

**Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Institut für Erdmessung, Universität Hannover**

**Gemeinsamer Schlußbericht zum BMBF-Vorhaben
(Förderkennzeichen MTK 590 A und MTK 590 B)**

Optimierung der hydrographischen Positions- und Lagebestimmung



Schlußbericht zum BMBF-Vorhaben
„Optimierung der hydrographischen
Positions- und Lagebestimmung“

**Bundesanstalt für Gewässerkunde
Institut für Erdmessung, Universität Hannover**

Gemeinsamer Schlußbericht zum BMBF-Vorhaben

**„Optimierung der hydrographischen Positions- und
Lagebestimmung“**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter den Förderkennzeichen MTK 590 A und MTK 590 B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

.....

Auftraggeber : Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF)
Projektträger : Forschungszentrum Jülich GmbH, Projektträger Biologie, Energie und Ökologie (BEO) - Meeresforschung -
Projektbegleiter : Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)
BfG-JAP-Nr. : 2019
Seitenzahl : 99
Projektbearbeiter : Dipl.-Ing. Jörg Dybek (BfG), Dipl.-Ing. Volker Böder (IfE)
Projektleiter : VOR Harry Wirth (BfG), Prof. Dr.-Ing. Günter Seeber (IfE)

Koblenz und Hannover, August 1998

Inhalt

Inhalt	III
Verzeichnis der Abbildungen	V
Verzeichnis der Tabellen	VIII
Verzeichnis der Abkürzungen	IX
1 Einleitung und Aufgabenstellung	1
1.1 Vorhabenbeschreibung.....	1
1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	2
1.3 GPS-Systemzustand.....	3
2 Verlauf des Projekts	5
2.1 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
2.2 Veröffentlichungen	8
2.3 Nutzertreffen in Cuxhaven	9
3 Vorbereitende Untersuchungen	10
3.1 Nutzerumfrage.....	10
3.2 Meßfahrt auf dem VWFS „Atair“	12
3.2.1 Meßaufbau	12
3.2.2 Auswertung und Ergebnisse.....	14
3.2.3 Folgerungen aus der Meßfahrt	17
3.3 Marktanalyse inertielle Meßsysteme (INS)	17
3.3.1 Kontaktaufnahme zu deutschen und internationalen Herstellern	18
3.3.2 Nutzung von INS zur ungestützten Lagebestimmung.....	19
3.3.3 Literatur über die Integration von GPS und INS	19
4 Aufbau des Meß- und Auswertesystems	21
4.1 Spezifikation für ein Meß- und Auswertesystem für die präzise Positions- und Lagebestimmung auf Gewässern	21
4.2 Systemaufbau	23
4.3 Beschreibung der Nutzeroberfläche.....	25
5 Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Schnelligkeit der GPS-Positionsbestimmung	35
5.1 Genauigkeit	35

5.2	Zuverlässigkeit und Schnelligkeit	36
5.3	Reduzierung entfernungsabhängiger Fehleranteile	38
5.3.1	Untersuchungen im Raum Hamburg (Simulation einer Vernetzung)	38
5.3.2	Untersuchungen im Raum Hannover.....	42
5.3.3	Vernetzung der Referenzstationen an den deutschen Küsten	47
6	Lagewinkelbestimmung	49
6.1	Lagewinkelbestimmung mit GPS.....	49
6.2	Inertiale Lagemeßsysteme	52
6.2.1	Untersuchungen mit ungestützten inertialen Lagemeßsystemen	54
6.2.2	Untersuchungen mit GPS-gestützten inertialen Lagemeßsystemen	56
6.3	Folgerungen zur Lagewinkelbestimmung.....	60
7	Weitere Verfahren zur Positionsbestimmung	61
7.1	Weitere Möglichkeiten der Positionsbestimmung.....	61
7.2	Untersuchung der Genauigkeit der Positionsbestimmung mit inertialen Sensoren.....	63
7.2.1	Versuche mit dem Litel LCR-88	64
7.2.2	Untersuchungen mit dem iMAR-TGAC-RQ	69
7.3	Folgerungen zur Positionsbestimmung mit INS	71
8	Einbindung des Systems in hydrographische Anwendungen	72
8.1	Einbindung der Sensoren in das System.....	72
8.1.1	Positionssensoren	72
8.1.2	Lagemeßsensoren.....	73
8.2	Einbindung des Systems in hydrographische Programme	74
8.3	Erprobung des Systems in praxisnaher Umgebung.....	75
9	Zusammenfassung und Fazit	79
10	Literatur	81
11	Anhang	87
11.1	Fragebogen der Nutzerumfrage vom 21. Februar 1996.....	87
11.2	Spezifikation für ein Meß- und Auswertesystems für die präzise Positions- und Lagebestimmung auf Gewässern im vom 01. April 1997.....	89

