peilfahrt der NYNORDEROOG vor Norderney begleitet. Der gewonnene Datensatz sollte die Analyse der Schiffsorientierung mit GPS ermöglichen. Dazu wurden vier Empfänger Ashtech Z12 an Bord genommen. Ein weiterer Z12-Empfänger wurde auf Norderney als Referenzstation betrieben.

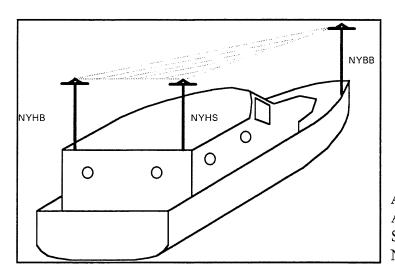


Abb. 3.8: Anordnung der Antennen zur Bestimmung der Schiffsorientierung auf der NYNORDEROOG

Die Bestimmung der Parameter mit GPS erfolgt aus der simultanen Messung mit mindestens drei Antennen an Bord. Die Zwischenantennenstrecken müssen als bekannt vorausgesetzt werden. Um die Beziehung zum Tiefenmesser und zur Bezugsfläche der Schiffsneigungen herstellen zu können, müssen die Antennen in das Schiffssystem eingemessen sein. Abb. 3.8 zeigt den Aufbau der Antennen an Bord der NYNORDEROOG.

Die Einmessung der Antennen in das auf die Längsachse bezogene Schiffssystem erfolgte mit einem Meßband. Das aus den GPS-Antennen gebildete Dreieck hat aufgrund der geringen Größe des Schiffes einen ungünstigen Zuschnitt. Die für die Bestimmung des Rollens relevante Basis NYHB, NYHS ist nur 3 m lang, die Basis zur Ermittlung der Kurses und des Stampfens beträgt 13,08 m. Um eine Genauigkeit von 0.1° des TSS-Systems (s.o.) erreichen zu können, muß bei diesem Aufbau die Differenz der Höhenkomponenten für das Rollen auf 5 mm, für das Stampfen auf 23 mm bekannt sein.

Die Auswertung erfolgte mit der Software GEONAP. Bei dieser Auswertung wurde nicht die Information bekannter Zwischenantennenstrecken genutzt, sondern die Auswertung erfolgte relativ zu dem Referenzpunkt an Land. Somit können z.B. unabhängig von der Einmessung mit Meßband die Zwischenantennenstrecken aus den Koordinatenunterschieden betrachtet werden. Die Abb. 3.9 zeigt die Zwischenantennenstrecke generiert aus der PDGPS - Lösung für eine der langen Basislinien NYHS,NYBB.

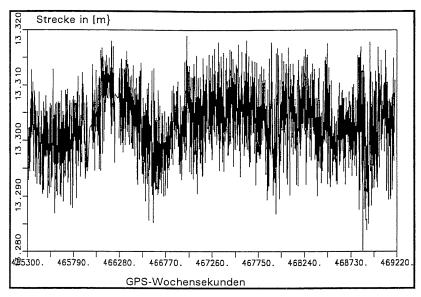


Abb. 3.9: Zwischenantennenstrecke NYBB, NYHB in [m] gegenüber der GPS-Zeit in Sekunden (1 Std. 10 min); Soll aus Meßbandmessung: 13.30 m

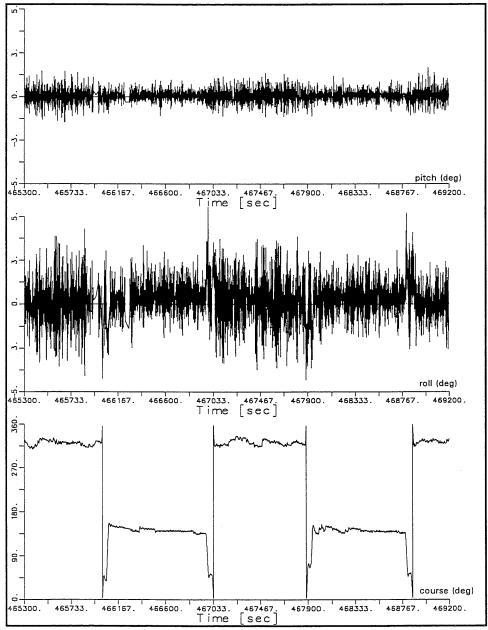


Abb. 3.10: Stampfen, Rollen und Kurs aus GPS Messungen

Die Abweichungen in Abb. 3.9 betragen maximal 2 cm vom Sollwert, meistens liegen sie jedoch unter einem Zentimeter. Es handelt sich hier nicht um reines Meßrauschen, sondern es müssen hier noch Schiffsdeformationen und vor allem die Bewegungen der 2 m langen Antennenmasten, verursacht durch Erschütterungen des Schiffes, als Einflußgrößen für die Abweichungen genannt werden. Das Rauschen der Höhendifferenz, die maßgeblich zur Berechnung der Neigungswinkel ist, liegt deutlich unter 1 cm. Das Ergebnis der Schiffslageberechnung ist in der Abb. 3.10 dargestellt.

Für das Stampfen werden Größenordungen von bis zu +/- 1.5°, für das Rollen +/- 3° erreicht. In Momenten der Kurvenfahrt zwischen den Profilen (siehe Kurs in Abb. 3.10) sind Spitzen in dem Rollverhalten zu erkennen. Die Größenordnung der Parameter ist durchaus realistisch. Ein Vergleich mit anderen Sensoren ist nicht gegeben. Aus Tabelle 3.6 wird ersichtlich, daß derartige Bewegungen einen Fehler von bis zu 3 dm bei ungünstig montierter Antenne (Beispiel Nynorderoog) bewirken. Die Anbringung der GPS-Antenne vertikal über den Schwinger ist vorzuziehen. Im Falle der Nynorderoog war dies aufgrund der Schiffsaufbauten nicht ohne größeren Aufwand möglich.

3.4 Untersuchungen zu wirksamen projektspezifischen Fehleranteilen

Als wesentliche projektspezifische Fehleranteile müssen die künstliche Verschlechterung des GPS durch *Selective Availability* (SA) und die Aktivierung von *Anti-Spoofing* (A-S) angesehen werden. SA verschlechtert Uhr- und Bahninformationen der Satelliten. A-S verhindert den direkten Zugang zur (vollen) Trägerphase L2, die für schnelle Mehrdeutigkeitslösungen (OTW-Verfahren) benötigt wird.

Der Einfluß der Selective Availability kann vernachlässigt werden, wenn die Aufdatierungsrate der Korrekturdaten in einem DGPS-System kleiner ist als die Änderungsrate des durch SA hervorgerufenen Fehlers. Der verbleibende Fehlereinfluß ist demnach abhängig von dem Verhältnis zwischen der Änderung des SA-Fehlers und der Aufdatierungsrate. Im Zusammenhang mit der Frage nach der notwendigen Aufdatierungsrate ist von Bedeutung, ob ausschließlich Streckenkorrekturen oder auch die 1. Ableitung der Streckenkorrekturen, also die Änderungsrate der Streckenkorrekturen übertragen wird.

Die Abbildung 3.11 zeigt den typischen Verlauf des sich unter SA-Bedingungen ergebenden Streckenfehlers zu einzelnen Satellitenbeobachtungen. Neben dem Streckenfehler ist in der Abbildung der Geschwindigkeitsfehler (1. Ableitung des Streckenfehlers) sowie der Beschleunigungsfehler (2. Ableitung des Streckenfehlers) dargestellt.

Werden bei der Datenübertragung ausschließlich Streckenkorrekturen übertragen, so ergibt sich der durch die Aufdatierungsrate bedingte Fehlereinfluß durch die mögliche Veränderung des Streckenfehlers. Aus der Darstellung des Geschwindigkeitsfehlers können maximale Beträge von \pm 0.3 m/s erkannt werden. Bei einer Aufdatierungsrate von 10 sec würde dies einen Streckenfehler von bis zu 3 m bedeuten.

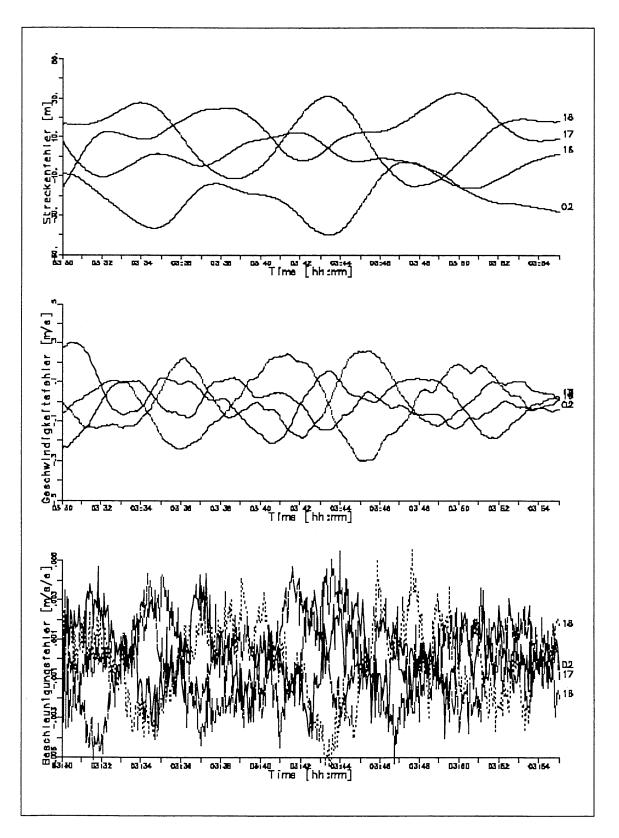


Abb. 3.11: Strecken-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsfehler unter SA

Üblicherweise werden in der Praxis neben den Streckenkorrekturen auch Geschwindigkeitskorrekturen übertragen. Die notwendige Aufdatierungsrate, um den Einfluß des *Selective Availability* vernachlässigen zu können, ergibt sich aus der Betrachtung des Beschleunigungsfehlers, d.h. der 2. Ableitung des Streckenfehlers. In der Abb. 3.11 sind maximale Beträge von ± 0.005 m/s² für den Beschleunigungsfehler zu erkennen. Bei einer Aufdatierungsrate von

30 sec entspricht dies einem Streckenfehler von 2.25 m. Unter der Annahme eines PDOP von etwa 3 erhält man damit einen Positionsfehler von etwa 6.7 m.

Im Falle der Aktivierung der A-S-Technik wird der bisherige P-Code durch Verschlüsselung mit einer nicht veröffentlichten W-Codefolge in die allgemein mit Y-Code bezeichnete Codefolge überführt (*Breuer u.a.* 1993). Der präzise P-Code steht damit für den zivilen Nutzer nicht mehr zur Verfügung. Eine weitere Einschränkung ist darin zu sehen, daß die L2-Trägerphaseninformation wegen des auf L2 nicht verfügbaren C/A-Codes nicht mehr rekonstruiert werden kann. Für viele geodätische Anwendungen und insbesondere für die sogenannten schnellen Mehrdeutigkeitslösungen hat die Verfügbarkeit des P-Codes sowie der Zugang zu der vollständigen L2-Trägerphaseninformation eine zentrale Bedeutung.

Die Empfängerhersteller haben in jüngerer Zeit neue Verfahren entwickelt, damit auch unter A-S-Bedingungen der Zugang zu der L2-Trägerphase gewährleistet bleibt. Die Vorteile dieser Beobachtungsgröße können somit weiterhin für die hochgenaue geodätische Punktbestimmung sowie für die präzise kinematische Positionsbestimmung genutzt werden.

Die unterschiedlichen Verfahren bezeichnet man als:

- "einfache" Quadriertechnik (Squaring)
- Code- unterstützte Quadriertechnik
- L1/L2- Kreuzkorrelation
- "P-W-Tracking"- Methode.

Auf eine Beschreibung der verschiedenen Verfahren soll an dieser Stelle verzichtet werden. Eine ausführliche Darstellung der unterschiedlichen Techniken sowie der jeweiligen Vor- und Nachteile findet man in *Breuer u.a.* (1993), *Ashjaee und Lorenz* (1993). Zusammenfassend kann jedoch festgestellt werden, daß je nach Empfängertechnik deutliche Unterschiede in der Qualität der L2-Trägerphasenmessung (volle Wellenlänge bzw. halbe Wellenlänge und Rauschniveau der Phasenmessung) bestehen. Die Ideallösung, wie sie bei Verfügbarkeit des P-Codes erreicht wird (P-Code Kreuzkorrelation), kann mit keiner der genannten Techniken erreicht werden. Die "einfache" Quadriertechnik erfüllt diese Aufgabe am schlechtesten (halbe Wellenlänge). Bedingt durch das hohe Rauschniveau kommt es bei niedrigen Elevationen zu verstärkten Meßdatenausfällen der L2-Trägerphasenbeobachtung. Die Methoden der Codeunterstützten Quadriertechnik (halbe Wellenlänge), der L1/L2- Kreuzkorrelation und der sogenannten "P-W-Tracking"-Methode (je mit voller Wellenlänge) unterscheiden sich in der Qualität ihrer Beobachtungsergebnisse (L2-Trägerphase) nur unwesentlich. Die nachfolgende Tabelle 3.9 beschreibt das bei den unterschiedlichen Verfahren zu erwartende Signal/Rauschverhältnis und die daraus resultierende (theoretische) L2-Phasenmeßgenauigkeit.

Eingangssi- P-Code Kreuz- gnal korrelation				Code- unt Quadrier		L ₁ /L ₂ -Kreuz- korrelation		P-W-Traking Methode		
[db Hz]	[db Hz]	[mm]	[db Hz]	[nun]	[db Hz]	[nun]	[db Hz]	[mm]	[db Hz]	[mm]
32	32	0.9	-6	-	7	17.1	10	12.0	18	4.8
42	42	0.3	14	7.6	27	1.7	30	1.2	28	1.5

Tab. 3.9: Signal/Rauschverhältnis und resultierende L2-Phasenmeßgenauigkeit (*Breuer u.a.* 1993)

4 Präzise GPS-gestützte Positionsbestimmung in Echtzeit

4.1 Datenübertragung der Korrekturen

Die auf der Referenzstation generierten Korrekturen müssen über Kommunikationskanäle in einem erkennbaren Format auf die mobile Station übertragen werden. Die Definition des Datentyps und der Datenrate sind mit dem generellen Problem der Datenfernübertragung gekoppelt, das kurz zusammengefaßt und bewertet wird. Auf internationaler Ebene sind Bestrebungen zur Vereinheitlichung der Datenformate vorhanden. Am weitesten verbreitet und anerkannt sind die Vorschläge der Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM). Hinsichtlich der stetigen internationalen Standardisierung und der Notwendigkeit internationaler DGPS Systeme sollten standardisierte Datenformate übernommen werden, sobald sie die speziellen Nutzeranforderungen erfüllen. Als internationales Format wird das RTCM-Format Version 2.1 vorgestellt.

4.1.1 Datenfernübertragung

An dieser Stelle erfolgt eine kurze Bewertung der unterschiedlichen Möglichkeiten zur Übertragung von GPS-Daten. Die Vor- und Nachteile, insbesondere im Hinblick auf einen operationellen Einsatz, werden aufgezeigt, und die besonderen Anforderungen im Zusammenhang mit den unterschiedlichen DGPS-Konzepten werden erläutert.

Bei der relativen oder differentiellen Navigation werden mittels Differenzbildung der Beobachtungen identischer Satelliten von wenigstens zwei Empfängern bestimmte Fehlereinflüssse eliminiert bzw. verringert. Um diese Aufgabe in Echtzeit durchführen zu können, ist die Verfügbarkeit der Daten beider Stationen erforderlich. Ein wesentliches Merkmal eines operationellen, in Echtzeit arbeitenden DGPS-Systems stellt damit die Datenübertragungseinrichtung (Data Link) dar. Die einfachste Realisierung für statische Anwendungen ist die Verbindung der beiden Stationen (GPS-Empfänger bzw. Auswerterechner) mit einem Kabel. Über größere Entfernungen kann z.B. das Telefonnetz genutzt werden. Es ist jedoch offensichtlich, daß diese Lösung für kinematische Anwendungen nur bedingt geeignet ist. Für eine Meßdatenübertragung über größere Entfernungen können Satellitenkommunikationssysteme (INMARSAT) genutzt werden (Blanchard 1990, Ackroyd und Lorimer 1990, Werner und Kantorek 1993). Üblicherweise werden jedoch für die Übertragung dieser Daten Funkstrecken in unterschiedlichen Frequenzbereichen eingesetzt. Die elektrischen Wellen, denen die zu übertragenden Informationen aufmoduliert werden, werden in der Nachrichtentechnik in Frequenzbänder eingeteilt. Die möglichen Frequenzbereiche, die für diesen Zweck zur Verfügung stehen, sind in Tabelle 4.1 zusammengestellt. Im Hinblick auf die Auswahl einer geeigneten Frequenz spielen aus technischer Sicht Aspekte der Datenübertragungsrate und des Entfernungsbereiches die entscheidende Rolle. Grundsätzlich gilt hier:

- Höhere Frequenzen ermöglichen eine bessere Auflösung und damit eine höhere Genauigkeit.
- Je kürzer die Wellenlänge ist, desto höher ist die mögliche Datenrate.
- Der hohen Übertragungsrate steht der geringere Entfernungsbereich gegenüber.
- Terrestrische Datenübertragungssysteme mit hoher Frequenz und kurzer Reichweite sind mit weniger technischem Aufwand zu installieren und kostengünstiger als Langwellen- oder Mittelwellenanlagen, mit welchen aber andererseits Datenübertragungen über größere Entfernungsbereiche vorgenommen werden können.

Bezeichnung Band		Wellenlänge λ	Frequenz f	
Langwellen	LF	> 1000 m	< 300 KHz	
Mittelwellen	MF	100 - 1000 m	300 - 3000 KHz	
Kurzwellen	HF	10 - 100 m	3 - 30 MHz	
Meterwellen	VHF			
		1 - 10 m	30 - 300 MHz	
Ultrakurzwellen	UKW			
Dezimeterwellen	UHF	10 cm - 1 m	300 - 3000 MHz	
Zentimeterwellen	SHF	1 - 10 cm	3 - 30 GHz	

Tab. 4.1: Frequenzbänder (Seeber 1989)

Theoretisch kann die gesamte Radiobandbreite für die Übermittlung von DGPS-Daten zwischen zwei Stationen genutzt werden. Aufgrund behördlicher Restriktionen sind jedoch nur bestimmte Frequenzbereiche für die Meßdatenübertragung zugelassen. Die in Deutschland für Meßdatenübermittlungszwecke und Funkdienste zugelassenen Frequenzbereiche sind sehr begrenzt, und für die Nutzung bedarf es in der Regel einer behördlichen Genehmigung. Dies gilt auch auf internationaler Ebene. Als genehmigungsfrei sind die Frequenzen im UKW-Bereich (Ultrakurzwellen) zu nennen, wobei die verwendete Sendeanlage eine Maximalleistung von 0.25 Watt nicht überschreiten darf.

Ausbreitungsverhalten in der Atmosphäre

Für die Beschreibung der Ausbreitungseigenschaften der elektrischen Wellen ist eine Einteilung der Atmosphäre in Troposphäre und Ionosphäre sinnvoll. Als Troposphäre bezeichnet man den unteren Teil der Atmosphäre bis zu einer Höhe von etwa 40 km. In dieser Schicht wird die Wellenausbreitung durch das Wettergeschehen, d.h. durch Wasserdampf und temperaturbedingte Luftschichtungen beeinflußt. Die Ionosphäre wird als oberer Teil der Atmosphäre bezeichnet und reicht von etwa 60 km bis oberhalb 1000 km. Die Ausbreitung von Radiowellen wird in dieser Schicht durch Elektronen und Ionen beeinflußt. Die Anzahl und die räumliche Verteilung der freien Ladungsträger in der Ionosphäre ist abhängig von der Intensität der einfallenden Strahlung und von der Dichte des ionisierbaren Gases. Die Ionosphäre ist demnach kein homogenes Gebilde, sondern ist starken zeitlichen und räumlichen Schwankungen unterworfen.

Bei der Betrachtung des Ausbreitungsverhaltens der unterschiedlichen Frequenzbereiche für die Datenfernübertragung wird eine Unterteilung in Bodenwellen- und in Raumwellenausbreitung (Groundwave, Skywave) vorgenommem (Lanigan et al. 1990). Die Abbildung 4.1 stellt diese Situation schematisch dar.

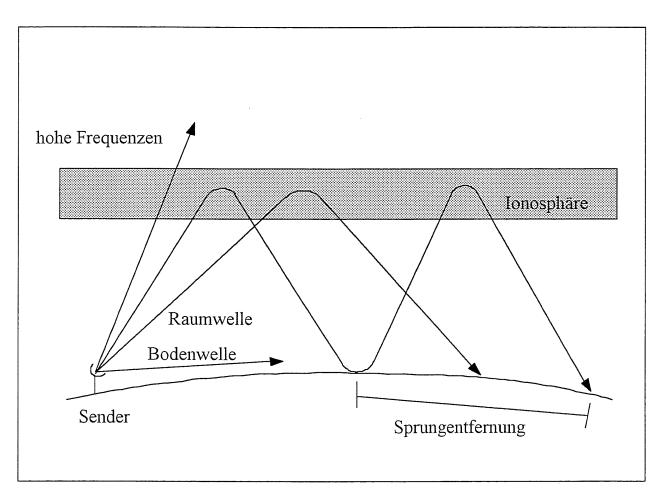


Abb. 4.1: Wellenausbreitung in der Atmosphäre

Wellenbereiche

Die Langwellen breiten sich als wenig gedämpfte Bodenwellen aus, deren Reichweite mehrere tausend Kilometer betragen kann. Die als Raumwelle abgestrahlten Signale werden von der Ionosphäre vollständig absorbiert. Der technische Aufwand für Langwellensender und Empfänger ist sehr groß und mit hohen Kosten verbunden. Für die Übertragung von DGPS-Korrekturen werden deshalb bestehende Einrichtungen genutzt, z.B. Funkfeuer. Aufgrund der großen Beugung der Signale ist für die Fläche der Bundesrepublik nur eine Referenzstation notwendig. Wegen der geringen Übertragungsfähigkeit (ca. 300 bps) sind Langwellensender nur bedingt nutzbar.

Das Ausbreitungsverhalten der *Mittelwellen* ist tageszeitlich verschieden. Am Tag herrscht die Bodenwellenausbreitung vor. Die Reichweite beträgt dann etwa 200 km. In der Nacht nimmt die Absorption unterer Atmosphärenschichten ab und Raumwellen werden von höhergelegenen Schichten der Ionosphäre reflektiert. Dann können zwar Reichweiten von 1000 km erzielt werden, es muß aber mit starken Datenverlusten gerechnet werden.

Kurzwellen haben sehr stark gedämpfte Bodenwellen. Schräg auf die Ionosphäre treffende Raumwellen werden aber reflektiert. Durch mehrfache Reflexionen sind mit Kurzwellensendern Reichweiten von mehreren tausend Kilometern möglich. Dies bewirkt für den Empfänger eine Vielzahl vorhandener Sender, die sich oftmals überlagern. Dieser Umstand, sowie die

Deformation der Signale bei Reflexion in der Ionosphäre und am Erdboden können starke Störungen der Funksignale verursachen.

Ultrakurzwellen sind im Bereich von 30 MHz bis 300 MHz definiert (Wellenlänge 1-10 m), Dezimeterwellen in einem Frequenzbereich von 300 MHz bis 3 GHz, entsprechend den Wellenlängen von 10 cm bis 1 m. Diese Wellen durchdringen die Ionosphäre und werden nicht reflektiert. Die Ausbreitung geschieht weitestgehend geradlinig und bei optischer Sicht nahezu verlustfrei. Die horizontale Reichweite ist auf den Radiohorizont, also etwa 15% über den optischen Horizont hinaus, begrenzt. Eine Näherungsformel zur Berechnung des Radiohorizonts D_r lautet

$$D_r (km) = 4.12 * (\sqrt{h_1 (m)} + \sqrt{h_2 (m)}),$$

mit h₁ als Sendeantennenhöhe und h₂ als Höhe der Empfangsantenne. Bei Inversionswetterlagen sind durch Reflexionen in der Troposphäre Überreichweiten möglich (forward scatter), die jedoch störungsanfällig sind. Bedingt durch Topographie und andere Hindernisse kann die Reichweite erheblich herabgesetzt werden. Durch den Einsatz von Relaisstationen ist es möglich, die Reichweite des Senders zu erweitern und auch in topographisch ungünstige Lagen (z.B. Bergtäler) vorzudringen. Funkstrecken in UHF und VHF Bereich sind vergleichsweise günstig und bieten eine hohe Datenleistung bis 9600 bps. Wie in den anderen Bereichen ist der Sendebetrieb reglementiert. Im UHF Band sind jedoch Anlagen mit maximal 0,25 Watt ohne Genehmigung zu betreiben. Mit solchen Funkgeräten sind Reichweiten von bis zu 5 km möglich.

Die *Mikrowellen*ausbreitung (3 GHz bis 30 GHz) erfolgt quasioptisch. Die Übertragung wird von meteorologischen Einflüssen stark beeinträchtigt, und die Reichweite ist auf den Horizont beschränkt. Bei Regen, Wolken und Nebel entstehen diffuse Reflexionen, die den Empfang stark stören. Für einen gesicherte terrestrische Datenübertragung sind Mikrowellen nicht geeignet.

Weitere Anwendungen

Satellitenkommunikation

Für große Entfernungen bieten die mobilen Satellitenkommunikationsdienste eine Alternative zu den terrestrischen Funkverbindungen. Die International Maritime Satellite Organisation (INMARSAT) betreibt ein System geostationärer Kommunikationssatelliten, das sowohl für den Sprechfunk als auch für den Datenfunk geeignet ist. Vier aktive Einheiten sind so angeordnet, daß bis auf einige Gebiete der Polarregionen der gesamte Globus erreicht werden kann. Für Signale von und zu den Anwendern wird das L-Band (1-2 GHz) genutzt. INMARSAT wird von verschiedenen kommerziellen DGPS-Diensten für die Verbreitung der Korrekturdaten genutzt (z.B. Skyfix). Für die Nutzung des INMARSAT werden erhebliche Gebühren erhoben (10-20 DM pro Minute), der Einsatz kommt somit nur in Ausnahmefällen in Betracht.

Zukunftspläne sehen den Einsatz von Low Earth Orbiting Satellites (LEO) vor. Die Verwendung vieler kleiner Satelliten in polaren Umlaufbahnen soll dann ein weltweites Kommunikationssnetz bilden, das die Nutzung von handelsüblichen Handtelefonen möglich macht.

Rundfunk und Fernsehkanäle

Rundfunk und Fernsehen werden in der Bundesrepublik flächendeckend angeboten. Einigen UKW Sendern werden auf Unterträgern die Informationen des Radio Data System (RDS) aufmoduliert und parallel zum laufenden Radioprogramm abgestrahlt. Das Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen führte dazu 1990 in Zusammenarbeit mit dem WDR erste Versuche durch. Da das RDS von mehreren Datendiensten gleichzeitig genutzt wird, ist die mögliche Datenrate auf 100 bps begrenzt (*Lindstrot* 1992). Bei neun Satelliten und der Übertragung der RTCM-Typ 1 Daten wird eine Aufdatierungsrate von 5 Sekunden erreicht. Damit ist auch unter SA Bedingungen eine Positionierung mit 5 m Genauigkeit möglich. Zur Zeit werden weitere Tests mit den Sendern WDR, NDR, SFB und BR durchgeführt. Die Reichweite der UKW Sender beträgt ca. 50 km. Für ein flächendeckendes Netz werden viele Sender, aber nur eine Referenzstation pro Landesrundfunkanstalt benötigt.

Auch eine Nutzung von Fernsehkanälen ist möglich. Aufgrund der hohen Übertragungsgeschwindigkeit von 9600 bps wäre dies sogar für PDGPS-Verfahren geeignet. Es zeigen sich jedoch schlechte Empfangseigenschaften bei bewegter Empfangsantenne. Eine kinematische Nutzung scheint somit ausgeschlossen.

Mobilfunk Telefone

Die Mobilfunknetze stehen nahezu flächendeckend in der Bundesrepublik zur Verfügung. Es werden das C-Netz und das D-Netz (D1, D2) unterschieden.

Das *C-Netz* ist seit 1985 im Aufbau und für 850.000 Teilnehmer ausgelegt. Es arbeitet in Frequenzbereichen zwischen 451 und 466 MHz. Aus dem zellularen Aufbau ergeben sich kleine Versorgungsgebiete mit einem mittlerem Versorgungsradius von 27 km (*Eberhardt* 1993). Ein Überschreiten der Zellgrenze stellt jedoch kein nennenswertes Problem dar, da die Umschaltzeit auf eine neue Funkstation maximal 300 Millisekunden dauert. In Verbindung mit einem Datenfunkmodem können Daten bis zu 2400 bps übermittelt werden. Das C-Netz wird noch bis zum Jahre 2000 aufrechterhalten.

Im Zuge der europäischen Standardisierung wurde ein einheitliches digitales Funkübertragungsverfahren, der *GSM Standard* (Groupe Spécial Mobile, oder Global System for Mobile Communication), entwickelt und in Deutschland seit 1991 mit dem *D-Netz* umgesetzt. Die Sendefrequenzen sind im Bereich von 890 bis 960 MHz angeordnet. Aus politischen Gründen wurden zwei kompatible Netze entwickelt, die von verschiedenen Betreibern unterhalten werden. Es stehen das D1-Netz der Telekom und das D2-Netz der Mannesmann Mobilfunk GmbH zur Verfügung. Die digitale Datenübertragung bietet eine Datenrate von 9600 bps. Die Anschaffungskosten sind sehr gering.

Das Personal Communication Network (PCN) ist eine Weiterentwicklung der auf den GSM Standards basierenden Systeme. Die Sendefrequenzen sind im Bereich von 1,71 bis 1,88 GHz angesiedelt. Dieses Spektrum ist somit deutlich größer als das der D-Netze und läßt deshalb eine größere Teilnehmerzahl zu. In Deutschland wird das PCN-Netz E1-Netz genannt.

Abbildung 4.2 gibt einen Überblick über die möglichen Frequenzbereiche, die für die Meß-und Korrekturdatenübermittlung im Zusammenhang mit DGPS geeignet sind. Die Beurteilung erfolgt in Abhängigkeit von der gewünschten Genauigkeit und der jeweiligen Entfernung zwischen der Sende- und Empfangsstation. Anhand der Abbildung kann die Leistungsfähigkeit bestehender DGPS-Dienste mit ihren jeweiligen Frequenzen eingeordnet werden.

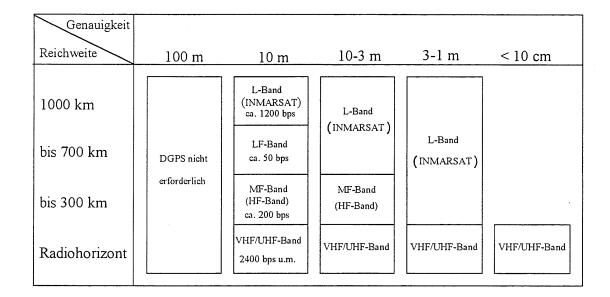


Abb. 4.2: Frequenzbereich und Positionsgenauigkeit

4.1.2 Das RTCM-Datenformat

Ein wichtiger Aspekt bei der Einrichtung einer Datenübertragungsstrecke für den Einsatz des DGPS ist das Format und die Datenrate, mit dem die Informationen übertragen werden sollen. Das US Institute of Navigation hat 1983 die Radio Technical Commission for Marititime Services (RTCM) beauftragt, eine Empfehlung für die Form der Übertragung von DGPS-Korrekturen zu erarbeiten. Die beratend wirkende RTCM-Organisation setzte das Special Committee No. 104 (RTCM SC-104) ein, das in drei Arbeitsgruppen Richtlinien für Dateninhalt und Format, Übertragung und Pseudolite Design entworfen hat. Unter Pseudolites wird ein spezieller Service verstanden, dessen Signale in ähnlicher Struktur wie GPS-Signale DGPS-Korrekturen und eventuell auch eine weitere Pseudorangebeobachtung ungefähr auf der L1-Frequenz bereitstellen.

Die RTCM-Arbeitsgruppe 104 hat eine Reihe von Empfehlungen formuliert, welche seitdem von vielen GPS-Empfängerherstellern sowie von Hard- und Softwareentwicklern angenommen und realisiert worden sind. Zusätzlich zu Pseudostrecken- und Pseudogeschwindigkeitskorrekturen enthält das RTCM-Format aktuelle Statusinformationen über die Satellitenkonstellation sowie über die Datenübertragungseinrichtung.

Als die ersten RTCM-Formate bis zur Version 2.0 formuliert wurden (1985/1990), war nicht damit zu rechnen, daß der Nutzung der reinen Trägerphaseninformation für kinematische Anwendungen eine Bedeutung zukommt. Die Überlegungen zu dem ersten RTCM-Format betrafen daher ausschließlich DGPS-Konzepte, die auf Codemessungen basieren. Den Genauigkeiten, die mit diesen Verfahren erreicht werden konnten, sind bedingt durch das

Meßrauschen der Codephasen Grenzen gesetzt. Nur durch den Einsatz von Verfahren, die primär auf Trägerphasenmessungen basieren, können Genauigkeiten im Subdezimeterbereich erzielt werden.

In der aktuellen RTCM Version 2.1 vom Januar 1994 wird im Gegensatz zur Version 2.0 vom Januar 1990 ergänzend die Möglichkeit der Übermittlung von Trägerphasenbeobachtungen zur Lösung der Mehrdeutigkeiten in Echtzeit angeboten. Die Tabelle 4.2 zeigt eine Übersicht der im RTCM-Format (Version 2.1) definierten Messagetype (*RTCM* 1994). Insgesamt sind 63 verschiedene Typen vereinbart worden, wobei einige Grundtypen endgültig festgelegt sind, einige in vorläufiger Form vorliegen und der Rest für zukünftige Anwendungen reserviert ist.

Message Typ	Status	Inhalt
1	fest	Differential Korrekturen (PRC)
2	fest	Delta Differential Korrekturen (RRC)
3	fest	Parameter der Referenzstation
4	aufgegeben	Trägerphasenbeobachtungen
5	versuchsweise	Constellation Health
6	fest	Null Frame
7	fest	Almanach der Funkortungssysteme
8	versuchsweise	Alamanach der Pseudolites
9	fest	DGPS - Korrekturen mit höherer Aktualisierungsrate
10	reserviert	P-Code Differential Korrekturen
11	reserviert	C/A-Code L2 Delta Korrekturen
12	reserviert	Stationsparameter der Pseudolites
13	versuchsweise	Parameter der Sendestation
14	reserviert	Zusatzinformationen für Anwendungen in der Vermessung
15	reserviert	Parameter der Ionosphäre (Tropossphäre)
16	fest	spezielle ASCII - Message
17	versuchsweise	Ephemeridendaten
18	versuchsweise	unkorrigierte Trägerphasenbeobachtungen
19	versuchsweise	unkorrigierte Pseudorangebeobachtungen
20	versuchsweise	RTK Trägerphasen Korrekturen
21	versuchsweise	RTK Pseudorange Korrekturen
22 - 58		nicht definiert
59	versuchsweise	Proprietary Message; nutzerdefinierte Informationen
60-63	reserviert	Multipurpose Usage; Meldung für unterschiedliche Zwecke

Tab. 4.2: RTCM Messagetypen; Version 2.1 vom Januar 1994 (nach RTCM SC-104)

Datenübertragung der RTCM-Korrekturen

Von der RTCM-Arbeitsgruppe wird als minimale Übertragungsrate eine Geschwindigkeit von 50 bps empfohlen. In der Praxis ist man bestrebt, den Messagetyp 1 so oft wie möglich zu übertragen, unterbrochen von Übertragungen der anderen Messagetypen.

Die Länge des Messagetyps 1 ist abhängig von der Anzahl der beobachteten Satelliten. Mit einem 5-Wort Paket werden die Korrekturen für 3 Satelliten übertragen. Für die Übertragung der Informationen eines weiteren Satelliten werden 2 Worte zusätzlich benötigt. Unter Berück-

sichtigung des 2-Wort Headers einer jeden Message ergeben sich nur für die Übertragung des Messagetyps 1 die in Tabelle 4.3 angegebenen Übertragungszeiten.

Die Frage nach der notwendigen Datenübertragungsrate hat unter dem Einfluß der Selective Availability (SA) eine besondere Bedeutung bekommen. Nach Kalafus et al. (1986) beträgt die notwendige Aufdatierungrate 5-10 sec, um den SA-Einfluß weitgehend zu eliminieren. Eigene Untersuchungen sowie Untersuchungen von Völksen (1991) haben gezeigt, daß die Änderung der Pseudostrecken unter SA-Bedingungen 0.3 m/sec und mehr beträgt.

Anzahl der Satelliten	Wörter	Anzahl der Bits	Übertragungsdauer [50bps]
4	9	270	5.4 sec
5	11	330	6.6 sec
6	12	360	7.2 sec
7	14	420	8.4 sec
8	16	480	9.6 sec
9	17	510	10.2 sec

Tab. 4.3: Übertragungsdauer für Messagetyp 1 mit 50 bps

Nach dem Ausbau des GPS-Systems können auf einer Referenzstation gleichzeitige Beobachtungen zu 8 Satelliten vorliegen, was nach der Tabelle 8 einer Übertragungsdauer von
9.6 sec entsprechen würde. Berücksichtigt man, daß neben dem Messagetyp 1 noch eine Reihe
anderer Messagetypen übertragen werden müssen, so wird deutlich, daß die von der RTCMArbeitsgruppe vorgeschlagene Übertragungsrate von 50 bps nicht ausreichend ist, um unter
SA-Bedingungen Positionsgenauigkeiten im Bereich von ± 1-5 m zu erreichen.

Im Gegensatz zu den auf Codemessungen basierenden Auswertekonzepten werden bei den auf Trägerphasenmessungen basierenden Verfahren keine Strecken- oder Positionskorrekturen von der Referenzstation benötigt, sondern es werden die gesamten Beobachtungsdaten, bzw. analog zum bisherigen Differentiellen GPS die Trägerphasenkorrekturen einer Referenzstation für die Auswertung benötigt. Für die Übertragung aller benötigten Informationen ist hier eine Datenrate von mehr als 4800 bps gefordert. Dies schränkt den Kreis der Übertragungsmedien stark ein. Unter Verwendung der Proprietary Message (Typ 59) wurde von der Firma Geo++ das Format RTCM++ entwickelt. Es enthält den vollen Informationsgehalt des RTCM 2.1, benötigt aber wegen einer besseren Datenverdichtung nur 2400 bps für die Übertragung der RTK-Messages innerhalb einer Sekunde (*Wiibbena, Bagge* 1995).

4.1.3 DGPS-Datendienste

SAPOS -,,Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung"

Die "Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland" (AdV) hat 1994 den Aufbau eines permanent betriebenen, flächendeckenden und multifunktionalen DGPS-Dienstes beschlossen (*Hankemeier* 1996). Auf verschiedenen Kommunikationswegen werden dem Nutzer Korrekturdaten bzw. Rohdaten für Echtzeit und Postprocessing Anwendungen übermittelt. Kern des **SAPOS** -"Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung" ist ein Netz aus GPS-Referenzstationen. Die hoheitlichen Aufgaben der Landesvermessungen sollen mit diesem Konzept effizienter, umfassender und

wirtschaftlicher gelöst werden. Ein einheitliches, amtliches, aktives Bezugssystem wird bereitgestellt. Gleichzeitig versorgt der Dienst auch weitere interessierte Nutzerkreise, die mit GPS-Verfahren positionieren.

Laut Hankemeier (1996) werden vier Servicebereiche angeboten:

Bereich	Name	
1	EPS	Echtzeit-Positionierungs-Service
2	HEPS	Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service
3	GPPS	Geodätischer Präziser Positionierungs-Service
4	GHPS	Geodätischer Hochpräziser Positionierungs-Service

Tab. 4.4: Servicebereiche des SAPOS (nach Hankemeier 1996)

Tabelle 4.5 zeigt die Unterschiede der Bereiche auf. Die Dienste EPS und HEPS können in Echtzeit genutzt werden. Für Anwendungen mit Genauigkeitsanforderungen im Meterbereich ist der Empfang von Korrekturdaten über einen Radiosender mit einem RDS-Dekodierer ausreichend. Bundesweit reicht hierfür die Einrichtung einer permanenten Referenzstation. Dieselbe Genauigkeit und besser kann mit dem Empfang der RTCM 2.0 - Daten einer lokalen Referenzstation über ein Funkmodem im 2-m-Band erreicht werden. Der HEPS-Service bietet die Korrekturdaten zu jeder Sekunde an. Für DGPS Anwendungen bringt dies jedoch kaum eine Genauigkeitssteigerung.