Verzeichnis der Abbildungen

- Abbildung 3.1:** Messungsaufbau auf dem VWFS „Atair“; Peilfahrt Elbeästuar; 21.-23. Mai 1996
- Abbildung 3.2:** Differenzen Echtzeitlösung (GNRT-K + COMPASS) zu Postprocessinglösung (GEONAP) in [m]; Profile 1-2, 3-4: Entfernung zur Referenz Cuxhaven 3-15 km; VWFS „Atair“, 21.-23. Mai 1996
- Abbildung 3.3:** Höhendifferenzen Echtzeitlösung (GNRT-K+COMPASS) zu Postprocessinglösung (GEONAP) in [m]; Profile 1-2, 3-4: Entfernung zur Referenz Cuxhaven 3-15 km; VWFS „Atair“, 21.-23. Mai 1996
- Abbildung 3.4:** Vergleich COMPASS- mit TSS-Lagebestimmung; Werte in [°]; VWFS „Atair“, 21.-23. Mai 1996
- Abbildung 4.1:** Konfiguration des Systems
- Abbildung 4.2:** Stufenhafter Aufbau des Meß- und Auswertesystems
- Abbildung 4.3:** Auswahlfenster zur *SOL*- bzw. *HRP*-Schnittstelle im Programmmodul GNATTI, mit der eine Koordinatenlösung (links) bzw. ein Sensor-Input für Kurs-/Roll-/Stampfwinkel (rechts) ausgewählt werden kann
- Abbildung 4.4:** Programmmodule und Kommunikationsbeziehungen
- Abbildung 4.5:** Statusfenster des GPS-Empfängermodule (Beispiel für Ashtech-Empfänger)
- Abbildung 4.6:** Statusfenster des RTCM_IN Moduls
- Abbildung 4.7:** Skyplot zur Satellitenkonstellation
- Abbildung 4.8:** Signalqualität der einzelnen Satellitenkanäle
- Abbildung 4.9:** Statusfenster zur Trägerphasenlösung mit GNRT-K
- Abbildung 4.10:** Statusfenster von GNNET-RTK
- Abbildung 4.11:** Auswahl des Sensor-Typs über ein Auswahl-Fenster
- Abbildung 4.12:** Einstellungen zum Kommunikationsprotokoll RS232
- Abbildung 4.13:** Berücksichtigung der inneren Orientierung eines Sensors gegenüber dem Schiffssystem
- Abbildung 4.14:** Optionen-Fenster von HRP_IN
- Abbildung 4.15:** Statusfenster von HRP_IN
- Abbildung 4.16:** Fensterdialog zum Bearbeiten der Punktliste in GNATTI
- Abbildung 4.17:** Statusfenster von GNATTI
- Abbildung 5.1:** Differenzen zwischen Postprocessinglösung und Echtzeitlösung einer Meßfahrt mit VS „Greif“ in [m], WSA Cuxhaven, 26. März 1998
- Abbildung 5.2:** Dauer der Mehrdeutigkeitsfestsetzung, Testmessung Koblenz, 05. November 1996
- Abbildung 5.3:** Dauer der Mehrdeutigkeitsfestsetzung, Testmessung Koblenz, 30. April 1998