Bereich	Zeit	Medium	Genauigkeit	Nutzer-	Taktrate	
				anzahl		schnittstelle
EPS	Echtzeit	Radio, LW, UKW	1 - 3 m	8	3 - 5 sec	RTCM 2.0
HEPS	Echtzeit	2-m-Band	1 - 3 m	8	1 sec	RTCM 2.0
HEPS	Echtzeit	2-m-Band	0,01 - 0,03 m	∞	1 sec	RTCM 2.1
GPPS	Postprocessing	Festnetz D1, D2, E	0,01 m	n <<∞	15 min	RINEX
GHPS	Postprocessing	Festnetz	< 0,01 m	8		RINEX

Tab. 4.5: Unterscheidungskriterien der verschiedenen Servicebereiche des SAPOS (nach *Hankemeier* 1996)

Die hohe Taktrate von 1 Sekunde ist jedoch für die Nutzer des HEPS mit einer Genauigkeit von 1 bis 3 cm unter Nutzung des RTCM 2.1 wichtig. Dies gewährleistet hochpräzise Anwendungen in Echtzeit mit schnellen OTW-Mehrdeutigkeitslösungen auch für kinematische Anwendungen. Positionierungen im Postprocessing werden durch den GPPS und durch den GHPS bereitgestellt. Über Telefon-Festnetz, D1-, D2- oder E-Netz können Rohdaten im RINEX-Format direkt an der Referenzstation abgerufen werden. Der GPPS sieht dabei eine Positionsbestimmung noch am Ort der Messung nach ca. 15 Minuten nach Messungsende vor. Die Daten werden noch im Felde über Telefon abgerufen. Die Einrichtung von nur wenigen Telefonanschlüssen auf der Referenzstation beschränkt die Nutzerzahl stark. Die Archivierung der Rohdaten im RINEX Format erlaubt den Abruf für Postprocessing Anwendungen auch noch nach längerer Zeit. Hier sind die höchsten Genauigkeiten zu erwarten.

Die Entfernungen zwischen den einzurichtendem Referenzstationen des HEPS wird wahrscheinlich in Abhängigkeit von den erreichbaren Funkreichweiten bis zu 50 km betragen. Um die Dienste mit hoher Verfügbarkeit anbieten zu können, wird die Entfernung besonders in gebirgigen Gebieten geringer sein müssen, oder aber es werden weitere funktechnische Möglichkeiten ausgeschöpft werden müssen (z.B. Repeaterstationen).

Weitere Funkdatendienste

Das erste landesweite DGPS Korrekturdatennetz der Welt nahm Ende 1994 in Schweden den Betrieb auf. Dort werden über RDS Daten von 12 Referenzstationen ausgestrahlt, deren Positionen so gewählt wurden, daß auch bei Ausfall einzelner Stationen die landesweite Überdeckung sichergestellt ist. Im folgenden sollen zwei deutsche Unternehmungen kurz aufgeführt werden:

- DGPS-Dienst der Wasser- und Schiffahrtsverwaltungen: das Seezeichenversuchsfeld der Wasser und Schiffahrtsverwaltung erprobt zwei Referenzstationen im Seefunkfeuerband (283 bis 315 kHz). Die Sender in Wustrow und Helgoland haben Reichweiten von 180 km und sind somit in der Lage, die gesamte Nord- und Ostseeküste mit DGPS-Korrekturen zu versorgen.
- das Institut f
 ür Angewandte Geodäsie (IfAG) als Mitgliedsverwaltung der AdV betreibt in Mainflingen in einer Kooperation mit der Deutschen Telekom AG einen Langwellensender, mit dem RTCM-Korrekturen f
 ür die gesamte Bundesrepublik abgestrahlt werden. Die Reichweite beträgt 600 km.

In der Regel wird das Datenformat RTCM für die Korrekturübertragung verwendet.

4.2 DGPS-Echtzeitsysteme

Dem Institut für Erdmessung stehen verschiedene Echtzeitsysteme zur Verfügung. GEONAV wurde am Institut für Echtzeitanwendungen mit Genauigkeiten von unter 10 m entwickelt. GNRT ist ein auf dem Markt erhältliches Produkt der Geo++ GmbH. Mit dem Modul GNRT-K ist es möglich, Trägerphasenmehrdeutigkeiten in Echtzeit zu lösen und so eine hohe Genauigkeit im Subdezimeterbereich zu gewährleisten. Die DGPS-Option des GPS-Empfängers Ashtech Z12 generiert Positionen bis zu Submetergenauigkeiten im Empfänger.

Zu Beginn des Vorhabens war beabsichtigt, die Software GEONAV im Rahmen des Projektes weiterzuentwickeln. Es zeigte sich aber schnell, daß besonders die Umstellung auf international gängige Schnittstellenformate und die Implementierung eines Moduls zur OTW-Mehrdeutigkeitslösung unverhältnismäßig viel Aufwand bedeuten würde. Gleichzeitig wurde das Produkt GNRT der Geo++ zugänglich, das im wesentlichen die Vorteile der GEONAV Software gegenüber handelsüblichen Programmen (z.B. Empfängerunabhängigkeit) aufweist und zusätzlich mit einem Modul zur Mehrdeutigkeitslösung ergänzbar ist. Die Software GEONAV wurde deshalb auf den Einsatz bei mittleren Genauigkeitsansprüchen beschränkt.

Im folgenden sollen die drei Programmsysteme zum Echtzeit-DGPS vorgestellt werden, wobei beispielhaft verstärkt auf die Darstellung der GEONAV Software eingegangen wird.

4.2.1 Das Programmsystem GEONAV

Um Positionen in einem Genauigkeitsbereich von ± 1-10 m zu bestimmen, bietet sich das Verfahren der Relativmessungen mit Codephasen bzw. das Verfahren der Relativmessungen mit trägergeglätteten Codephasen an. Diese Auswertekonzepte sind in dem Programmsystem GEONAV (GEOdetic NAVigation Software) implementiert. Das Grundkonzept ist in der Abbildung 4.3 dargestellt.

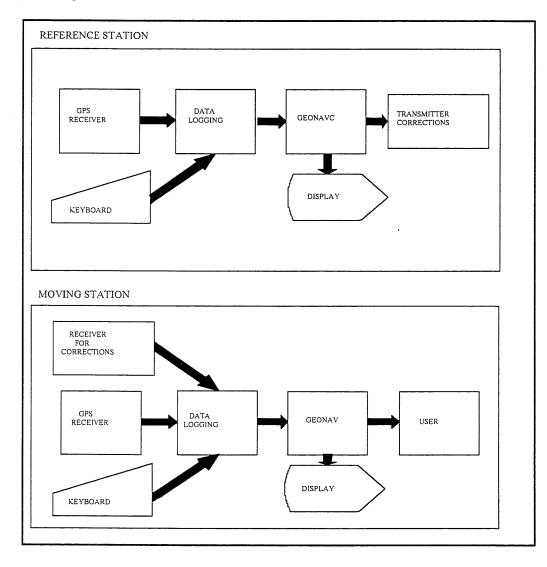


Abb. 4.3: Das Programmsystem GEONAV

Die zentralen Bausteine des Programmsystems GEONAV zur echtzeitfähigen Positionierung bewegter Plattformen im Differentialverfahren wird aus den Programmen GEONAV und GEONAVC gebildet. Das Programm GEONAVC berechnet auf einer Referenzstation mit bekannten Koordinaten Differentialkorrekturen, die von dem Programm GEONAV für die genaue Positionierung der bewegten Plattform genutzt werden.

Die Programme liefern Echtzeitlösungen; dazu werden die anfallenden Daten sequentiell in rekursiven Algorithmen verarbeitet. Die Programme sind so angelegt, daß sie die Daten von beliebigen Empfängertypen verarbeiten können. Ein GPS-Empfänger muß dazu mindestens die Pseudostrecke liefern, darüber hinaus werden auch die Beobachtungen von Dopplerfrequenz und Trägerphase ausgewertet. Beim Vorliegen von simultanen Beobachtungen von

Trägerphase und Pseudostrecke wird eine Glättung der Pseudostrecke mit Hilfe der Trägerphase vorgenommen (*carrier smoothed pseudorange*).

Differentialkorrekturen werden als Streckenkorrekturen für jeden einzelnen GPS-Satelliten berechnet. Die zeitvariablen Streckenkorrekturen werden durch ein Polynom approximiert, mit dem der Nutzer auf der bewegten Plattform seine Beobachtungen korrigieren kann. Die Nutzung der Differentialkorrekturen ist optional, so daß das Programm GEONAV auch ohne diese Korrekturen verwendet werden kann.

Als Differentialkorrekturen werden die Widersprüche zwischen den aktuell gemessenen Pseudostrecken und -geschwindigkeiten zu den aus Referenzkoordinaten berechneten Größen betrachtet. Diese Widersprüche werden durch ein Polynom 2.Grades approximiert, dessen Koeffizienten in einem Kalman-Filter laufend geschätzt werden (siehe *Heimberg* 1994). In optional wählbaren Intervallen werden diese Zustandsgrößen abgegriffen und gemeinsam mit der Referenzzeit als Differentialkorrekturen ausgegeben.

Das Navigationsmodul GEONAV verlangt als Eingabe physikalische Sätze von konstant 80 Zeichen in einem speziellen GEONAV-Datenformat. Die Eingabedaten für das Navigationsmodul GEONAV gliedern sich in verschiedene logische Sätze. Gegenwärtig sind folgende logische Sätze vorgesehen:

- Beobachtungen
- Navigationsmessage
- Streckenkorrekturen
- Kontroll- und Steuerparameter.

Der Dateninhalt und das Format der Datensätze sind detailliert in *Heimberg* (1994) beschrieben.

Zum Programmpaket GEONAV gehören eine Reihe von zusätzlichen Programmen, mit deren Hilfe weiterführende Analysen durchgeführt werden können. Diese Programme werden nach der eigentlichen GEONAV-Auswertung eingesetzt und basieren auf den von GEONAV und GEONAVC erzeugten Ausgabelisten.

Für die Analyse der Lösung während der Auswertung stehen in GEONAV und GEONAVC zwei verschiedene Ausgabemöglichkeiten zur Verfügung. Zum einen kann das Ergebnis (Positionslösung bzw. Streckenkorrekturen) im Textmodus oder alternativ dazu im Graphikmodus auf dem Bildschirm betrachtet werden.

Die Darstellung im Textmodus entspricht den numerischen Ausgabelisten, die von GEONAV/GEONAVC abgespeichert werden. Die GEONAV-Textausgabe beinhaltet im wesentlichen die Elemente der Zustandsvektoren für die Position und die Geschwindigkeiten sowie deren Standardabweichungen. Weiterhin wird die aktuelle Zeit der jeweiligen Epoche und die Anzahl der für die Positionsberechnung verfügbaren Satelliten angegeben.

Die Darstellung im Graphikmodus hat gegenüber der Textdarstellung einen wesentlich höheren Informationsgehalt und ist insbesondere für den Einsatz im Rahmen eines Echtzeit-Systems entwickelt worden. Hier hat ein Beobachter die Möglichkeit, anhand einer Reihe von zusätzlichen Informationen die Qualität der durchgeführten Positionierungsaufgabe direkt während der Messung bzw. der Auswertung zu beurteilen.

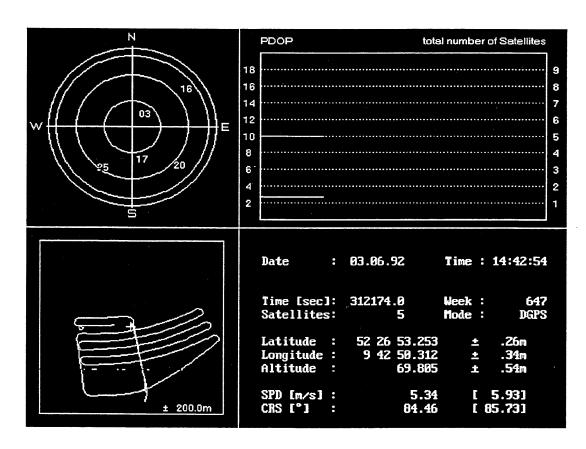


Abb. 4.4: GEONAV-Ergebnisausgabe (Graphikmodus)

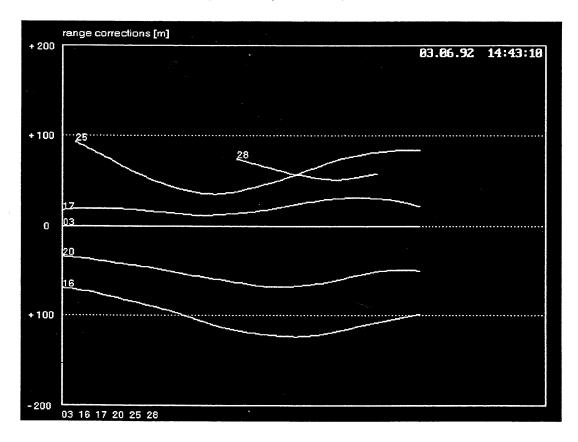


Abb. 4.5: GEONAVC-Ergebnisausgabe (Graphikmodus)

Die GEONAV-Ergebnisausgabe im Graphikmodus zeigt neben dem Datum und der aktuellen Zeit die Position und die Geschwindigkeiten sowie deren Standardabweichungen. Der gefahrene Kurs wird dabei auf einer kleinen Übersichtskarte dargestellt.

Eine Information über die Beobachtungssituation ergibt sich aus dem *Sky-Plot* mit der Übersicht über die momentane geometrische Konstellation der Satelliten sowie aus der graphischen Anzeige des PDOP-Wertes und der Anzahl der verfügbaren Satelliten. Ein Indikator zeigt, ob Daten einer Referenzstation für die Berechnung der Lösung genutzt werden, also ob es sich um eine absolute (GPS) oder um eine relative (DGPS) Lösung handelt. Die GEONAVC-Ergebnisausgabe im Graphikmodus ermöglicht es, die zeitliche Variation der berechneten Differentialkorrekturen für die beobachteten Satelliten auf der Referenzstation darzustellen. Die Abbildungen 4.4 und 4.5 zeigen exemplarisch die möglichen Bildschirmausgaben von GEONAV und GEONAVC.

Die Abbildung 4.6 gibt eine schematische Übersicht über das entwickelte echtzeitfähige Differentielle GPS System.

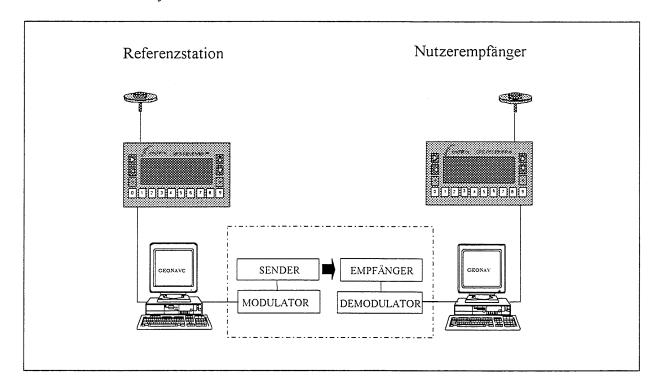


Abb. 4.6: Echtzeitfähiges Differentielles GPS System

Der Prototyp des Echtzeit Differential GPS-Systems ist auf PC-Basis entwickelt worden. Er kann damit auf jedem IBM-kompatiblen Rechner unter dem Betriebsystem DOS installiert werden. Der verwendete Rechner sollte in der Minimalkonfiguration mit einem 80286 Prozessor ausgerüstet sein, über einen mathematischen Koprozessor sowie über zwei serielle Schnittstellen (RS232) verfügen.

Das Gesamtprogrammpaket besteht aus Modulen zur Schnittstellensteuerung, Datenerfassung, Dekodierung, Modulation, Demodulation und letztendlich der Berechnung der Position aus den GPS-Beobachtungen sowie deren Anzeige in einer entsprechenden Form. Die einzelnen Module wurden in den Programmiersprachen Fortran, C und Assembler erstellt. Sie wurden getrennt entwickelt und später in das Gesamtsystem integriert.

4.2.2 Die Ashtech Z-12 DGPS Option

Die Ashtech DGPS Option gewährleistet Echtzeitgenauigkeiten im Meterbereich und besser. Die Berechnung der Korrekturen auf der Referenzstation und der Positionslösung auf der Remotestation wird im Empfänger generiert. Als ergänzende Hardwarekomponenten sind lediglich eine Telemetrie und zur Aufzeichnung der Position ein Rechner mit RS232 -Schnittstelle notwendig. Ashtech verwendet zur Übertragung der Informationen das etablierte empfängerunabhängige Format der US-amerikanischen Radio Technical Comission for Maritime Services (RTCM SC 104). Somit können mit der Ashtech-Option auch Korrekturen der DGPS-Dienste genutzt werden.

4.2.3 Das Programmsystem GNRT

Eine Positionslösung bis zu Submetergenauigkeit in Echtzeit wird von der Firma Geo++ in Garbsen mit dem System GNRT angeboten. Das empfängerunabhängige Softwaresystem mit modularem Programmaufbau wird unter dem Betriebssystem OS/2 auf handelsüblichen PC's betrieben. Standardisierte Schnittstellen (RTCM, NMEA, RINEX) erlauben die Integration mit anderen Programmen sowie die Nutzung bestehender Referenzstationen. Es können aber auch eigene Referenzstationen betrieben werden. Die Korrekturdaten werden von der Referenzstation über Funk, Mobilfunk oder Radio an die mobile Station gesendet. Die Koordinaten werden aus der Kombination der Rohdaten des bewegten Empfängers mit den Korrekturdaten bestimmt. Weiterhin besteht die Möglichkeit, mit GNRT eine "reverse" DGPS-Positionen zu berechnen. Hierbei werden die Rohdaten auf der Remotestation gesammelt und an die Referenzstation weitergegeben, wo die Berechnung der Trajektorie vorgenommen wird.

Das System besteht im wesentlichen aus den folgenden Modulen:

• Empfängermodule, zum Einlesen der Empfängerrohdaten, gegebenenfalls Wandeln in Rinex Hauptprogramm, Berechnung von Differentialkorrekturen (Referenzstation) bzw. Verarbeitung der Korrekturdaten und Empfängerrohdaten mit Positionsberechnung

GNRT-K • Mehrdeutigkeitssuche, Berechnung der hochpräzisen Lösung Ausgabe der RTCM-Korrekturdaten RTCM OUT RTCM IN Einlesen der RTCM-Korrekturdaten STAT12RT, STAGRA • Statusinformationen VIEW SOL

Ergebnisanzeige

• Ergebnisausgabe

Als Ergänzung zu dem GNRT Konzept ist für Anwendungen mit Subdezimetergenauigkeit das Modul GNRT-K verfügbar. Grundlage für die hohe Genauigkeit ist die Mehrdeutigkeitslösung der Trägerphasenmessungen. Die Übersendung der Phaseninformation macht eine Erweiterung des RTCM - Formates notwendig. Das von der RTCM dafür vorgesehene Format 2.1 benötigt für die Übertragung der Informationen mehr als 4800 bits pro Epoche. Diese Datenfülle kann bei einer Datenrate von einer Sekunde für Entfernungen über 10 km mit Datenfunk nicht mehr bewältigt werden. Daher wurde das sogenannte Format RTCM++ für den Einsatz auf

ASH IN, NXR5_IN,

TRIM IN

NAV OUT

GNRT

kompatibel zum RTCM-Standard, benötigt aber dank besserer Datenverdichtung weniger als 2400 Bits pro Epoche (Wübbena, Bagge 1995).

4.2.4 Weitere hochpräzise Echtzeitsysteme auf dem Markt

Seit 1993 werden von den führenden GPS-Empfänger Herstellern Optionen angeboten, die eine Trägerphasenauswertung mit Mehrdeutigkeitslösung (PDGPS) im Empfänger ermöglichen. Die Tabelle 4.6, die aus einer Übersicht der Zeitschrift GPS-World (1996) zusammengestellt ist, gibt hier einen Überblick:

Hersteller	Bezeichnung/	seit	Rate	Genauigkeit	Beobachtungen	Preis
	Modell		sec			US-\$
Trimble	RTK/OTF					
	GeoD.Surv. SSi	1995	0,5	1 cm + 2 ppm	L1, C/A, P; L2, P	k.A.
	GeoD.Syst. Surv.	1995	0,5	1 cm + 2 ppm	L1, C/A, P; L2, P	k.A.
Ashtech	PNAV-Option					
	Z-12 Real Time Z	1995	1	1,7 cm	L1, C/A, P; L2, P	23.800
	Z-12 Sensor	1995	0,2	1,7 cm	L1, C/A, P; L2, P	k.A.
Geotronics	System 2000RTK					
	Geotracer 2102	1993	0,25	1 cm + 2 ppm	L1 only; C/A	9.950
	Geotracer 2104	1995	0,25	1 cm + 2 ppm	L1 only; C/A	11.990
	Geotracer 2200	1995	0,5	1 cm + 1 ppm	L1/L2; C/A, P, Y	26.590
Leica AG	RT-SKI					
	SR299 (E)	1992	1	1 cm + 1 ppm	L1, C/A; L2, P	20.290
	SR399 (E)	1995	1	1 cm + 1 ppm	L1, P, C/A; L2, P	22.190
Sercel	K.A.R.T.					
	NDS 100 MKI	1994	0,6	5 cm	L1 only	20.910

Tab. 4.6: Überblick über echtzeitfähige empfängerabhängige PDGPS-Systeme; Herstellerinformationen, zusammengestellt aus GPS-World 1/1996 (k.A.: keine Angaben)

Den Preis- und Genauigkeitsangaben liegen Herstellerangaben zugrunde. Die angebotenen RT-PDGPS Lösungen sind in der Regel auf Entfernungsbereiche bis 10 km begrenzt. Grundannahme der eingesetzten Algorithmen ist ein vernachlässigbarer Einfluß der Ionosphäre. Ein Nachteil für schnell bewegte Anwendungen ist die recht große Verzögerung zwischen aktueller Position der bewegten Antenne und Koordinaten aus der Positionsberechnung, die bis zu 3 Sekunden betragen kann.