- Abbildung 5.4:** Übersicht über die Punkteverteilung, Referenzstationsvernetzung Hamburg, 12. - 16. Februar 1996
- Abbildung 5.5:** TTFA-Werte für jede Mehrdeutigkeitsfestsetzung (fixing), Echtzeitmessungen mit GNRT-K, Hamburg 12. - 16. Februar 1996
- Abbildung 5.6:** Standardabweichung für jede Festsetzung, Echtzeitmessung mit GNRT-K, Hamburg, 12. - 16. Februar 1996
- Abbildung 5.7:** Berechnung der Flächenkorrekturparameter (FKP), vereinfachtes Schema
- Abbildung 5.8:** Differenz zwischen Referenzlösung und der simulierten Vernetzung, einzelne Festsetzungen und Mittel, Hamburg 12. - 16. Februar 1996
- Abbildung 5.9:** Differenz zwischen der Referenzlösung und der mittleren Position mit GNRT-K, GEONAP Echtzeitsimulation ohne Vernetzung und GEONAP Echtzeitsimulation mit Vernetzung, Hamburg 12. - 16. Februar 1996
- Abbildung 5.10:** Dynamik der Vernetzungskoeffizienten, Drift in Breiten- und Längskomponenten versus GPS Zeit in Sekunden, Hamburg 12. - 16. Februar 1996
- Abbildung 5.11:** Ergebnisse der Testmessungen in Hamburg vom 12. - 16. Februar 1998
- Abbildung 5.12:** TTFA für Untersuchung zur Vernetzung im Raum Hannover, Punkt Schulenburg, Entfernung zur Referenzstation Hannover 20 km, 28. August 1997
- Abbildung 5.13:** Variationen der Koordinaten, Vernetzung im Raum Hannover, Punkt Schulenburg, Entfernung zur Referenzstation Hannover 20 km, 28. August 1997
- Abbildung 5.14:** Variationen der Koordinaten, Vernetzung im Raum Hannover, Punkt Ottbergen, Entfernung zur Referenzstation Hannover 33 km, 02. März 1997
- Abbildung 5.15:** TTFA für Untersuchung zur Vernetzung im Raum Hannover, Punkt Ottbergen, Entfernung zur Referenzstation Hannover 33 km, 02. März 1997
- Abbildung 5.16:** Bestehende und mögliche Referenzstationen an den deutschen Küsten
- Abbildung 5.17:** Mögliche Vernetzung von Referenzstationen an den deutschen Küsten
- Abbildung 6.1:** Lagewinkelbestimmung mit dem GPS-Mehrantennensystem COMPASS
- Abbildung 6.2:** Auswirkung eines Meßfehlers dx
- Abbildung 6.3:** Ergebnisse eines COMPASS-Tests auf kurzer Basis -Kurs-
- Abbildung 6.4:** Ergebnisse eines COMPASS-Tests auf kurzer Basis -Rollen und Stampfen-
- Abbildung 6.5:** Bisherige Ergebnisse der COMPASS-Winkelgenauigkeit in Abhängigkeit von der Basislänge, untere Kurve: theoretische Genauigkeit bei einem Phasenrauschen von 2 mm
- Abbildung 6.6:** Preis-/Leistungsverhältnis inertialer Navigationssysteme (Stand Juni 1998)
- Abbildung 6.7:** Meßfahrt vom 02. April 1997
- Abbildung 6.8:** Lage des Schiffskoordinatensystems, MB „Hamster“

- Abbildung 6.9:** Rollwinkel aus INS-Messung und GPS-Postprocessing, MB „Hamster“, 02. April 1997
- Abbildung 6.10:** Stampfwinkel aus INS-Messung und GPS-Postprocessing MB „Hamster“, 02. April 1997
- Abbildung 6.11:** Rollen bei „normaler Meßfahrt“, VWFS „Deneb“, 20. August 1997
- Abbildung 6.12:** Differenzen bei der Größe Rollen bei „normaler Meßfahrt“, VWFS „Deneb“, 20. August 1997
- Abbildung 6.13:** Lagewinkel Rollen (blau) und Stampfen (grün) in [°] mit Kurs (rot), VWFS „Deneb“, 20. August 1997
- Abbildung 6.14:** Abweichungen der Lagewinkel Rollen, Kurs, Stampfen (von oben nach unten) in [°], VWFS „Deneb“, 20. August 1997
- Abbildung 7.1:** Aufbau der PDGPS/INS-Integration mit dem AHRS LCR-88 und dem Programm AG_IFE von Prof. M. Bäumker, FH Bochum
- Abbildung 7.2:** Differenzen zwischen INS (AG_IFE) und PDGPS (GNRT-K) in der Höhenkomponente; Testmessungen auf Simulator; IfE; 10. Februar 1997
- Abbildung 7.3:** Differenzen zwischen INS (AG_IFE) und PDGPS (GNRT-K) in der Höhenkomponente; Überbrückungstest auf Simulator; IfE; 10. Februar 1997
- Abbildung 7.4:** Zeitsynchronisation zwischen GPS- und INS-Daten
- Abbildung 7.5:** Differenzen zwischen INS (Echtzeit) und GPS/COMPASS (Postprocessing) Position in [m]; Fahrt mit dem VS „Greif“, 26. März 1998
- Abbildung 7.6:** Differenzen zwischen INS (Echtzeit) und GPS/COMPASS (Postprocessing) Position in [m]; Fahrt mit dem VS „Greif“, 26. März 1998; vergrößerter Ausschnitt von Abbildung 7.5
- Abbildung 7.7:** Differenzen zwischen INS- und GPS/COMPASS-Position in [m]; Postprocessing ohne Simulation von GPS-Datenlücken; Fahrt mit dem VS „Greif“, 26. März 1998
- Abbildung 7.8:** Differenzen zwischen INS- und GPS/COMPASS-Position in [m]; Postprocessing mit Simulation von GPS-Datenlücken; Fahrt mit dem VS „Greif“, 26. März 1998
- Abbildung 7.9:** Differenzen zwischen INS- und GPS/COMPASS-Position in [m]; Postprocessing mit Simulation von GPS-Datenlücken (10 sec); Fahrt mit dem VS „Greif“, 26. März 1998; vergrößerter Ausschnitt von Abbildung 7.8
- Abbildung 8.1:** Einfluß der Schiffsneigung auf die Tiefenmessung
- Abbildung 8.2:** Systemaufbau zur Meßfahrt, Cuxhaven, 08. und 09. Dezember 1997
- Abbildung 8.3:** Testfahrt mit dem VS "Greif" vor Cuxhaven, 08. Dezember 1997
- Abbildung 8.4:** Höhendifferenz (hell) und Rollwinkel (dunkel), VS „Greif“, Cuxhaven, 08. Dezember 1997
- Abbildung 8.5:** Verteilung und Häufigkeit der Höhendifferenzen, Cuxhaven, 08. Dezember 1997