Referenzstationen der Landesvermessungen entwickelt. Es ist in seiner Datenstruktur

5 Untersuchungen zur Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Operationalität der 'On The Way'-Verfahren (OTW)

Für die angestrebte Genauigkeiten des DGPS im Subdezimeterbereich ist eine Lösung der Trägerphasenmehrdeutigkeiten erforderlich. Bei bewegten Empfängern, deren Mehrdeutigkeiten nicht durch eine Initialisierungsphase bestimmt werden können, bedeutet dies die Verwendung von Algorithmen mit schnellen Mehrdeutigkeitslösungen während der Bewegung. Diese Verfahren werden in der Literatur mit 'On The Way'- (OTW) (Seeber, Wübbena 1989) oder auch als 'On-The-Fly'- und 'On The Move'- Verfahren bezeichnet.

Die Mehrdeutigkeiten müssen vom OTW-Auswerteverfahren innerhalb weniger Epochen möglichst in Echtzeit gelöst werden, um eine kontinuierliche, präzise Positionierung mit GPS durchführen zu können. Die Verfahren sollen auch gewährleisten, daß nach einer Signalunterbrechung in kürzester Zeit bzw. ohne erkennbare Unterbrechung die Positionierung im gleichen Genauigkeitsniveau fortgeführt werden kann.

Im folgenden werden Ergebnisse zur Untersuchung der OTW-Algorithmen in dem Softwarepaket GEONAP präsentiert. Im einzelnen handelt es sich um Untersuchungen in kurzen Entfernungsbereichen bis zu 7 km mit vier Datensätzen aus den Jahren 1993 und 1994. Eine weitere Untersuchung zur Entfernungsabhängigkeit von erfolgreichen OTW-Mehrdeutigkeitslösungen aus dem Jahr 1995 schließt sich an.

In Kapitel 5.2 wird die Echtzeitsoftware GNRT mit dem Modul GNRT-K auf Schnelligkeit und Sicherheit der Mehrdeutigkeitslösung untersucht. Die Algorithmen in GNRT-K sind auf der Grundlage der GEONAP Software entstanden.

5.1 Untersuchungen im Postprocessing mit GEONAP

Für die Auswertungen im Postprocessing steht am Institut für Erdmessung das Programmsystem GEONAP zur Verfügung. GEONAP wurde in der Grundversion als wissenschaftliches Auswertepaket am Institut für Erdmessung der Universität Hannover in den Jahren 1984 bis 1989 entwickelt. Seit 1990 erfolgt die Weiterentwicklung und Vermarktung durch die Firma Geo++ in Garbsen.

GEONAP arbeitet mit undifferenzierten Beobachtungen von Ein- und Zweifrequenzdaten unabhängig vom Typ des GPS-Empfängers. Die Konzepte und Ausgleichungsmodelle, die dem Programmpaket zugrunde liegen, werden bei *Wübbena* (1989, 1991) erläutert.

In GEONAP sind mehrere Verfahren zur Mehrdeutigkeitsbestimmung implementiert:

- die geometrische Methode
- die Code/Trägerphasen-Kombination
- die Nutzung des ionosphärischen Signals.

Die Nutzung geometrischer Methoden setzt voraus, daß die systematischen Restfehler einen geringen Einfluß auf das Ergebnis haben. In statischen Verfahren können die Einflüsse durch lange Beobachtungszeiten unter guten geometrischen Bedingungen reduziert werden

(Wübbena 1991). Im Falle der OTW-Verfahren ist es jedoch notwendig, innerhalb kürzester Zeit zur Lösung der Mehrdeutigkeiten zu kommen.

Die Code/Trägerphasenkombinationen bei verfügbaren P-Code-Daten kann unter bestimmten Voraussetzungen (geringes Rauschen des Codes, große Wellenlänge der Linearkombination des Trägers) zur Bestimmung von Mehrdeutigkeiten genutzt werden. Die Methode eignet sich durch die eindeutigen Code-Messungen auch zur näherungsweisen Bestimmung der Mehrdeutigkeiten.

Die Nutzung des ionosphärischen Signals setzt eine Modellierung der Ionosphäre oder im einfachsten Fall die Annahme identischer ionosphärischer Bedingungen voraus. Es ist dann möglich, Mehrdeutigkeiten mit dem ionosphärischen Signal zu schätzen, wodurch sich zur weiteren Festsetzung der Mehrdeutigkeiten die effektive Wellenlänge der anderen Linearkombination in GEONAP auf ca. 1,72 m (extra-widelaning) erhöht. Den Einfluß ionosphärischer Störungen auf präzise GPS-Messungen in Mitteleuropa beschreibt Wanninger (1993).

5.1.1 Schnelligkeit und Zuverlässigkeit der OTW-Verfahren

Die Untersuchungen zu Schnelligkeit und Zuverlässigkeit auf Entfernungen bis zu ca. 7 km wurden an vier Datensätzen aus den Jahren 1993 und 1994 durchgeführt. Zur besseren Vergleichbarkeit werden hier nur die Auswertungen dreier Datensätze dargestellt (Tab. 5.1). Ein weiterer Datensatz wurde 1993 in der Nähe des Flughafens in Hannover erstellt. Die zugehörige Untersuchung wurde ebenso wie die zum Datensatz (I) ausführlich im Zwischenbericht 1994 oder in *Böder* (1994) erläutert. Die Ergebnisse entsprechen im Grundsatz denen des Datensatzes (I).

Datensatz Jahr	(I) Norderney 1993	(II) Norderney 1994	(III) Norderney 1994	
		W-04-2-		
Fahrzeug	Schiff	So	chiff	
Datensatzlänge	2 Std. 10 min	2	Std.	
Entfernungsbereich	0,4 - 4 km	1 - 3 km		
verfügbare Satelliten	4-7	5-9		
System-	SA an	SA an		
verschlechterung	AS aus	A	S an	
Empfänger				
Referenzstation	Trimble 4000 SSE	Ashtech Z12	Ashtech Z12	
Mobilstation	Trimble 4000 SSE	Ashtech Z12	Trimble 4000 SSE	
Meßgrößen	P1 L1 P2 L2 D1			
Aufzeichnungsrate		1 sec		

Tab. 5.1: Untersuchte kinematische Datensätze

Die Untersuchung basiert auf der Segmentierung der Datensätze in Teilbereiche von wenigen Sekunden bis zu einigen Minuten Dauer und der Auswertung dieser Bereiche vollständig unabhängig vom Restdatensatz mit GEONAP. Es erfolgt eine Einteilung der Ergebnisse in Gruppen nach gelösten Mehrdeutigkeiten und korrekten Koordinaten.

Insgesamt werden hier vier unterschiedliche Auswertestrategien zur Lösung der Mehrdeutigkeiten in den vier kinematischen Datensätzen dargestellt. Da die Untersuchungen recht umfangreich und zeitaufwendig sind, wurden nicht alle Datensätze mit allen Strategien ausgewertet. Erkennbar wird hier auch die Entwicklung des Systems und der Software in den Jahren 1993 bis 1994. Die Tab. 5.2 listet die verschiedenen Auswertestrategien und die Datensätze auf, die mit diesen Verfahren bearbeitet wurden.

Auswertestrategie	Datensatz
Zweifrequenzauswertung mit extra-widelaning	(I)
Zweifrequenzauswertung mit sequentiell simultaner Ausgleichung der Trägerphasen L1, L2	(I)
Zweifrequenzauswertung mit streng simultaner Ausgleichung der Trägerphasen L1, L2	(III), (IV)
Einfrequenzauswertung mit L1	(I)

Tab. 5.2: Ubersicht über die Untersuchung der Datensätze mit verschiedenen Auswertestrategien, Numerierung der Datensätze nach Tab. 5.1

Die maximalen Entfernungen von bis zu 7 km in den Datensätze ergeben einen verschwindend geringen relativen Störeinfluß der Ionosphäre. Dies ist Voraussetzung für den Einsatz des *extra-widelaning*. Dabei wird genutzt, daß sich die effektive Wellenlänge der Linearkombinationen auf 1,72 m durch die Lösung des Ionosphärensignals LI vergrößert. Zur näherungsweisen Bestimmung der Mehrdeutigkeiten wurde mit Hilfe der Codemessungen eine Code/Trägerphasenkombination durchgeführt.

GEONAP bietet eine quasi-gleichzeitige Auswertung der Signale L1 und L2 in einer Ausgleichung an. Diese simultane Zweifrequenzauswertung war 1993 noch nicht vollständig in GEONAP umgesetzt und wurde zu der Zeit in einer sequentiellen Ausgleichung ausgeführt. Voraussetzung für diesen Ansatz ist ebenfalls ein vernachlässigbarer relativer Einfluß der Ionosphäre. Die größte effektiv wirksame Wellenlänge ist identisch mit dem *extra-widelaning*.

Die Umsetzung der streng simultanen Ausgleichung der Trägerphasen L1 und L2 ist in GEONAP 1994 eingeführt worden. Es wurden nur die Datensätze (III) und (IV) mit dieser Option ausgewertet.

Die letzte Untersuchung geht davon aus, daß keine L2-Daten verfügbar sind, jedoch Codeund Trägerphasenmessungen auf L1. In der Regel entspricht dies den Beobachtungsgrößen eines *Low-Cost* Empfängers, wobei der C/A-Code auf dem L1 Signal verwendet wird. Im Postprocessing mit GEONAP wurde der P-Code aus den vorliegenden Datensätzen nur zur Bestimmung von Näherungskoordinaten in der Einzelstationslösung verwendet.

Jede der Strategien wurde auf Schnelligkeit und Sicherheit in der Mehrdeutigkeitslösung untersucht. Die Schnelligkeit bezieht sich hierbei auf die Anzahl der aufeinanderfolgenden Epochen, mit denen eine Mehrdeutigkeitslösung herbeigeführt werden kann. Die Beobachtungszeiträume wurden jeweils in Segmente gleicher Dauer von wenigen Sekunden bis zu einigen Minuten Länge eingeteilt und einzeln mit derselben GEONAP - Strategie ausgewertet. Ein Vergleich mit den Ergebnissen einer GEONAP - Auswertung des

vollständigen Datensatzes ermöglicht Aussagen über korrekte Mehrdeutigkeitslösungen und korrekte Koordinatenschätzung.

Die Auswertung mit den verschiedenen Strategien wurde mit Stapelverarbeitungsroutinen durchgeführt, die für die Datensätze optimiert wurden und diese Auswertung quasi im Sinne einer Blackbox automatisieren. Diese Optimierung liefert jedoch nicht in allen Fällen zufriedenstellende Ergebnisse. So konnte in mehreren Fällen, in denen die Strategie nicht erfolgreich war, nach Sichtung der Daten eine Mehrdeutigkeitslösung durch Einwirken des Auswerters herbeigeführt werden.

GEONAP benutzt allgemeine Verfahren zur Mehrdeutigkeitsbestimmung, d.h., daß einzelne Mehrdeutigkeiten festgesetzt werden können. Dies verbessert die Lösung und somit die Eingrenzung des Lösungsraumes für verbleibende Mehrdeutigkeiten (Wübbena 1991). Es müssen somit nicht alle Mehrdeutigkeiten zwingend auf ganzzahlige Werte festgesetzt sein, um eine Position berechnen zu können. Damit ergibt sich eine Einteilung der Untersuchungen in Abhängigkeit von gelösten Mehrdeutigkeiten und geschätzter Position in vier Gruppen:

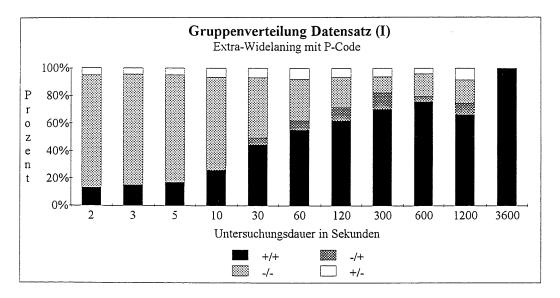
Gruppeneinteilung	korrekt geschätzte Koordinaten	falsch geschätzte Koordinaten
alle Mehrdeutigkeiten gelöst	+/+	+/_
nicht alle Mehrdeutigkeiten gelöst	-/ +	-/-

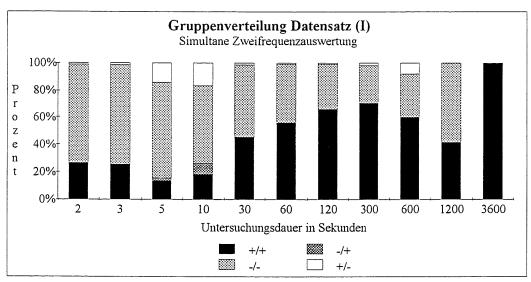
Tab. 5.3: Gruppeneinteilung; z.B. +/+ bedeutet alle Mehrdeutigkeiten gelöst mit korrekt geschätzten Koordinaten

Aus statistischer Sicht sind die längeren Untersuchungsintervalle durch die geringe Anzahl der Stichprobe nur eingeschränkt aussagekräftig. Auf der anderen Seite sind insbesondere die kurzen Untersuchungsintervalle mit wenigen Epochen zur Mehrdeutigkeitslösung für die Anwendung der OTW-Verfahren von Bedeutung. Untersucht wurden unterschiedliche Beobachtungszeiträume (2 - 3600 sec). Die Ergebnisse sind graphisch für den Datensatz (I) für jede angewendete Auswertestrategie in der nachfolgenden Abbildung 5.1 dargestellt. Weitere Angaben finden sich in *Heimberg*, *Seeber* (1994) und *Böder* (1994).

Untersuchung des Datensatzes (I) (1993)

Die erfolgreichste Auswertestrategie ist, besonders bei kurzen Zeiträumen, die simultane Zweifrequenzmessung. Bereits mit zwei Sekunden Daten sind in 26,5 Prozent der Fälle die Mehrdeutigkeiten korrekt gelöst worden. Diese Rate steigt auf 56,2 Prozent bei sechzig Sekunden bzw. 70,6 Prozent bei 5 min Beobachtungsdauer. Der Ansatz des *extra-widelaning* mit Code/Trägerphasenkombination ist in der Erfolgsquote nur geringfügig schlechter. Große Unterschiede sind nur bei einer sehr kurzen Beobachtungsdauer von zwei und drei Sekunden gegeben. Mit Einfrequenzdaten allein wird die Schnelligkeit der Mehrdeutigkeitslösung stark eingeschränkt. Unterhalb einer Minute Beobachtungsdauer lassen sich die Mehrdeutigkeiten selten lösen. Bei fünf Minuten Beobachtungszeit ist dies in 33,3 Prozent der Fälle möglich gewesen.





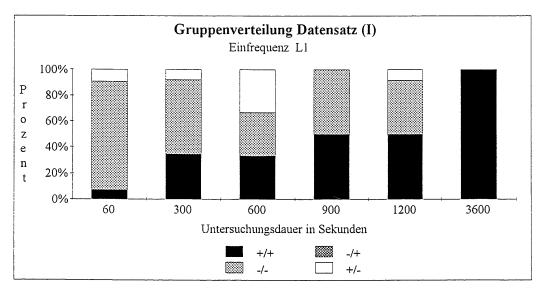


Abb. 5.1: Gruppenverteilung für den Datensatz (I), Norderney 1993

Die oben gezeigten Ergebnisse erlauben eine generelle Aussage über Operationalität und Zuverlässigkeit der OTW-Verfahren im Postprocessing. Im Detail sind jedoch ebenfalls

Aspekte wie Datenqualität, Satellitenkonstellation und Satellitenverfügbarkeit zur Beurteilung der Verfahren von Bedeutung. Dazu wurde das Programm RXPLOT zur Analyse der GPS-Meßdaten am Institut für Erdmessung entwickelt, das Daten im RINEX-Format verarbeitet. RXPLOT stellt die gemessenen Daten sowie Phasensprünge, Datenverluste, DOP-Werte unter Berücksichtigung von Signal/Rauschverhältnis und Elevation des Satelliten für unterschiedliche Frequenzen bzw. Linearkombinationen graphisch dar. Abbildung 5.2 zeigt beispielhaft die RXPLOT Ausgaben der bewegten Stationen für den Datensatz (II).

Die Tabelle 5.4 faßt die Ergebnisse aus der graphischen Datenanalyse mit dem Programm RXPLOT unter Berücksichtigung der Erfolgsquote der verschiedenen Auswertestategien zusammen. Angegeben sind wiederum die prozentualen Anteile der Gruppe "alle Mehrdeutigkeiten richtig gelöst und korrekte Koordinatenschätzung (+/+)" für die Untersuchungsdauer 3 und 60 sec. Der Datensatz wurde weiterhin in fünf Zeitabschnitte getrennt, die sich untereinander in der Anzahl beobachteter Satelliten und der Empfangsqualität der Signale unterscheiden. Die Angaben sind graphisch ermittelt worden (Böder 1994).

Abschnitt	Extra &	-wide	l	ltane & L2	Einfrequenz		Einfrequenz		Bemerkungen
	α	r	LIC	<u> </u>	L	<u>l</u>			
	3	60	3	60	3	60	Untersuchungsdauer in sec		
I	0	10	0	0	0	0	4/5 Satelliten, Störungen		
II	18	50	48	50	0	0	5/6 Satelliten, ohne Störung		
III	68	80	70	82	20	78	7±1 Satelliten, Störungen		
IV	20	52	10	69	0	0	6 Satelliten, ohne Störung		
V	17	28	7	12	0	0	5/4 Satelliten, Störungen		
gesamter									
Datensatz	15	56	26	56	-	7			

Tab. 5.4: Korrekte Koordinatenschätzung (+/+) in Prozent in Abhängigkeit von Satellitenkonstellation und Datenqualität für den Datensatz (I)

Der Vergleich zeigt, daß insbesondere die Anzahl und die Qualität der Daten eine entscheidende Rolle beim Erfolg der OTW-Verfahren für sehr kurze Beobachtungszeiten spielt, wie die besseren Erfolgsquoten bei ungestörten Daten bzw. vielen Satelliten zeigen.

In der oben erwähnten, hier nicht nachgewiesenen Untersuchung eines Datensatzes am Flughafen Hannover ist eine weitere Auswertestrategie angewendet worden. Dabei wurde angenommen, daß ein präziser Code für die Mehrdeutigkeitslösung nicht nutzbar ist. Das extra-widelaning ohne Code/Trägerphasenkombination erreichte bei weitem nicht das Niveau der anderen beiden Strategien zur Zweifrequenzauswertung. Der Anteil korrekter Lösungen bei der Verwendung von geometrischen Methoden zur näherungsweisen Bestimmung der widelane ist ungefähr um die Hälfte geringer. Dies zeigt die Bedeutung rauscharmer Codemessungen für die OTW-Verfahren.

Der vollständige Ausbau des GPS ist inzwischen erreicht (FOC, Full Operational Capability). Der Fortschritt bedingt durch bessere Satellitenkonstellationen und besseren Auswertealgorithmen wird im folgenden Abschnitt bei der Auswertung der Datensätze (II) und (III) deutlich.

Untersuchung der Datensätze (II) und (III)

Grundlage der Untersuchung ist die Segmentierung des kinematischen Datensatzes in Zeitabschnitte von nur 2 bis zu 30 Sekunden Länge. Jedes Segment wird hier unabhängig von dem Gesamtdatensatz mit nur einer einheitlichen GEONAP-Strategie ausgewertet, der strengen simultanen Zweifrequenzauswertung mit der GEONAP-Option +X im Zusammenhang mit der Einführung ionosphärischer Parameter.