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.1:	Zeitplan des Vorhabens
Tabelle 3.1:	Gewünschte Genauigkeitsanforderungen an hydrographisches Meßsystem, Ergebnis der Nutzerumfrage vom 21. Februar 1996
Tabelle 3.2:	Einmessung der Antennen im Schiffssystem in [m]; VWFS „Atair“, 21.-23. Mai 1996
Tabelle 3.3:	Zwischenantennenstrecken der Antennen in [m]; VWFS „Atair“, 21.-23. Mai 1996
Tabelle 3.4:	Leistungsdaten einiger inertialer Meßsysteme (Stand November 1996)
Tabelle 3.5:	Anbieter hybrider GPS/INS Systeme (Stand November 1996)
Tabelle 5.1	Wesentliche Fehlereinflüsse für relative GPS-Verfahren
Tabelle 6.1:	Auswirkung Δw eines Meßfehlers Δx in [°]
Tabelle 6.2:	Einbindbare INS
Tabelle 6.3:	Genauigkeiten des TSS POS/MV 320
Tabelle 7.1:	Kenndaten des AHRS LCR-88 von Litef
Tabelle 7.2:	Auswirkung von GPS-Datenlücken; Simulation im Postprocessing; Fahrt mit dem VS „Greif“, 26. März 1998
Tabelle 7.3:	Kenndaten des TGAC-RQ von iMAR
Tabelle 8.1:	Einbindbare GPS-Empfänger
Tabelle 8.2:	Formatbeschreibung \$PMBLVS
Tabelle 8.3:	Formatbeschreibung \$PGPPLVS
Tabelle 8.4:	Formatbeschreibung \$PMBRPH

Verzeichnis der Abkürzungen

Abz	Aufsichtsbezirk
AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltung der Länder der Bundesrepublik Deutschland
AHRS	Attitude and Heading Reference System, siehe auch KLRS
A-S	Anti Spoofing
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
BMBF	Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg
CUPT	Coordinate Updates (Koordinatenverbesserungen)
DGPS	Differential GPS
DHHN	Deutsches Haupthöhennetz
DHyG	Deutsche Hydrographische Gesellschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung
DoD	Department of Defence of the United States of America
DREF	Deutsches Referenzsystem
EPS	Echtzeit-Positionierungsservice
FKP	Flächenkorrekturparameter
FOC	Full Operational Capability
FOG	Fiber Optical Gyro
GIS	Geographische Informationssysteme
GHPS	Geodätischer hochpräziser Positionierungsservice
GLONASS	Global Navigation Satellite System der russischen Weltraumbehörde
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSM	Groupe Spécial Mobile, Global System for Mobile Communication
HEPS	Hochpräziser Echtzeit-Positionierungsservice
HPPS	Hochpräziser permanenter Positionierungsservice der LGN
IfE	Institut für Erdmessung der Universität Hannover
IHO	International Hydrographic Organization
INS	Inertiales Navigationssystem
IOC	Initial Operational Capability
KFKI	Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen
KLRS	Kurs- und Lagereferenzsystem
LGN	Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen
LORAN-C	Long Range Navigation
MB	Meßboot
MSL	Mean Sea Level
MSpNW	Mittleres Springtiden Niedrigwasser
MWS	Mittlerer Wasserspiegel
NAVSTAR	Navigation System with Time and Ranging
NELS	Northwest European Loran-C System
NMEA	National Marine Electronics Association
NN	Normalnull
OTF	On-The-Fly
OTW	On-The-Way