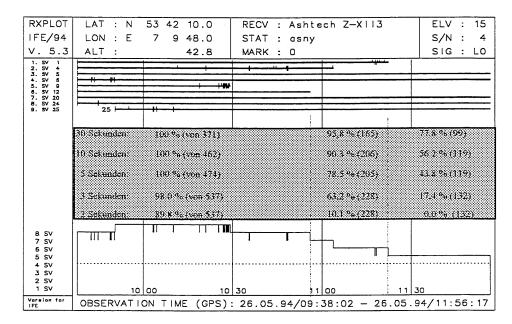


Abb. 5.2: Untersuchung zur schnellen Mehrdeutigkeitslösung mit GEONAP (strenge simultane Zweifrequenzauswertung): Korrekte Lösungen in Prozent für unterschiedliche Zeitdauern und Anzahl der Satelliten. Peilfahrt vor Norderney am 26.05.1994; Ashtech Z12

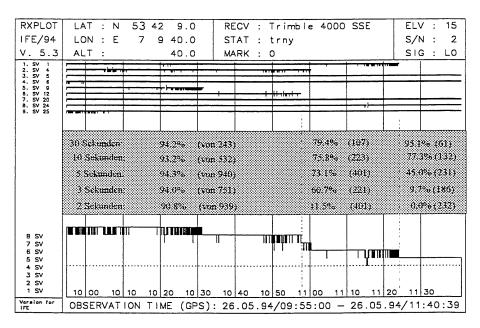


Abb. 5.3: Untersuchung zur schnellen Mehrdeutigkeitslösung mit GEONAP (strenge simultane Zweifrequenzauswertung): Korrekte Lösungen in Prozent für unterschiedliche Zeitdauern und Anzahl der Satelliten. Peilfahrt vor Norderney, 26.05.1994; Trimble 4000 SSE

Die Abbildungen 5.2 und 5.3 zeigen die Erfolgsquoten zu den jeweiligen Segmentlängen. Der Gesamtdatensatz ist zusätzlich unterteilt in Abschnitte mit unterschiedlicher Anzahl gemessener Satelliten.

Als repräsentative Grundaussage aus dem Gesamtergebnis ist das Ergebnis der Untersuchung mit Segmenten von 5 Sekunden Länge in der folgenden Tabelle 5.5 hervorzuheben.

Erfolgsquote	mit meistens	mit meistens	mit meistens	
bei 5 SekSegmenten	8 - 9 Satelliten	6 - 7 Satelliten	5 Satelliten	
TRIMBLE	94.3 %	73.1 %	45.0 %	
ASHTECH	100 %	78.5 %	43.8 %	

Tab.5.5: Erfolgsquoten bei der Lösung von Mehrdeutigkeiten im Postprocessing mit GEONAP

In nahezu allen Fällen war eine korrekte Mehrdeutigkeitslösung mit 8 bis 9 Satelliten möglich. Bei 6 bis 7 Satelliten lag die Erfolgsquote immer noch bei ca. 75 %, bei 5 Satelliten bei ca. 44 %

Es muß darauf hingewiesen werden, daß aus den Ergebnissen keine vergleichende Wertung in bezug auf die Qualität der Empfänger abgeleitet werden darf. Ein wesentlicher Unterschied, der einen direkten Vergleich direkt verbietet, ist die Anbringung der Antennen an unterschiedlichen Orten.

Vergleich der Untersuchungen

Abb. 5.4 zeigt deutlich, daß der neue Ansatz der strengen simultanen Zweifrequenzauswertung weitaus leistungsfähiger als die bisherigen GEONAP-Ansätze ist. Es wird in der Abbildung kein Unterschied bei der Anzahl gemessener Satelliten gemacht, sondern lediglich die korrekte Mehrdeutigkeitslösung im gesamten Datensatz unter Berücksichtigung unterschiedlicher Segmentlängen dargestellt. Die Kurven stehen im einzelnen für

- Einfrequenzauswertung L1 auf der Fahrt 1993. Die Mehrdeutigkeitslösung wurde nur über L1 mit P-Codemessungen herbeigeführt. Es sind mehrere Minuten Beobachtungszeit für eine Mehrdeutigkeitslösung notwendig. Ionosphärische Einflüße können nicht vermindert werden
- Extrawidelaning mit P-Code auf der Fahrt 1993. Hierzu sind Zweifrequenzmessungen und gute Codemessungen notwendig.
- Sequentielle simultane Zweifrequenzauswertung auf der Fahrt 1993. GEONAP-Option +L als Vorstufe der strengen simultanen Zweifrequenzauswertung.
- Strenge simultane Zweifrequenzauswertung auf der Fahrt 1994. GEONAP-Option +X. In der Abbildung sind Ashtech und Trimble-Messungen (verschiedene Standorte) getrennt dargestellt.

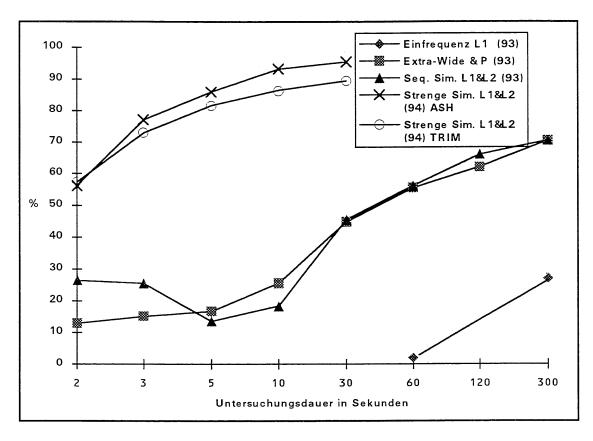


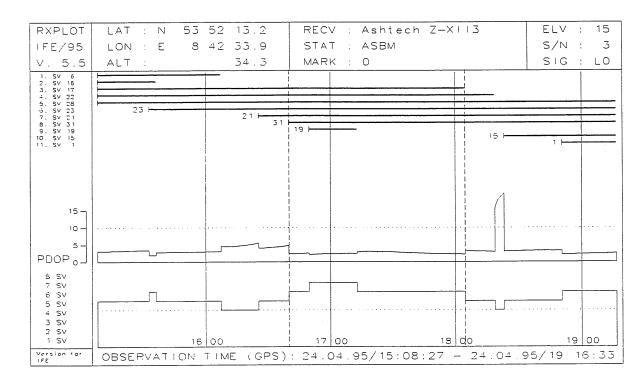
Abb. 5.4: Zuverlässigkeit unterschiedlicher Ansätze bei der Mehrdeutigkeitslösung mit GEONAP

Die Erfolgsquoten der strengen simultanen Zweifrequenzauswertung erreichen hier schon bei einer kurzen Beobachtungsdauer von nur 10 Sekunden in 90% der Fälle eine korrekte Mehrdeutigkeitslösung. Bei den älteren Ansätzen gelang dies nur in bis zu 30% der Fälle.

5.1.2 Untersuchung der OTW-Algorithmen auf Reichweite und Einsatz mehrerer Referenzstationen

Die vorangehenden Untersuchungen beziehen sich auf Entfernungen von unter 5 km zwischen Mobil- und Referenzstation. Auf einer Fahrt mit der VWFS Wega des Bundesamtes für Seeschiffahrt und Hydrographie (BSH) wurden die Untersuchungen auf Reichweiten bis zu 63 km bzw. für Genauigkeitsuntersuchungen auf 230 km ausgedehnt. Der Datensatz wird auch für die anschließende Untersuchung des Einsatzes von mehreren Referenzstationen bei der Mehrdeutigkeitsbestimmung verwendet.

Es wurden für die Messung zwei Referenzstationen eingerichtet, eine in Cuxhaven und eine weitere auf Helgoland. Die Koordinaten der Referenzstationen sind hochgenau aus dem KfKI-Projekt "Helgoländer Pegel" (Goldan 1995) bekannt. Es kamen Ashtech Z12 Empfänger zum Einsatz, die sekündlich Daten speicherten. Die Fahrtroute verlief direkt von Cuxhaven nach Helgoland. Die Elevationsmaske für die Auswertung wurde auf 15° gesetzt. Die oben beschriebene Vorgehensweise der Segmentierung des Datensatzes in Teile von wenigen Sekunden Dauer und unabhängiger Auswertung wurde auch hier angewendet. Es wurde die in den vorangegangenen Untersuchungen erfolgreichste Auswertestrategie der streng simultanen Zweifrequenzauswertung gewählt.



		Entfernung	zur	Station CUX			
4,1 km	11,1 km	18,5 km		29,7 km	43,3 km 	53,4 km	62.7 km
142000	144200	146400		149000	151480	153240	155000

Untersuchungsdauer 10 Sekunden

Anzahl	4 - 5 Sat		6 - 7 Sat		4 - 6 Sat	
Stationen	richtig	falsch	richtig	falsch	richtig	falsch
1	0 (0%)	5 (12%)	15 (29%)	1 (2%)	0 (0)	9 (20%)
2	3 (5%)	3 (5%)	42 (62%)	10 (15%)	2 (4%)	0 (0)

Sekunden

Untersuchungsdauer 120 Sekunden

Anzahl	4 - 5 Sat		6 - 7 Sat		4 - 6 Sat	
Stationen	richtig	falsch	richtig	falsch	richtig	falsch
1	3 (7%)	17 (40%)	30 (59%)	15 (29%)	3 (8%)	20 (56%)
2	16 (28%)	15 (26%)	67 (98%)	1 (2%)	10 (21%)	25 (53%)

Untersuchungsdauer 300 Sekunden

Chtorsachangsaaaci 200 zertanaen								
Anzahl	4 - 5 Sat		6 - 7 Sat		4 - 6 Sat			
Stationen	richtig	falsch	richtig	falsch	richtig	falsch		
1	2 (10%)	12 (57%)	22 (85%)	3 (12%)	3 (19%)	11 (69%)		
2	9 (33%)	12 (44%)	34(100%)	0 (0)	3 (13%)	14 (61%)		

Abb. 5.5: Untersuchung der OTW-Algorithmen auf große Entfernungen von 4 bis 63 km unter Nutzung einer bzw. zweier Referenzstationen, Fahrt mit der VWFS Wega, April 1995, 15° Elevation, strenge simultane Zweifrequenzauswertung mit GEONAP

Die Abbildung 5.5 stellt eine RXPLOT-Graphik und eine Entfernungsskala ausgehend von Cuxhaven den Verteilungen der zwei Gruppen +/+ (Mehrdeutigkeiten gelöst / Koordinaten korrekt) und +/- (Mehrdeutigkeiten gelöst / Koordinaten aber falsch) gegenüber. Die Fahrt wurde in drei Teile unterteilt, nämlich in Entfernungen von Cuxhaven

- (1) von 4 18 km mit 4 5 empfangenen Satelliten,
- (2) von 18 43 km mit 6 7 empfangenen Satelliten,
- (3) von 43 63 km mit 4 6 empfangenen Satelliten über 15° Elevation.

Die Gruppenverteilungen werden für die Segmentlängen 10, 120 und 300 Sekunden Dauer dargestellt, jeweils für die Untersuchung mit einer Referenzstation (Cuxhaven) und zwei Referenzstationen (zusätzlich Helgoland).

Bei Konstellationen mit weniger als 6 Satelliten zeigen die Mehrdeutigkeitssuchalgorithmen auch auf kurzen Entfernungen unter 18 km starke Schwächen. So werden bei der Nutzung von nur einer Referenzstation stets mehr falsche als richtige Lösungen erzeugt. Bei mindestens 6 Satelliten in dem Bereich von 18 - 43 km werden bereits in 29% der Fälle mit 10 Sekunden die Mehrdeutigkeiten korrekt gelöst. Für Untersuchungsdauern von 120 Sekunden wächst diese Zahl auf 59%, für 300 Sekunden auf 85%. Auffällig die hohe Zahl falsch gelöster Mehrdeutigkeiten in diesem Bereich für die Dauer von 120 Sekunden bei nur einer Referenzstation. Sie liegt hier bei 15%.

Durch den Einsatz zweier Referenzstationen wird die Lösung der Mehrdeutigkeiten zunehmend sicherer. Im allgemeinen steigt dadurch die Prozentzahl korrekt gelöster Mehrdeutigkeiten (Ausnahme: 3. Bereich bei 300 sec) um bis zu 39%. Die Zahl falsch gelöster Fälle sinkt um bis zu 27% (je 2. Bereich, 120 sec; Ausnahme: 2. Bereich, 10 sec).

Abb. 5.6 verdeutlicht den Anstieg der Zuverlässigkeit bei Nutzung einer zweiten Referenzstation zur Mehrdeutigkeitslösung. Aufgetragen ist der Anteil der korrekt gelösten Mehrdeutigkeiten für den zweiten Bereich bei Entfernungen von ca. 20 km bis 40 km zu beiden Referenzstationen.

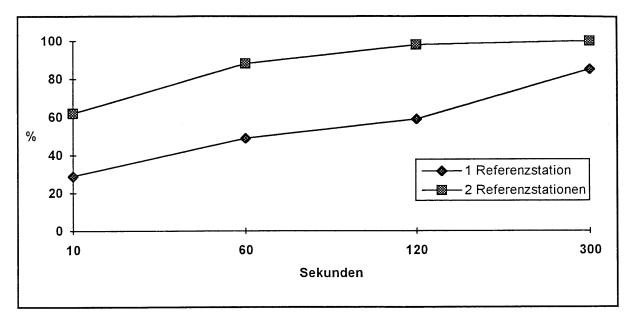


Abb. 5.6: Anteil korrekt gelöster Mehrdeutigkeiten auf Entfernungen von ca. 20 bis 40 km unter Nutzung einer bzw. zwei Referenzstationen, Fahrt mit der VWFS Wega, April 1995, 15° Elevation, strenge simultane Zweifrequenzauswertung mit GEONAP

Die Nutzung mehrerer Referenzstationen ergibt für den Nutzer kinematischer GPS-Anwendungen eine größere Zuverlässigkeit und Schnelligkeit bei der Mehrdeutigkeitslösung. Es kann auch ein Genauigkeitsgewinn erwartet werden. Übertragen auf Echtzeitanwendungen lassen die Ergebnisse erwarten, daß ein Online-Informationsaustausch zwischen mehreren Referenzstationen mit der Modellierung entfernungsabhängiger Fehleranteile eine größere Sicherheit für die RTK-Verfahren liefern würde.

5.1.3 Genauigkeit der Positionierung mit GPS in kinematischen Anwendungen

Die Überprüfung hochpräziser kinematischer hydrographischer GPS-Anwendung fällt naturgemäß schwer, da es keine genaueren Methoden gibt, die auch über lange Entfernungen eine dem PDGPS entsprechende Genauigkeit liefert. In kurzen Bereichen könnten tachymetrische Zielverfolgungssysteme einen Beitrag leisten, doch hätte man hier das Problem der genauen Zeitzuordnung.

Es wurden drei Methoden angewendet, um dennoch zu einer Aussage zur Genauigkeit zu kommen

- 1. der Vergleich der Höhenkomponente der GPS-Lösung reduziert auf NN und der Wasseroberfläche am Schiff (Schiff als schwimmender Pegel) mit Pegelmessungen
- 2. der Vergleich zweier Peilfahrten mit GPS-beschickten Tiefenmessungen über dasselbe Profil
- 3. der Vergleich zweier GPS-Lösungen über verschiedene Referenzstationen.

Im ersten Falle besteht das Problem, daß die Pegelmessungen nicht in derselben Auflösung vorliegen wie die GPS-Lösungen. Gleichfalls wirken auf das Schiff und die umgebende Wasseroberfläche andere Einflüsse als auf den Pegel, die schlecht zu modellieren sind. Ein Vergleich wurde für eine Peilfahrt der Nynorderoog vor Norderney durchgeführt. Die ellipsoidische GPS-Höhe wurde um die Antennenhöhe über dem Wasserspiegel (gemessen mit

Meßband), der Geoidhöhe und einer lokalen Anpassung reduziert und mit Messungen umliegender Pegel verglichen. Das Ergebnis ist in Abb. 5.7 zu sehen.

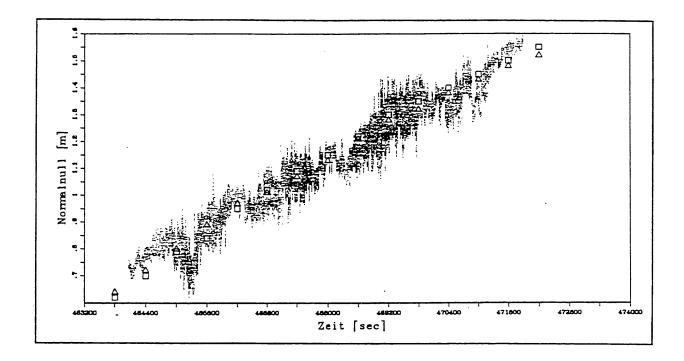


Abb. 5.7: Vergleich Pegelmessung und DGPS-Höhenbestimmung (nach Heimberg 1994); □ Pegel Norderney, △ Pegel Busetief

Der Verlauf der Pegelwerte entspricht dem Verlauf der Höhenkurve der GPS-Lösung. Die ansteigende Kurve ist auf die auflaufende Flut zurückzuführen. Die GPS-Lösung streut um weniger als \pm 10 cm. Dies dürfte der Dynamik des Schiffes durchaus entsprechen. Erkennbar ist auch das geringere Streuen am Anfang und am Ende des Datensatzes, das auf ruhigeren Wassergang im Hafen zurückzuführen ist.

Der Vergleich zweier Peilfahrten mit GPS beschickten Tiefenmessungen über ein Profil wurde mit der VWFS Wega im April 1995 in der Nordsee, 10 bis 15 km von der Referenzstation Cuxhaven entfernt, durchgeführt. Da dasselbe Profil zweimal abgefahren wird, kann dies Verfahren quasi als ein Vergleich über "ground truth" angesehen werden. Das Profil hat eine Länge von ca 4,2 km und wurde an zwei verschiedenen Tagen (24.04.-28.04.1996) aufgenommen. Die Punktabstände zwischen jeder Tiefenmessung betragen ca. 40 m. Die Abbildung 5.9 zeigt die horizontalen Abweichungen beider Fahrten von der Solltrajektorie. Die Differenzen zwischen den Trajektorien betragen bis zu 15 m in dem zu vergleichenden Bereich zwischen der 700 m-Marke und der 4900m-Marke. Abb. 5.8 zeigt die mit GPS beschickten Tiefen mit ellipsoidischen Höhen.

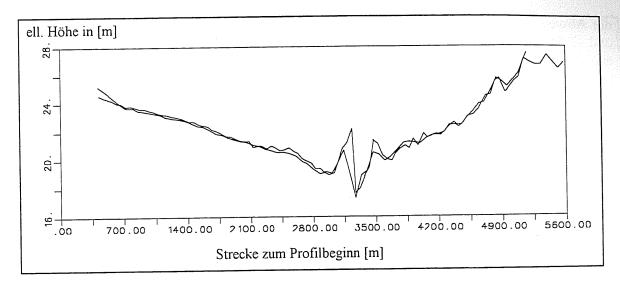


Abb.5.8: Vergleich der gemessenen Tiefen am 24. und 28.04.1995 in [m], WGS84

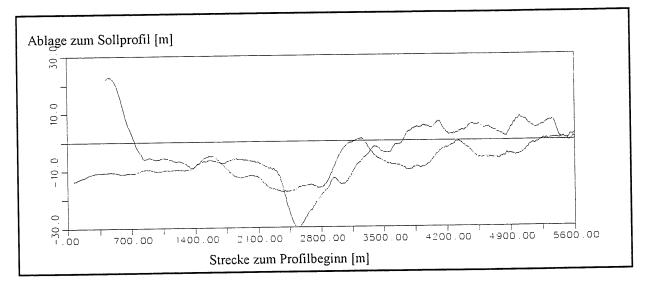


Abb. 5.9: Vergleich der Abweichungen zu einer Solltrajektorie am 24. und 28.04.1995 in [m]

Ein graphischer Vergleich der Tiefen ergibt Abweichungen von größtenteils kleiner als 10 cm, in einigen Bereichen (2500 m- und 3800 m-Marke) 30 bis 40 cm. Dort sind laut Abb. 5.9 auch die horizontalen Abweichungen zwischen den Trajektorien am größten, die Abweichungen sind daher aus den nicht identischen Profilen zu erklären. In dem Bereich bei ca. 3300 m ist eine besonders große Abweichung der Tiefen von über einem Meter zu erkennen. Laut Seekarte und von der BSH gelieferter Wrackbeschreibung liegt an diesem Ort ein gesunkenes Schiff, das an unterschiedlichen Stellen abgefahren wurde. Letztendlich kann auch hier eine Genaugkeit von unter 10 cm abgeleitet werden, wenn die Extrema wegen obiger Gründe vernachlässigt werden. Bessere Ergebnisse sind aufgrund der Querbweichungen zwischen den Profilen und der innerhalb von 4 Tagen zu vermutenden Bodenbewegungen nicht zu erwarten gewesen.

Der Vergleich zweier GPS-Lösungen über zwei verschiedene Referenzstationen setzt voraus, daß die Koordinatenunterschiede zwischen den Referenzpunkten hochgenau bekannt sind. Im Falle der Wega-Fahrt war dies für die Punkte Cuxhaven und Helgoland gegeben. Für einen Abschnitt der Fahrt, der 2 bis 20 km von Helgoland und 40 bis 60 km von Cuxhaven entfernt gefahren wurde, wurde je eine Lösung berechnet und miteinander verglichen. Abb. 5.10 stellt

die Abweichungen in der Höhenkomponente dar. Die Differenzen betragen zwischen + 6 cm und -3 cm. Aus Abb. 5.11 wird ersichtlich, daß die quadratisch aufsummierten Abweichungen aller Komponenten im Bereich der Standardabweichungen liegen, die für die von Helgoland bestimmte Lösung berechnet wurden, nämlich zwischen 2 und 7 cm. Die Standardabweichungen für die Lösung über Cuxhaven liegen noch etwas höher bei 7 bis 11 cm.