PDGPS	Precise DGPS
PN	Pegelnull
PPS	Precise Positioning Service, auch Puls Per Second
RDS	Radio Data System
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RLG	Ring Laser Gyro
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
TTFa	Time To Fix Ambiguities
UHF	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency
VS	Vermessungsschiff
VWFS	Vermessungs-, Wracksuch- und Forschungsschiff
WEK	Wasserstandserrechnungskarte
WSA	Wasser- und Schifffahrtsamt
WSD	Wasser- und Schifffahrtsdirektion
WSV	Wasser- und Schifffahrtsverwaltung
WGS84	World Geodetic System 1984
ZUPT	Zero Velocity Updates (Nullgeschwindigkeitsverbesserung)

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Das Vorhaben „Optimierung der hydrographischen Positions- und Lagebestimmung“ wurde vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) unter den Förderkennzeichen MTK 0590 A an der Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz (BfG) und MTK 0590 B am Institut für Erdmessung der Universität Hannover (IfE) gefördert. Die gesamte Laufzeit betrug etwa 3 Jahre von Mitte 1995 bis Mitte 1998. Die Arbeiten zur Sicherstellung von anwendungsbezogenen Anforderungen aus der Praxis wurden bei der BfG als Nutzerinstitut durchgeführt. Die Bearbeitung der wissenschaftlichen Fragestellungen wurde am IfE durchgeführt. Die Entwicklung eines marktfähigen Produktes erfolgte im Rahmen eines Auftrags bei der Firma Geo++, Gesellschaft für satellitengestützte navigatorische und geodätische Technologien mbH in Garbsen.

Das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) hat im Rahmen einer Projektgruppe die Sicherstellung der praxisnahen Forschung und die wissenschaftliche Begleitung übernommen.

1.1 Vorhabenbeschreibung

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung und Erprobung eines kostengünstigen, operationellen und echtzeitfähigen Meß- und Auswertesystem für die hochpräzise Positions- und Lagebestimmung auf Gewässern.

Abweichend von der im Vermessungswesen gebräuchlichen Bedeutung des Wortes „Lage“ als horizontale 2-D-Position wird hier unter dieser Bezeichnung entsprechend der *DIN 33417* (1987) („Die Lage eines Gegenstandes wird durch die Winkel zwischen Achsrichtungen des Objektsystems und denen des Bezugssystems angegeben. ...“) die Orientierung eines Meßschiffes im Raum, ausgedrückt durch die Parameter Rollen, Stampfen und den Kurswinkel, verstanden.

Im einzelnen bestehen die nachfolgenden Zielvorgaben.

Das System nutzt das *NAVSTAR Global Positioning System* (GPS) und ist in der Lage, auf der Grundlage handelsüblicher Hardwarekomponenten in modularer Weise alle heute üblichen und in Zukunft zu erwartenden Aufgaben der Positions- und Lagebestimmung in der Hydrographie und Gewässervermessung bei unterschiedlichen Genauigkeitsanforderungen zuverlässig zu erfüllen. Es wurde insbesondere für den Einsatz im Küstenbereich, aber auch für den von der Tide beeinflussten Bereich der Binnengewässer entwickelt. Das System kann somit unter anderem

- zur Verbesserung hydrographischer Aufnahmeverfahren,
- zur Gewässerkunde, insbesondere zur Erfassung von Wasserständen und Morphologie,
- zur Sicherheit des Schiffverkehrs,
- zum Küstenschutz und
- zur Überwachung von Wasserstraßen

genutzt werden.