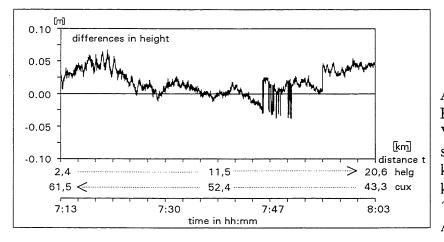


Abb. 5.10:
Höhendifferenzen bei Verwendung der Referenzstationen Cuxhaven (40-60 km) und Helgoland (2-20 km); GEONAP Option '+X'; VWFS Wega, Ashtech Z12, 28.04.1995.

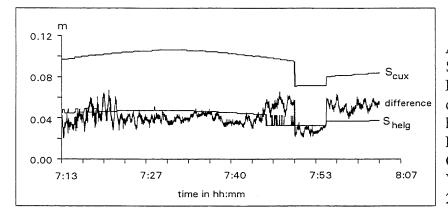


Abb. 5.11:
Standardabweichungen der Positionen bei Verwendung der Referenzstationen Cuxhaven (40-60 km) und Helgoland (2-20 km); GEONAP Option '+X'; VWFS Wega, Ashtech Z12, 28.04.1995.

Genauigkeit über große Entfernungen

Für Anwendungen bei Entfernungen über 230 km wurde auf der Wega-Fahrt ein Test in dem Gebiet 'Steingrund' durchgeführt. Zum einen wurde die Station Helgoland zur Generierung einer Sollösung verwendet. Die Entfernung zwischen Helgoland und dem Steingrund beträgt ca. 30 km. Eine weitere Referenzstation wurde auf dem Meßdach in Hannover installiert. Die Entfernung sowohl zum Steingrund als auch nach Helgoland beträgt ca. 230 km. Es konnten ständig 6 bis 8 Satelliten über 15° Elevation empfangen werden. Die Aufzeichnungsrate betrug 2 Sekunden. Die Abweichungen betrugen für die Längenkomponente im Mittel 15° cm mit einer Streuung von \pm 4 cm, für die Breitenkomponente 4 cm \pm 2 cm und für die Höhe im Mittel 14° cm mit einer Streuung von \pm 6 cm (siehe Abb. 5.12). Die Abweichungen können zum einen auf ungenaue Ausgangskoordinaten zurückgeführt werden. Zum anderen spiegeln sich jedoch auch systematische Restfehler wider.

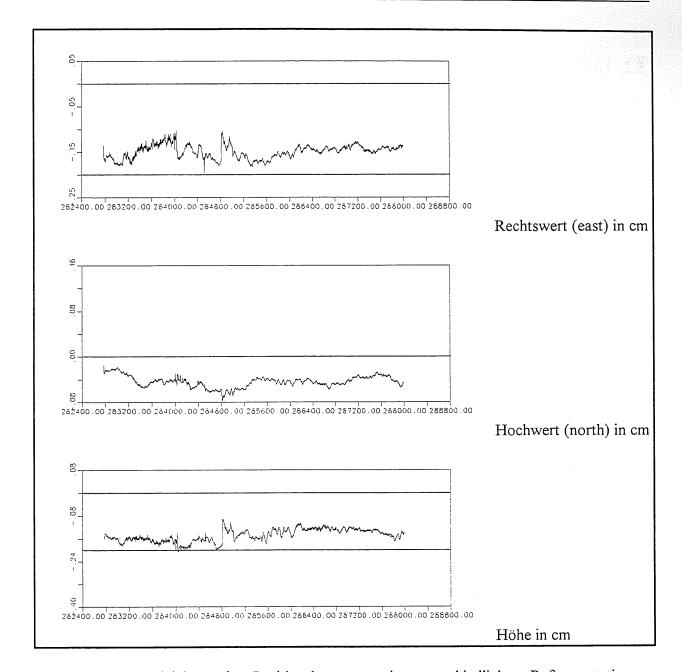


Abb. 5.12: Vergleich zweier Positionslösungen mit unterschiedlichen Referenzstationen; Helgoland in 30 km und Hannover in 230 km Entfernungen zur WEGA; Auswertung mit GEONAP, Option +X mit Nutzung präziser Ephemeriden (NGS); Differenzen in Rechts (east), Hoch (north) und Höhe in [cm]

54

5.2 Untersuchungen in Echtzeit mit GNRT

Die bisher dokumentierten Untersuchungen haben gezeigt, daß eine hochpräzise kinematische GPS-Positionierung im Postprocessing möglich ist. Die Schnelligkeit der Mehrdeutigkeitssuchalgorithmen läßt vermuten, daß präzise kontinuierliche Höhenzuordnungen auch in Echtzeit möglich sind.

Seit 1993 werden hochpräzise RTK-Systeme von einzelnen Empfängerherstellern (siehe Kapitel 4.2.4) angeboten. Die Nutzung solcher Systeme ist auf einige spezielle Empfängertypen beschränkt. Mit GNRT der Firma Geo++ in Garbsen verfügt das Institut für Erdmessung über ein empfängerunabhängiges RealTime-Meßsystem, das auf der Basis der GEONAP-Software entwickelt wurde. In dem Modul GNRT-K sind schnelle OTW-Algorithmen implementiert, die hochpräzise Positionierungen gestatten. Im folgenden sollen verschiedene Untersuchungen zur Genauigkeit und Schnelligkeit der Echtzeit-Lösungen beschrieben werden.

5.2.1 Zuverlässigkeit und Schnelligkeit der OTW-Algorithmen in GNRT-K

Die Leistungsfähigkeit eines Echtzeit-PDGPS-Systems ist neben Genauigkeit und Nutzerfreundlichkeit an der Schnelligkeit der Mehrdeutigkeitsbestimmung zu messen. Die Zeit vom Start des Suchalgorithmus bis zur Festsetzung der ganzzahligen Mehrdeutigkeiten wird allgemein als TTFA, "time to fix ambiguity", bezeichnet. Zur Untersuchung der TTFA-Zeiten wurde auf einer Peilfahrt mit der Nynorderoog von Norderney nach Baltrum und zurück wiederholt über eine Reset-Option in der Software alle Parameter zurückgesetzt und in der Bewegung neu bestimmt. Die Zeiten vom Neustart bis zur korrekten Lösung samt Anzahl der Satelliten und Entfernung von der Referenzstation wurden notiert. Die Distanzen reichen von 600 m vor Norderney bis zu 15 km vor Baltrum. Die Aussendung der RTCM-Korrekturen erfolgte aus funktechnischen Gründen auf der HPPS-Station Norderney (0004) im 2 Sekunden Takt. Normalerweise ist eine Aussendung im Sekundentakt vorgesehen, die Lösungen werden also mit großer Wahrscheinlichkeit in bis zur Hälfte der gemessenen Zeiten zu erwarten sein.

In der Abb. 5.13 sind die zur Mehrdeutigkeitslösung benötigten Zeiten bzw. Epochen gegenüber der Entfernung der Nynorderoog zur Referenzstation während der Initialisierung dargestellt. Zusätzlich ist an den zugehörigen Balken die Anzahl der Satelliten angegeben. Während der Fahrt ist immer eine Mehrdeutigkeitslöung in wenigstens 34 sec (17 Epochen) und höchstens 458 sec (229 Epochen), also in 0.5 min bis zu 6.5 min möglich gewesen.

In Abb. 5.14 wird die Information der Abb. 5.13 auf die Konstellationen mit 7 Satelliten beschränkt. Es wird gezeigt, daß der Hauptteil der TTFA-Werte unter 120 Sekunden entsprechend 60 Epochen liegt. Erst ab 4 km Reichweite von der Referenzstation werden teilweise längere Initialisierungszeiten benötigt. Zwischen 8 und 14 km werden ca. 60 % der Lösungen in weniger als 60 Epochen gelöst, der Rest in maximal 160 Epochen.

Als Gesamtergebnis unabhängig von den unterschiedlichen Satellitenkonstellationen und Entfernungen zur Referenzstation kann für diesen Test festgehalten werden, daß OTW-Mehrdeutigkeitsbestimmungen für Entfernungen bis zu 15 km und zumeist 7 Satelliten mit dem Echtzeit-PDGPS-System GNRT-K zu 60 Prozent nach weniger als 2 Minuten, entsprechend 60 Epochen gelöst wurden.

Eine ähnlich angelegte Untersuchung der Firma Geo++ mit GNRT-K in der Nähe von Hannover, veröffentlicht in *Bagge*, *Wübbena* (1995), zeigt entsprechende Ergebnisse.

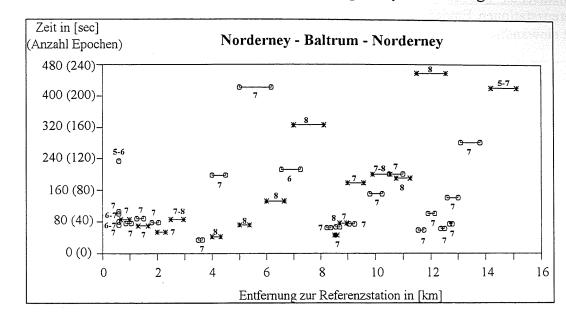


Abb. 5.13: TTFA-Werte für eine Peilfahrt mit der Nynorderoog, Referenzstation Norderney

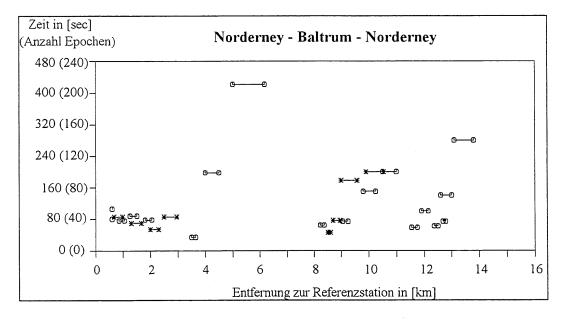


Abb. 5.13: TTFA-Werte für eine Peilfahrt mit der Nynorderoog, Referenzstation Norderney, Konstellationen mit 7 Satelliten

In einer zweiten Untersuchung wurden die in Küstennähe gelegenen Permanentstationen Hamburg, Cuxhaven, Norderney und Emden, für die sowohl auf NN bezogene Höhen als auch auf das DREF91 bezogene ellipsoidische Höhen vorlagen, benutzt. In unmittelbarer Nähe zu bekannten Höhenpunkten im Höhenstatus 140 der Niedersächsischen Landesvermessung wurde ein GPS-Empfänger statisch auf einem Stativ betrieben. Der Höhenstatus 140 bezeichnet die 1990 in Niedersachsen in die Punktdatei übernommenen normalorthometrischen Höhen des Deutschen Haupthöhennetz DHHN 85 (Wübbelmann 1993, Kulle 1993). Die Entfernungen zu den Referenzstationen betrugen 17 km bis 29 km. Die NN-Höhen wurden per

Nivellement mit Millimetergenauigkeit auf die GPS-Antenne übertragen. Mit der Software GNRT-K wurden verschiedene Mehrdeutigkeitsfestsetzungen sowohl im statischen als auch im kinematischen Modus durchgeführt, wobei die Antenne nicht bewegt wurde. Auf den Referenzstationen Emden und Norderney arbeitete die Telemetrie während des Experiments nicht einwandfrei.

Station	Entfernung	Statisch	Kinemat.	TTFA	TTFA	Anzahl	RTCM-
	zur Referenz	Anzahl	Anzahl	statisch	kinemat.	Satelliten	Empfang
		fixings	fixings	(Mittel)	(Mittel)		
		(korrekt	(korrekt				
	[km]	/falsch)	/falsch)	[sec]	[sec]		
Hamburg							
Ovelgönne	18,4	2 (2/0)	3 (2/1)	308	460	5-7	gut
Horneburg	28,4	4 (4/0)	3 (3/0)	130	244	6-8	gut
Cuxhaven							
Belum	17,5	3 (3/0)	3 (3/0)	88	73	8-9	leicht
							gestört
Imsum	29,0	4 (4/0)	5 (1/4)	492	150	6-7	gestört
Emden							
Greetsiel	23,4	0	1 (1/0)		nicht	6-8	stark
					protokolliert		gestört
Norderney							
Greetsiel	18,6	3 (3/0)	2 (2/0)	93	150	7-8	gut
							(2 sec Takt)

Tab. 5.6: Übersicht über Punktentfernungen zur Referenzstation, Anzahl der fixings im statischen und im kinematischen Modus, Dauer der Mehrdeutigkeitsfestsetzung, Anzahl der beobachteten Satelliten und RTCM-Empfang auf den Punkten

Tabelle 5.6 zeigt die Anzahl der korrekt und falsch festgesetzten Mehrdeutigkeiten auf den Punkten und die TTFA-Zeiten, jeweils getrennt für den statischen und den kinematischen Modus. Im kinematischen Modus kam es in Ovelgönne und in Imsum zu fehlerhaften Festsetzungen der Mehrdeutigkeiten. Die gemittelten Zeiten, die zum korrekten Fixing benötigt werden, sind im kinematischen Modus im allgemeinen länger. Sie hängen im wesentlichen von der Anzahl der empfangenen Satelliten und der Güte des empfangenen Signals der Referenzstationen ab. Ersteres wird ersichtlich beim Vergleich der Stationen Ovelgönne und Greetsiel über Norderney, wo sich der TTFA-Wert auf ähnlich großer Entfernung durch eine höhere Anzahl beobachteter Satelliten auf ca. 35% verringert. Der gestörte Empfang des Referenzstationssignals führt in Imsum zu falsch festgesetzten Mehrdeutigkeiten und im statischen Modus zu einer stark erhöhten Festsetzungsdauer (im Vergleich mit Horneburg). Das TTFA-'Mittel' für den kinematischen Modus ergibt sich nur aus einem Wert, der zudem bei relativ ungestörtem RTCM-Empfang entstand. In Greetsiel konnte aufgrund der schlechten Empfangsqualität des RTCM-Signals nur ein kinematisches Fixing durchgeführt werden. Fazit dieses Vergleichs ist, daß der Datenübertragungskomponente eine wesentliche Bedeutung für die Operationalität des Verfahrens zukommt. Auf eine leistungsfähige Installation der Sendeeinrichtungen muß geachtet werden.

Im Falle einer falschen Mehrdeutigkeitsfestetzung ist es oft nicht sofort erkenntlich, daß ein Fehler vorliegt. Gelegentlich wird die Festsetzung vom Programmsystem GNRT zurückgesetzt. Oftmals wird die Lösung aber beibehalten, so daß der Nutzer ein falsches Ergebnis erhält. Besonders bei kinematischen Anwendungen ist ein solcher Fehler schlecht

erkennbar. Die Auswirkungen falsch festgesetzter Mehrdeutigkeiten sind in Abb. 5.15 zu sehen.

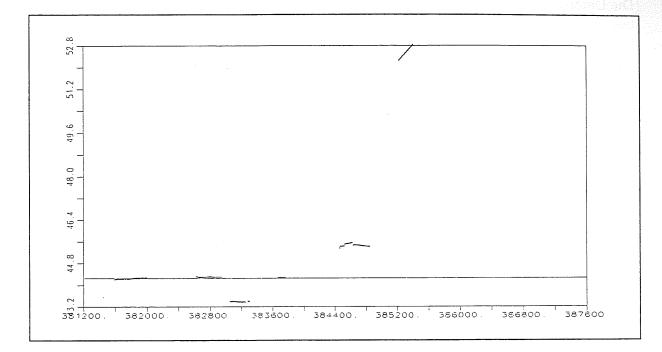


Abb. 5.15: Station Imsum (29,0 km), Höhen bei gelösten Mehrdeutigkeiten, teilweise mit falscher Festsetzung; Zeit in Wochensekunden gegenüber ellipsoidischer Höhe in m

Die Darstellung zeigt die Höhe aus GNRT in Metern gegen die Zeit in Wochensekunden. Der horizontale Strich bei 44,27 m zeigt die Sollhöhe aus gemittelten richtigen GNRT-Lösungen. Die Lösungen ab den Zeiten 381600, 382600 und 383600 Sekunden sind korrekt. Die Höhen der falschen Mehrdeutigkeitsfestsetzung bei 383000 Sekunden weichen um ca. 1 m, die Höhen bei 384400 Wochensekunden um ca. 1,4 m von der Sollösung ab. In beiden Fällen halten sich die falschen Höhen mit nahezu konstanten Abweichungen länger als 5 Minuten auf einem Niveau. Danach wurde die Messung durch manuelles Eingreifen unterbrochen. Die Höhen liegen somit in der Nähe korrekter Lösungen und weisen im Verlauf der Messung kein abnormes Verhalten auf. Anders verhält es sich bei dem letzten falschen Fixing bei 385200 Sekunden. Hier ist die Höhe um ungefähr 8 m falsch und zeigt eine auffällige Drift um ca. 20 cm pro Minute. Diese Lösung würde ein Beobachter nach Augenschein schnell verwerfen.

Eine falsche Mehrdeutigkeitsfestsetzung, wie sie in den ersten beiden Fällen gegeben ist, wird in der Praxis bei einem bewegten Empfänger schwer zu erkennen sein. Es empfiehlt sich darum, grundsätzlich nicht nur eine Mehrdeutigkeitsfestsetzung durchzuführen, sondern zur Kontrolle mindestens zwei. Auch kann eine Plausibilisierung mit anderen Messverfahren Abhilfe schaffen, wie sie zum Beispiel in HYMAS, dem hydrographischen Aufnahmesystem der BfG, implementiert ist. Ein wichtiges Ziel künftiger Anstrengungen muß die Entwicklung zuverlässigerer GPS-Lösungen auch in gestörter Umgebung sein. Die Stützung der Positionsbestimmung mit einem weiteren Meßsystem (z.B. Inertiale Navigationssysteme, INS) im Falle des Ausfalls der GPS-Positinierung ist ratsam.

5.2.2 Genauigkeit von GNRT-K Lösungen

Die Untersuchung zur Genauigkeit der Echtzeitlösung mit GNRT-K bezieht sich auf den oben beschriebenen Messungsaufbau unter Verwendung der Permanentstationen Hamburg, Cuxhaven, Norderney und Emden. Es werden die aus GNRT erhaltenen Höhen unter Einbeziehung eines Quasigeoids und einer lokalen Anpassung mit den NN-Höhen nivellierter Punkte im Höhenstatus 140 der niedersächsichen Landesvermessung verglichen.

Die Abbildungen 5.16 und 5.17 zeigen die Variationen der Höhenkomponente für jede Epoche, zu der eine Mehrdeutigkeitslösung vorlag. Die ruhigeren Verläufe entsprechen den Zeiten mit statischer Lösung, die stärker streuenden Höhen zeigen die Zeiten mit der Annahme, der Empfänger wird bewegt.

Auf der Station Horneburg (Abb. 5.16) mit einer Entfernung von 28,4 km von der Referenzstation Hamburg ergeben sich Variationen von bis zu 10 cm bei der kinematischen Lösung. Sprünge von bis zu 2 cm durch Ausfall oder Hinzunahme eines oder mehrerer Satelliten sind möglich. Die Höhen der statischen Lösungen ändern sich nur um maximal 4 cm. Sprünge sind hier nicht zu erkennen.

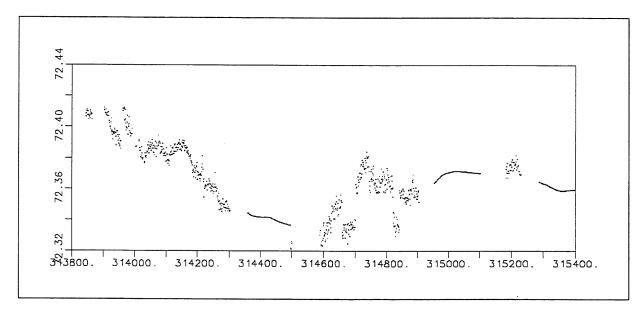


Abb.5.16: Station Horneburg (28,4 km), Höhen bei gelösten Mehrdeutigkeiten; Zeit in Wochensekunden gegenüber ellipsoidischer Höhe in m

Ruhiger verhält sich die Höhenkomponente auf der Station Belum in nur 17,5 km Entfernung von der Referenzstation Cuxhaven (Abb. 5.17). Der maximale Unterschied zwischen den verschiedenen Lösungen beträgt 3,2 cm, für die statische Höhenkomponente ergibt sich eine maximale Abweichung von kleiner als 1 cm in den hier dargestellten 11 min.

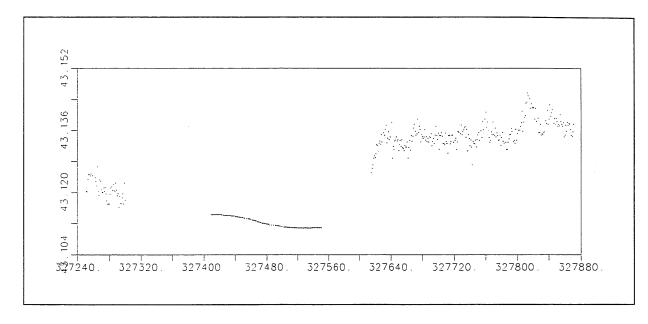


Abb.5.17: Station Belum (17,5 km), Höhen bei gelösten Mehrdeutigkeiten; Zeit in Wochensekunden gegenüber ellipsoidischer Höhe in m

Der Vergleich der Ergebnisse läßt eine Abhängigkeit zwischen der Streuung der Positionen und der Entfernung zur Referenzstation vermuten. Quantitativ soll hier keine Aussage getroffen werden, da umgebungsbedingte Einflüsse (Multipath) und unterschiedliche Satellitenkonstellationen nicht bestimmt werden können. Hier sind umfassendere Untersuchungen notwendig.

Für den Nutzer ist interessant, mit welchen Genauigkeiten abhängig von der Entfernung von einer einzelnen Referenzstation eine Punktbestimmung in Echtzeit vorgenommen werden kann. Zielgröße ist dabei im allgemeinen eine Höhe über dem NN. Zur Transformation ellipsoidischer Höhen auf NN ist die genaue Kenntnis des Geoids notwendig. Sie ergibt sich aus einem am Institut für Erdmessung berechneten Quasigeoid, das für den norddeutschen Bereich in hoher Genauigkeit vorliegt. Aus Vergleichen mit GPS/Nivellement Projekten (HEINAC91, HEINAC92, GPS Traverse, etc.; siehe *Denker* 1994) ist eine Genauigkeit von 1..2 cm auf 50..100 km abgeschätzt worden. Lokal in Gebieten mit geringer Zahl an gravimetrischen Messungen kann es zu größeren Abweichungen kommen. Für die Untersuchungen kann das Quasigeoid mit zu erwartenden geringen Abweichungen im Millimeterbereich lokal als eine Realisierung des NN-Höhensystems angenommen werden.

Die Spalte 6 der Tabelle 5.7 gibt Aufschluß über die erzielten Genauigkeiten im Vergleich zu den nivellierten Höhen. Die Berechnung erfolgt über folgenden Weg:

ellipsoidische DREF-Höhe auf Referenzstation (Sp. 4)

mimus Geoidundulation auf Referenzstation

mimus gegebene NN-Höhe (HS140; Sp. 5)

=> lokale Dif

ellipsoidische DREF-Höhe auf Neupunkt (Sp. 4)

minus Geoidundulation auf Neupunkt

mimus lokale Differenz Quasigeoid zu NN

nivellierte Höhe des Neupunktes (an HS140; Sp. 5) mimis NN- Höhe des Neupunktes über GPS (Sp. 6)

=> lokale Differenz Quasigeoid zu NN

=> NN - Höhe des Neupunktes (GPS)

=> Differenz in Spalte 6

					
1	2	3	4	5	6
Station Entfernung		max. Streuung	Höhe	NN-	Differenz
	zur	(Breite-Länge-	(ell.)	Höhe	(NN-
	Referenz	Höhe)	DREF	geg.	ang. Geoid)
Referenz					
Hamburg			93,567	53,635	
Ovelgönne	18,4 km	19 - 11 -55 mm	55,408	15,322	-0,012
Horneburg	28,4 km	14 - 12 - 41 mm	72,498	32,441	-0,119
Referenz					
Cuxhaven			69,836	30,488	
Belum	17,5 km	10 - 6 - 20 mm	43,360	3,993	-0,020
Imsum	29,0 km	35 - 11 - 40 mm	44,505	4,715	-0,223
Referenz					
Emden			57,138	16,636	
Greetsiel	23,4 km	9 - 1- 61 mm	48,880	8,687	-0,050
Referenz					
Norderney			51,562	11,576	
Greetsiel	18,6 km	18 - 9 - 6 mm	48,905	8,687	0,015

Tab. 5.7: Übersicht über die Stationen, die Entfernung zur Referenzstation, die maximale Streuung der Koordinatenkomponenten, die an DREF angepaßten Höhen, die NN-Höhen und die Differenzen zwischen gegebenen NN-Höhen sowie aus RT-PDGPS und Quasigeoid gewonnenen lokal angepaßte Höhen (Mittel aus statischen Fixings)

Die Abweichungen betragen auf kurzen Entfernungen unter 20 km bis zu 2 cm. Über 20 km kommt es zu Abweichungen von 5 cm bis zu 22,3 cm im Falle eines Punktes (Imsum). Dort gab es auch Schwierigkeiten mit falsch festgesetzten Mehrdeutigkeiten, wie sie in Kap. 5.2.1 dokumentiert sind. Eine Entfernungsabhängigkeit ist aus dem Datenmaterial nicht nachweisbar, aber zu vermuten. Hier bedarf es weiterer Untersuchungen.

5.3 Untersuchung der Echtzeitmehrdeutigkeitslösung mit der Trimble RTK/OTF - Option

Ein entsprechender Datensatz wurde in Zusammenarbeit mit der Firma GEONAV in Wunstorf generiert. Er erlaubt den Vergleich der Lösung aus der von Trimble angebotenen echtzeitfähigen RTK/OTF-Option mit im Postprocessing mit GEONAP gewonnenen Lösungen sowohl mit einem Ashtech als auch mit dem Trimble Empfänger. Hierzu wurde ein Zero-Baseline Aufbau gewählt. Über einen "Power-Splitter" können die empfangenen Signale einer GPS-Antenne von zwei Empfängern aufgezeichnet werden. Durch den Zero-Baseline Aufbau werden Zentrierungsprobleme der bewegten Antenne umgangen.

Im Rahmen dieser Messung wurden zwei unterschiedliche Experimente durchgeführt:

- die Zerobaseline mit zwei Trimble Empfänger
- die Zero-Baseline mit einem Trimble und einem Ashtech-Empfänger.

Zero-Baseline mit zwei Trimble Empfängern

Die Zero-Baseline wurde mit zwei Trimble 4000 SSE Geräten gebildet, von denen im RTK-Modus einer der Referenzempfänger und der andere der zu positionierende Empfänger ist. Die berechneten Koordinaten des bewegten Empfängers müssen bei gemeinsamer Antenne identisch mit den Referenzkoordinaten sein. Die Telemetrie wurde in diesem Experiment unterbrochen, um eine neue Initialisierung der RTK/OTF Option zu erzwingen. Weiterhin wurden sämtliche Signale der Antenne abgeschattet.

Abb. 5.18 zeigt das Ergebnis anhand der Betrachtung der Differenz der Höhenkomponente im Verlauf des Experimentes. Bei ungestörter Messung liegen die Abweichungen zwischen Echtzeit- und Postprocessinglösung unter 2 cm. Es wirken sich nur Empfängerfehler und Modellierungsunterschiede bei den Auswerteansätzen aus. Das Initialisierungsverhalten wurde durch Störungen des Versuchsaufbaues untersucht. Zum einen wurde die Telemetrie abgeschaltet, dann die RTK Option am Trimble ausgeschaltet und zum anderen wurde die Antenne der Trimble Referenzstation vollständig abgeschattet, so daß ein kompletter Signalverlust zu allen Satelliten auftrat.

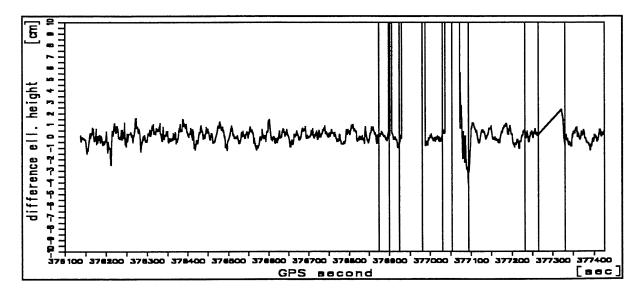


Abb. 5.18: Differenz der Höhenkomponente zwischen Echtzeit- und Postprocessinglösung, Zero-Baseline mit zwei Trimble 4000 SSE-Empfängern

Die kurzzeitige Unterbrechung der Telemetrie durch Abziehen der Telemetrieverbindung (im Zeitraum von 376874 bis 376900 Sekunden) und in einem zweiten Versuch durch Abschalten der Stromversorgung der Telemetrie (376925 - 376981 Sekunden) führte zu keinen Störungen der RTK-Lösung. Die Mehrdeutigkeitslösung wurde scheinbar unabhängig von der Verfügbarkeit von Korrekturdaten der Referenzstation beibehalten. Da kein Signalverlust auf dem "bewegten" Empfänger entstand, ergab sich zwar eine DGPS Lösung, jedoch brauchte keine neue Initialisierung des "bewegten" Empfängers durchgeführt zu werden. Dies ist gewährleistet, solange auf der bewegten und der Referenzstation mindestens 4 Satelliten ununterbrochen über das "Radio Outage" beobachtet werden konnten (*Griffioen et.al.* 1993).

Das kurzzeitige Abschalten der RTK Option (377030 - 377053 Sekunden) erzwang eine Neuinitialisierung des "bewegten" Empfängers. Die RTK Option benötigte rund 41 sec zur Reinitialisierung, wobei nach der Anzeige der erfolgreichen Mehrdeutigkeitslösung für rund 10-15 sec ein Einlaufverhalten im Vergleich zum Postprocessing zu erkennen ist. Die

Initialisierungszeiten sind jedoch kritisch zu beurteilen, da es sich um eine nicht bewegte Station beim Zero-Baseline Versuch handelt und identische Daten auch für die Korrekturberechnung benutzt worden sind. In einem praktischen Versuch über größere Entfernungsbereiche und bei kinematischen Bedingungen ist eher mit längeren Zeiten zu rechnen.

Die komplette Abschattung der Signale (377222 - 377255 Sekunden) machte ebenfalls eine Initialisierung der "bewegten" Empfängers notwendig. Hier ergab sich eine Zeit von rund 65 sec (bis 377320 GPS-Sekunden). Die oben beschriebenen Einschränkungen sind hier ebenfalls gültig.

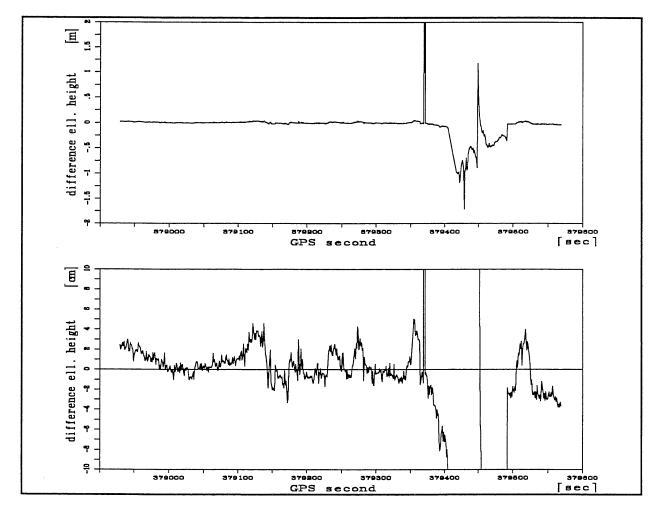


Abb. 5.19: Abweichung in der Höhenkomponente zwischen Trimble RTK/OTF-Option und GEONAP Postprocessing mit Ashtech-Messungen; gesamte Lösung und vergrößerter Ausschnitt

Zero-Baseline mit Ashtech- und Trimble- Empfänger

Im zweiten Experiment wurde eine bewegte Zero-Baseline mit einem Ashtech und einem Trimble Empfänger in einem fahrendem Auto gemessen. Aufgezeichnet wurden die Rohdaten beider Empfänger und die Echtzeit-Lösung des Trimble. Als Referenz wurden zwei Empfänger beider Typen betrieben. Die Entfernungen zwischen bewegtem Fahrzeug und dem dicht beieinander liegenden Referenzempfänger betrugen maximal einen halben Kilometer. Im entfernteren Teil der Trajektorie kam es durch Gebäude und Bäume zu Abschattungen.

Beide Datensätze wurden im Post-Processing mit der +X Option identisch ausgewertet. Bei der gewählten Elevationsmaske von 15° sind beide Empfänger vergleichbar. Eine Analyse von Ashtech Z-12 und Trimble SSE Empfängern am IfE (*Menge* 1994) läßt ein besseres Tracking-Verhalten des Z-12 bei kinematischen Anwendungen erwarten.

Abb. 5.19 zeigt die Differenz zwischen der in Echtzeit bestimmten Höhe und der im Postprocessing mit GEONAP erzeugten Lösung. Es ergeben sich Abweichungen für die ungestörte Messung von rund 2-4 cm. Die Lagekomponenten stimmen im Bereich von 1-2 cm überein. Bei Signalverlusten (ab 379380) kommt es zu Abweichungen, die bis zu Meterbeträgen anwachsen können. Zu diesem Zeitpunkt gab der im RTK-Modus arbeitende Trimble Empfänger eine dementsprechende warnende Meldung. Ungefähr zur GPS - Sekunde 379500, also nach 2 Minuten, hatte sich der Empfänger bei ungestörten Verhältnissen wieder initialisiert.

5.4 Zusammenfassung zu den Untersuchungen der OTW-Verfahren

Die im Kapitel 5 präsentierten Untersuchungen zeigen, daß eine Positionsbestimmung für die hochgenaue Höhenzuordnung von Lotungsmessungen grundsätzlich möglich ist. Im Postprocessing wurden mit dem Softwarepaket GEONAP Genauigkeiten im Subdezimeterbereich auch über Entfernungen bis zu 60 km erreicht. In einem weiteren Experiment über lange Distanzen zu den Referenzstationen wurde ein Vergleich zwischen einer über 30 km bestimmten Sollösung zu einer über 230 km berechneten Positionierung einer bewegten Antenne durchgeführt. Die Lösungen wichen im Mittel um 21 cm voneinander ab. Hier sind aber noch Unsicherheiten in der Bestimmung der Referenzstationskoordinaten vorhanden.

Für Entfernungsbereiche bis zu 40 km zur Referenzstation wurde die Schnelligkeit und Zuverlässigkeit der OTW-Mehrdeutigkeitslösungen untersucht. Verschiedene Auswerteansätze wurden entwickelt und im Sinne einer Blackbox auf kurze Beobachtungsdauern von wenigen Sekunden Länge angewendet. Die zur Zeit des Projektverlaufs entwickelten neuen Algorithmen (strenge simultane Zweifrequenzauswertung) und der verbesserte Systemausbau des GPS-Raumsegments erreichen in den Untersuchungen auf kurzen Entfernungen unter 5 km zur Referenzstation bei einer kurzen Beobachtungsdauer von nur 10 Sekunden in 90% der Fälle eine korrekte Mehrdeutigkeitslösung. Bei älteren Ansätzen gelang dies nur in bis zu 30% der Fälle. Weiterhin zeigte sich, daß die Nutzung von Zweifrequenzempfängern eine immense Bedeutung für die Schnelligkeit der erfolgreichen Mehrdeutigkeitssuche hat. Auch auf kurzen Entfernungen waren kaum Lösungen innerhalb einer Minute möglich. Die Schnelligkeit der Algorithmen ist wesentlich von der Anzahl der beobachteten Satelliten abhängig.

Der im Rahmen der Fahrt mit der WEGA gesammelte Datensatz ermöglichte Untersuchungen zur Stützung der Mehrdeutigkeitslösung durch den Einsatz zweier Referenzstationen. Im Vergleich mit der Nutzung nur einer Referenzstation wurde die schnelle Mehrdeutigkeitslösung bei Entfernungsbereichen von 20 km bis 40 km sichtlich zuverlässiger (siehe Abb. 5.6). Die in der Untersuchung berechneten Erfolgsquoten verdoppelten sich von ca. 30% auf 60% für eine Beobachtungsdauer von 10 Sekunden. Das Ergebnis läßt vermuten, daß eine Online-Vernetzung permanent verfügbarer Referenzstationen (z.B. auf Grundlage des SAPOS Dienstes) die Genauigkeit, Schnelligkeit und Zuverlässigkeit der OTW-Algorithmen in Echtzeitanwendungen erhöht.

Die mit Programmsystem GNRT mit dem OTW-Modul GNRT-K durchgeführten Untersuchungen zeigen, daß eine erfolgreiche Mehrdeutigkeitslösung und somit eine hochgenaue Positionsbestimmung auch in Echtzeit möglich ist. Die Initialisierung gelang auch über Entfernungen größer als 10 km in teilweise weniger als 60 Epochen. Hier spielen jedoch die Empfangsqualität des RTCM-Signals und die Anzahl ungestört beobachteter Satelliten eine große Rolle. Eine schnelle Neuinitialisierung gelingt im allgemeinen ab 6 Satelliten, bei weniger als 6 Satelliten sind die OTW-Algorithmen besonders im kinematischen Anwendungen wenig effektiv. Im allgemeinen kann man von der Richtigkeit der Mehrdeutigkeitslösung ausgehen, es sind aber auch Fälle mit falschen Festsetzungen dokumentiert worden (siehe Abb. 5.15). Die Abweichungen zur korrekten Positionslösung können dann in Einzelfällen im Bereich von einem Meter liegen und sind für den Nutzer somit schlecht zu erkennen. Zur Sicherheit ist die Lösung zu plausibilisieren. Dies kann über eine zweite GPS Lösung oder aber durch einen externen Positionsgeber geschehen.

Die Abweichungen der in Echtzeit gewonnen Positionen zu Sollösungen sind auf kurzen Entfernungen unter 20 km mit Zweifrequenzempfängern stets geringer als 5 cm gewesen. Der Vergleich wurde über die NN-Höhen bekannter Punkte mit Verwendung von Geoidinformationen herbeigeführt. Auf größeren Entfernungen lagen die Differenzen bei bis zu ein bis zwei Dezimetern.

In einem Experiment wurde die Trimble RTK-Option für die hochpräzise Positionsbestimmung mit GPS kurz untersucht. Vergleiche mit Postprocessing-Lösungen zeigen Differenzen von wenigen Zentimetern in kurzen Entfernungsbereichen bis zu einem halben Kilometer.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung und Erprobung von GPS-Verfahren, die eine hochpräzise Höhenzuordnung von Lotungsmessungen erlauben. Herkömmliche Beschickungsverfahren über direkte Messungen (z.B. Tachymetermessungen) sind nur für geringe Entfernungen von maximal wenigen Kilometern konzipiert. Bei der indirekten Beschickung über Pegelmessungen sind Modellannahmen über die Wasseroberfläche und der Dynamik des Peilschiffes zu treffen, die letztlich eine Ungenauigkeit der Beschickung von mehreren Dezimetern bewirken können.

Für einige hydrographische Anwendungen ist jedoch laut den IHO Standards von 1987 eine Genauigkeit von 0,3 m für die beschickte Tiefe gefordert, in Häfen und an Anlegern besser als 0,2 m. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß das GPS ein Genauigkeit im Subdezimeterbereich auch über mehrere Zehnerkilometer von der Referenzstation bereitstellen kann. Das Genauigkeitspotential reicht somit zur Erfüllung hydrographischer Aufgaben aus. Es müssen jedoch wesentliche Problemstellungen bei der Einführung beachtet werden:

- Zur Bereitstellung von GPS-Lösungen mit Genauigkeiten im Subdezimeterbereich ist eine Mehrdeutigkeitslösung für die Trägerphasenmessungen erforderlich. Herkömmliche statische Initialisierungsverfahren können nicht angewendet werden, da sich das Peilschiff üblicherweise in ständiger Bewegung befindet. Daher sind "On The Way" -Mehrdeutigkeitssuchalgorithmen notwendig, die eine Initialisierung auch bei bewegtem Empfänger möglich machen. Neben der am Institut für Erdmessung verfügbaren Software GEONAP und GNRT-K sind solche Algorithmen in einzelnen empfängereigenen Produkten (Trimble, Ashtech, Wild, Sercel, …) implementiert.
- Das Bezugssystem für GPS-Ergebnisse ist das ellipsoidische WGS84. Üblicherweise werden aber in der Hydrographie das Normalnull NN oder das Seekartennull SKN verwendet. Das SKN ist schwerlich zu modellieren und ist zudem noch zeitlich veränderlich. Der Bezug zu NN ist über Geoidinformationen herzustellen. Für Europa liegt demnächst eine Geoidberechnung in hoher Genauigkeit vor. Für den Bereich der Deutschen Bucht wurde im Rahmen eines KfKI-Projektes zur Höhenbestimmung des Helgoländer Pegels ein Geoid mit 1 bis 2 Zentimeter Genauigkeit gerechnet.
- Die berechneten GPS-Koordinaten beziehen sich auf das Phasenzentrum einer Antenne an Bord des Schiffes. Zur Beschickung muß die Höhe auf die Lotungsanlage reduziert werden. Im einfachsten Falle gelingt dies bei nur wenig geneigtem Schiff und einem günstigen Antennenaufbau (GPS-Antenne über Schwinger) mit ausreichender Genauigkeit durch die Berücksichtigung der Antennenhöhe zwischen GPS-Antenne und Schwinger. Bei größeren Roll- und Stampfbewegungen und/oder ungünstigem Antennenaufbau müssen die Neigungswinkel gemessen und angebracht werden. Dies kann mit hoher Genauigkeit in einem Aufbau mit 3 simultan messenden GPS-Empfängern oder mit einem weiteren Lagesensor geschehen.
- Die zeitliche Zuordnung der GPS-Messungen zu den Lotungsmessungen muß für präzise Anwendungen mit einer Genauigkeit von 10 Millisekunden gelingen. Dies kann am einfachsten über eine gemeinsame Uhr geschehen, die durch GPS-Zeit gestützt wird.

• Für den Nutzer stellt sich grundsätzlich die Frage, ob die Position in Echtzeit oder im Postprocessing verfügbar sein soll. Echtzeitmessungen haben den Vorteil, daß die Höhenzuordnung direkt an Bord des Schiffes stattfindet und somit viele folgende Auswerteschritte entfallen. Die hochpräzise Positionsbestimmung in Echtzeit ist jedoch abhängig von der Qualität des Empfangs von Korrekturdaten durch zumeist Funkübertragungseinrichtungen, die nur eine begrenzte Reichweite haben.

Den Untersuchungen im Postprocessing zur Schnelligkeit und Zuverlässigkeit der OTW-Mehrdeutigkeitslösungen lag die Frage zugrunde, inwiefern eine Neuinitialisierung nach Totalausfall des Systems bei voller Fahrt möglich ist. Aufgrund verbesserter Auswertesoftware und erweitertem GPS-Systemausbau war in den neueren Experimenten auf kurzen Entfernungen von unter 5 km in 90% der untersuchten Fälle eine Mehrdeutigkeitslösung innerhalb von nur 10 Sekunden möglich. Für Entfernungen von 20 bis 40 km gelang dies in 60% der Fälle. Für die Schnelligkeit und Zuverlässigkeit der OTW-Algorithmen spielen vor allem die Anzahl beobachteter Satelliten eine große Rolle. Eine Mindestzahl von 5 Satelliten ist gefordert, jedoch zeigten die Untersuchungen, daß nur mit mindestens 6 Satelliten im Moment der Initialisierung eine effektive schnelle Mehrdeutigkeitslösung möglich ist. Die im Postprocessing ermittelten Genauigkeiten lagen auch über längere Entfernungen von mehreren Zehnerkilometern noch im Subdezimeterbereich.

Die hochpräzisen Echtzeitanwendungen mit Lösung der Mehrdeutigkeiten sind im wesentlichen durch die geringe Reichweite der Datenübertragungsmedien (Funk) bei gleichzeitiger hoher Datenrate begrenzt. Für Referenzstationen im Rahmen des SAPOS Dienstes mit Funkfrequenzen im 2-m-Band können im norddeutschen Raum leicht 25 km Reichweite und mehr erreicht werden. Die Genauigkeiten für Entfernungen unter 20 km lagen bei den Experimenten unter 5 cm. Die Initialisierung gelingt innerhalb weniger Minuten, oft auch unter einer Minute. Die Schnelligkeit des Verfahrens hängt wesentlich von der Anzahl der beobachteten Satelliten und von der Qualität des empfangenen Funksignals ab.

In einzelnen Fällen kommt es zu falschen Mehrdeutigkeitsfestsetzungen und damit zu falschen Lösungen, die teilweise nur schwer erkennbar sind. Untersuchungen im Postprocessing haben gezeigt, daß die Schnelligkeit und Zuverlässigkeit der OTW-Algorithmen gesteigert wird, wenn die Informationen mehrerer Referenzstationen verwendet werden. Dies führt zu der Empfehlung, permante Referenzstationen 'online' zu vernetzen.

Für den potentiellen Nutzer stellt sich die Frage nach der zukünftigen Verfügbarkeit des Global Positioning Systems. Von dem Systembetreiber, dem US-Verteidigungsministerium (DoD) wird eine Vorwarnzeit von sechs Jahren bis zur Abstellung des Systems angegeben. Der amerikanische Vizepräsident Al Gore hat im März 1996 die Lockerung der Systemsicherungstechniken innerhalb der nächsten Jahre angekündigt. Die Regierung verspricht sich davon einen wirtschaftlichen Anschub für Betriebe, die sich mit der Fahrzeugnavigation beschäftigen. Zunehmend werden auf dem Markt hybride GPS/GLONASS-Empfänger angeboten. GLONASS entspricht der russischen Variante des GPS. Vorteil ist eine bessere Satellitenüberdeckung. Von europäischer Seite (ESA) wird im Rahmen von EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) ab 1995 ein GPS-unterstützendes System mit INMARSAT III-Satelliten geflogen. Für die Zukunft ist in diesem Rahmen der Aufbau eines auf europäische Zwecke abgestimmtes Raumsegment geplant.

Die Verfahren des GPS ermöglichen eine hochpräzise Positionierung für die Beschickung von Lotungsmessungen. Weitere Untersuchungen zur Vernetzung der Referenzstationen und zum Datenalter sind notwendig. Im Falle des Ausfalls des GPS-Systems muß untersucht werden, inwiefern sich die Stützung der Postionsbestimmung durch Inertialsysteme anbietet.

7 Literatur

- Ackroyd, N. und R. Lorimer (1990): Global Navigation. A GPS User's Guide. Lloyd's of London Press Ltd., London, New York, Hamburg, Hong Kong.
- Allison, T., P. Griffioen, N. Talbot (1994): Acceptance of real-time Kinematic by the Professional Surveyor. ION GPS 94, The Institute of Navigation, Salt Lake City, Utah, USA, September 1994
- Aster, D. und E. Meyer (1990): Verbesserte Bestimmung der nautischen Tiefe im Emder Fahrwasser. Hansa Schiffahrt Schiffbau Hafen, 127, Nr. 23-24, 1729-1733.
- Ashjaee, J. und R. Lorenz (1993): Precision GPS Surveying after Y-Code. Ashtech, Sunnyvale, California, USA.
- Ashtech (1994): Z12 with PNAV Option. Hand-out ION GPS94, Sept. 94, Ashtech, Sunnyvale, USA
- Augath, W. und K. Kummer (1988): Die Bezugssysteme der Grundlagenvermessung. Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung, 38, 260-317.
- Augath, W. (1994): Stand und Entwicklungstendenzen des GPS Einsatzes in der Landesvermessung. ZfV, 119, Heft 5, 1994
- Augath, W., M. Fröhlich, H.-H. Kropp, W. Seifert, M. Strerath (1993): Aufbau von Permanentstationen in Niedersachsen. Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung, 43, Heft 3, 1993
- Behrens, J. (1992): Gewässervermessung auf Bundeswasserstraßen. Zeitschrift für Vermessungswesen, ZfV, 117, Heft 8/9, 507-516.
- Behrens, J. (1993a): Gewässervermessung auf Bundeswasserstraßen. Zeitschrift für Vermessungswesen, ZfV, 118, Heft 4, 143-151.
- Behrens, J. (1993b): GPS in der Wasser- und Schiffahrtverwaltung derzeitiger Stand und Entwicklungstendenzen. Schriftenreihe des DVW, Band 11, Verlag Konrad Wittwer, 305-324.
- Bichtemann, G., P. Hankemeier (1993): DGPS Dienste in Norddeutschland. SPN, 2, Heft 1, 1993
- **Blanchard, W.F.(1990):** DGPS via INMARSAT. Proceedings of the Satellite Division's International Technical Meeting, ION GPS-90, Washington, D.C., 237-244.
- Böder, V. (1994): Zur Nutzung relativer GPS-Systeme für die hochpräzise knematische Positionsbestimmung. Diplomarbeit am Institut für Erdmessung, Universität Hannover, unveröffentlicht.
- **Böder, V. (1994):** Präzise Positionierung mit GPS für eine Beschickung von Lotungsmessungen. Beiträge zum 9. Hydrographentag, Hamburg, 26.-27.09.1994
- **Braun, G. (1992):** Der Vertikalbezug bei der hydrographischen Objektvermessung. Schriftenreihe des DVW, Band 6, Verlag Konrad Wittwer, 116-130.
- Breuer, B., J. Campbell, A. Müller (1993): GPS-Meß- und Auswerteverfahren unter operationellen GPS-Bedingungen. Journal for Satellite-Based Posioning, Navigation and Communication, SPN, Heft 3, 82-90.
- **BSH (1992):** Gezeitentafeln für das Jahr 1993. Band I, Europäische Gewässer. Bundesamt für Seeschiffahrt und Hydrographie, Hamburg.
- Carrera, G. und P. Vanicek (1985): The Use of Sea Level Tide Gauge Observations in Geodesy. Lighthouse, Edition No. 31, May, 13-20.

- Denker, H. (1994): Großräumige Höhenbestimmung mit GPS- und Schwerefelddaten. 34. DVW-Seminar: GPS-Leistungsbilanz. Schriftenreihe des DVW, Band 18, Verlag Konrad Wittwer, 233-258.
- Eberhardt, R., W. Franz (1993): Mobilfunknetze: Technik, Systeme, Anwendungen. Fr. Vieweg und Sohn, Braunschweig 1993.
- Egge, D., F. Heimberg (1995): Erste Erfahrungen mit der Trimble GPS-Totalstation im praktischen Einsatz. Beitrag zum 37. DVW. Seminar "Hydrographische Vermessungen -heute-", 28.3.-29.3.1995
- Ellmer, W. (1993): Persönliche Mitteilungen. Bundesamt für Seeschiffahrt und Hydrographie, Hamburg, Dezember.
- Ellmer, W. (1994): Persönliche Mitteilungen. Briefwechsel. Bundesamt für Seeschiffahrt und Hydrographie, Hamburg, April.
- Goldan, H.J. (1994): Tide Observations with Kinematic GPS on Ships. Poster at International Symposium on Marine Positioning INSMAP 1994, 19.-23.09.1994
- Goldan, H.J. (1996): Beiträge zur GPS-gestützten Höhenbestimmung im Küstenbereich. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Nr. 215, Hannover
- Griffioen, P., T. Allison, S. Dreier (1993): Real Time Kinematic: The Next Surveying Tool. ION 93, Technical Meeting, The Institute of Navigation, San Francisco, USA, January 1993
- Hankemeier, P. (1996): Multifunktionale Referenzstation Eckpfeiler des DGPS-Dienstes der AdV-. Beiträge zum 11. Hydrographentag 1996, Glücksburg, 03.-05.06.1996
- **Heddinga** (1993): Persönliche Mitteilungen. Briefwechsel. Forschungsstelle Küste, Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Norderney, Oktober.
- Heimberg, F. (1994): Untersuchungen zum operationellen Einsatz des Differential GPS. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Nr. 202, Hannover
- Heimberg, F. und G. Seeber (1994): Some Considerations and Developments of the Operational Use of Differential GPS in Marine Geodesy. Marine Geodesy, Vol. 17, Number 2, London, UK.
- Heimberg, F., Ch. Maier, Th. Müller, M. Poppe (1992): Aufbau eines Echtzeit-DGPS-Systems. DLR-Mitteilung, 92-06, 41 Seiten.
- Hein, W. (1991): An Invitation for a Diskussion on a New Standard Format for High-Precision DGPS Applications. Proceedings of First International Sysmposium Real Time Differential Applications of the Global Positioning System, DGPS'91, Vol. II, Braunschweig, FRG, 715-720.
- IHO (1987): Standards for Hydrographic Surveys. International Hydrographic Organisation, Special Publication No. 44, Monaco.
- Kalafus, R.M., A.J. van Dierendonck, N.A. Pealer (1986): Special Committee 104 Recommendations for Differential GPS Service. Navigation: Journal of The Institute of Navigation, Vol. 33, No 1, 26-41.
- Kulle, U. (1993): Zur Praxis der Höhenauswertung in Niedersachsen. Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung, 43, Heft 3/93, 164-175.
- Lanigan, C.A., K. Pflieger, P.K. Enge (1990): Real-Time Differential Global Positioning System (DGPS) Data Link Alternatives. Proceedings of the Satellite Division's International Technical Meeting, ION GPS '90, Washington, D.C., 599-606.
- Lassen, H. (1989): Örtliche und zeitliche Variationen des Meeresspiegels in der südöstlichen Nordsee. Die Küste, Heft 50, 65-95.
- Leica (1994): WILD GPS-System 200. Echtzeit GPS Vermessung. Produktinformation

- Lemmens, R.L.G. (1993): Dynamic GPS Height Determination in the Decimeter Level for Bathymetric Applications. Report for the Ministry of Transportation, Public Works and Water Management, The Netherlands. by: Delft Geodetic Computing Centre
- Lindstrot, W. (1992): Satellitennavigation über Rundfunk in Nordrhein-Westfalen. Beitrag zum DGON-Seminar: Satellitennavigationssysteme Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten im Verkehrswesen und für Geowissenschaften, 20.-21. Oktober 1992, Potsdam.
- Lu, G. (1994): Attitude Determination Using a Multi-Antenna GPS System for Hydrographic Applications. International Symposium on Marine Positioning INSMAP 1994, 19-23.09.1994
- Menge, F. (1994): Zur Leistungsfähigkeit der GPS Empfangssysteme Trimble SSE und Ashtech Z12 unter Anti-Spoofing (A-S). Diplomarbeit an der Universität Hannover, Institut für Erdmessung, unveröffentlicht
- Müller, T und H. Rohling (1993): Kanalcodierung für die DGPS-Korrekturübertragung Vorschlag für eine Modifikation des DGON-Datenformats. Ortung und Navigation, Heft 2, 156-166.
- **Pijarowki, D.** (1984): Gezeiten, Bezugshorizonte, Beschickung. Einführung in die Hydrographie, Vorträge des 16. DVW-Seminars, Hamburg, 24.-25. Mai.
- Ragutzki (1994): Persönliche Mitteilungen. Forschungsstelle Küste, Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Norderney, März.
- Rapp, R.H. und N. Balasubramania (1992): A Conceptual Formulation of a World Height System. Department of Geodetic Science and Surveying, Report No. 421, Ohio State University, Columbus, Ohio.
- Rohde, H.-P. (1989): Beschickung von Lotungen. DHyG Information, Nr. 15, Juni, 3-8.
- Rohde, H.-P. (1996): IHO Standards for Hydrographic Surveys. Beiträge zum 11. Hydrographentag 1996, Glücksburg, 03.-05.06.1996
- Rosengarten, H. (1987): Ein geometrisches Modell der Wasseroberfläche zur Beschickung von Küstenvermessungen. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Nr. 150.
- RTCM Special Committee No. 104 (1990): RTCM Recommended Standards for Differential NAVSTAR GPS Services. Radio Technical Commission for Maritime Services, RTCM Paper 134-89/SC 104-68.
- RTCM Special Committee No. 104 (1992): Recommendations of the Carrier Phase Communications Working Group to RTCM Special Committee 104. Radio Technical Commission for Maritim Services, RTCM Paper 99-92/SC 104-88.
- RTCM (1994): RTCM Recommended Standards for Differential NAVSTAR GPS Service. Version 2.1. developed by RTCM Special Committee No. 104, 3.1.1994
- Schleider, W. (1988): Hydrographische Vermessungen im Küstenmeer. Zeitschrift für Vermessungswesen, ZfV, 113, Heft 9/10, 507-512.
- Schleider, W. (1993): Fragen zur nautischen Tiefe in Schlickgebieten und ihre räumliche Bestimmung. Zeitschrift für Vermessungswesen, ZfV, 118, Heft 4, 187-195.
- Seeber, G. (1989): Satellitengeodäsie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen. De Gruyter, Berlin, New York.
- Seeber, G. (1993): Satellite Geodesy. Foundations, Methods, and Applications. De Gruyter, Berlin, New York.
- Seeber, G. und G. Wübbena (1989): Kinematic Positioning with Carrier Phases and "On the Way" Ambiguity Resolution. Proceedings of the Fifth International Symposium on Satellite Positioning, Las Cruces, New Mexico, 600-609.
- Seeber, G., M. Schmitz, H.J. Goldan. (1994): Precise GPS-based Positioning at Sea. International Symposium on Marine Positioning INSMAP 1994, 19.-23.09.1994

- Seeber, G., M. Schmitz (1995): GPS-Status und aktuelle hydrographische Anwendungen. Beitrag zum 37. DVW. Seminar "Hydrographische Vermessungen -heute-", 28.3.-29.3.1995
- Seeber, G., V. Böder, H.J. Goldan, M. Schmitz, G. Wübbena (1995): Precise DGPS-Positioning in Marine and Airborne Applications. In: Beutler u.a. (Hrsg.) GPS Trends in Precise Terrestrial, Airborne and Spaceborn Applications, IAG Symp. 113, S.202-211, 1996
- Seeber, G. (1996): Stand und Einsatzmöglichkeiten von GPS in der Hydrographie-ein Überblick. Beiträge zum 11. Hydrographentag 1996, Glücksburg, 03.-05.06.1996
- Sercel (1994): GPS K.A.R.T. system. Kinematic Applications in Real Time.

 Produktinformation
- Speckter, H.E. (1991): Standardization and Implementation of a DGPS System and Service in the Maritime Field. Report of the IALA Radionavigation Systems Working Group, First International Symposium on Real Time Differential Applications of the Global Positioning System. Braunschweig, September 1991
- Torge, W. (1975): Geodäsie. De Gruyter, Berlin, New York.
- Torge, W., D. Behrend, H. Denker (1995): Das Geoid im deutschen Nord- und Ostseebereich. Beitrag zum 37. DVW. Seminar "Hydrographische Vermessungen heute-", 28.3.-29.3.1995
- Trimble (1994): GPS Total Station. Produktinformation, Sunnyvale, USA
- TSS Produktinformation (1993) ausgehändigt Ing. Büro Gerold Pinnow, Hamburg
- Tsaoussi, L.S., C. Koblinsky (1994): An Covariance Model for SEA Surface Topography and Velocity Derived from TOPEX/POSEIDON Altimetry. Journal of Geophysical Research, Vol. 99, No. C12, Washington DC, USA.
- Vanicek, P. und E. Krakiwsky (1986): Geodesy: The Concepts. 2. Auflage, North-Holland, Amsterdam.
- Visser, P.N.A.M., K.F. Wakker, B.A.C. Ambrosius (1993): Dynamic Sea Surface Topography from GEOSAT Altimetry. Marine Geodesy, Vol. 16, Number 3, London, UK.
- Völksen, C. (1991): Untersuchungen über die Auswirkungen von Selective Availability auf die Satellitensignale des GPS und auf geodätische Anwendungen. Diplomarbeit. Institut für Erdmessung, Universität Hannover, unveröffentlicht.
- Wachsmuth, W. und U. Kögel (1990): Wirtschaftliche Fahrwasserunterhaltung im Küstenbereich. Hansa Schiffahrt Schiffbau Hafen, 129, Nr. 15, 839-851.
- Wanninger, L. (1993): Der Einfluß ionosphärischer Störungen auf präzise GPS-Messungen in Mitteleuropa. Zeitschrift für Vermessungswesen, ZfV, 118, Heft 1, 25-36.
- Wells, D.E. (1988): Hydrographic Surveying I. Course SE4053, Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, Canada.
- Werner, A. und W. Kantorek (1993): Satelliten-Mobildienste. Möglichkeiten und praktische Anwendungen des mobilen Satellitenfunks. Funkschau: Telecom. Franzis-Verlag, München.
- Wübbelmann, H (1993): Die Wiederholungsmessungen im Deutschen Haupthöhennetz. Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung, 43, Heft 3/93, 155-163.
- Wübbena, G. (1989): The GPS Adjustment Software Package -GEONAP- Concepts and Models. Proceedings of the Fifth International Symposium on Satellite Positioning, Las Cruces, New Mexico, 452-461.
- Wübbena, G. (1991): Zur Modellierung von GPS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung. Wissenschaftliche Arbeiten Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Nr. 168.

- Wübbena, G., A. Bagge (1995): Präzises DGPS in Echtzeit für Vermessung und GIS-Anwendungen. Beitrag zum DVW-Praxisseminar "DGPS-Anwendungen", Tagungsunterlagen, 19.09.-20.09.1995, Hamburg
- Wübbena, G., A. Bagge (1995): GPS-bezogene Ortungssysteme. Beitrag zum 37. DVW. Seminar "Hydrographische Vermessungen -heute-", 28.3.-29.3.1995, Hannover
- Wirth, H. (1995): Gewässervermessung im Binnenbereich der Bundeswasserstraßen mit hochpäziser DGPS-Ortung. Beitrag zum 37. DVW. Seminar "Hydrographische Vermessungen -heute-", 28.3.-29.3.1995., Hannover