Als Hauptsensoren werden GPS Empfänger unterschiedlicher Leistungsklassen verwendet. Zur Stützung können weitere Sensoren zugeschaltet werden, beispielsweise Inertialsensoren, Neigungsmesser oder Höhengeber. Das Kernmodul ist ein umfassendes Softwarepaket zur echtzeitfähigen Auswertung von relativen GPS Code- und Trägerphasenmessungen mit „On-The-Way (OTW)“-Mehrdeutigkeitslösungen für die präzise dreidimensionale Positionsbestimmung und hochgenaue Zeitzuordnung. Die dreidimensionalen Positionsdaten sowie die Lageinformationen (Kurs, Rollen, Stampfen) werden in Echtzeit über definierte Schnittstellen für die gewünschte Nutzung bereitgestellt. Alternativ können die Daten nachprozessiert werden. Die Datenübertragung bei der Echtzeitlösung nutzt vorhandene Kommunikationskanäle unterschiedlicher Datenrate und Reichweite.

Die Software ist auf handelsüblichen Rechnern lauffähig. Um zeitliche Zuordnungsprobleme zu vermeiden, wird empfohlen einen einheitlichen Rechner für die Messung und Datenerfassung der hydrographischen Daten zu verwenden. Es bestehen Standardschnittstellen zu handelsüblichen GPS-Empfängern, Sensoren und Aufnahmesoftware. Das System arbeitet robust und zuverlässig.

1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Zu Vorhabenbeginn wurden einige GPS-Produkte angeboten, die nach Herstellerangaben hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit bei der GPS-Positions- und Lagebestimmung aufwiesen. Diese Produkte hatten im allgemeinen die folgenden Nachteile:

- die Produkte waren in der Regel auf einen bestimmten Empfängertyp festgelegt
- die verwendeten mathematischen und stochastischen Modelle waren nicht transparent
- die Produkte waren wenig flexibel und liessen somit Sonderanwendungen nicht zu
- die Einbeziehung von Stützinformationen durch andere Sensoren waren nicht möglich
- die Erfolgsquote und Zuverlässigkeit bei der schnellen Mehrdeutigkeitslösung nach einem Signalabrisß war zu gering und häufig unbekannt
- die Frage des Datenalters war unbefriedigend gelöst
- die dreidimensionale Zentrierung war in der Regel nicht befriedigend gelöst.

Im Rahmen des Vorhabens sollte ein System entwickelt werden, das die genannten Nachteile nicht mehr aufweist. Als geeignete Grundlage für die Entwicklung wurde das von der Firma Geo++ angebotene Programmpaket GNRT gewählt. Es handelt sich dabei um ein Softwarepaket zur echtzeitfähigen Auswertung der relativen GPS-Messungen mit den OTW- Mehrdeutigkeitssuchverfahren, das bereits einige Anforderungen an das zu entwickelnde System abdeckt. Das System ist mit Schnittstellen zu den wichtigsten in der Geodäsie und präzisen Navigation üblichen GPS-Empfängertypen ausgestattet. Die Algorithmen entsprechen in weiten Teilen denen des Programmpakets GEONAP für Anwendungen im Postprocessing und sind somit dem Anwender durch vielfache Veröffentlichungen weitgehend transparent. 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 (*Wübbena* 1991).

Das Programm COMPASS zur dreidimensionalen Lagebestimmung mit GPS wird unter anderem seit vielen Jahren auf dem Forschungsschiff „Polarstern“, des Alfred Wegener Institutes, Bremerhaven, betrieben. Es wurde am IfE entwickelt und wird nunmehr von der Firma Geo++ weiterentwickelt.

Inertiale Meßsysteme zur Lagebestimmung waren bei Vorhabenbeginn unter anderem in der Luftfahrt (Aerophotogrammetrie) in der Seevermessung (Hydrographie, Hubsensoren) und im Maschinenbau (Maschineneinrichtung, -steuerung) im Einsatz. Gerade auf dem Gebiet der Hydrographie gab es kommerzielle Anbieter aus Großbritannien, Kanada und Norwegen. Inertiale Meßsysteme zur Positionsbestimmung waren vorwiegend bei wissenschaftlichen Instituten und beim Militär vorhanden. Diese Systeme waren aber technisch sehr aufwendig und teuer. Inwieweit die preiswerten, kommerziellen Systeme einen Beitrag zu den Zielen des Vorhabens leisten können, sollte im Verlauf des Vorhabens untersucht werden.

1.3 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 Availability (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 horizontalen Position 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. Vom Verteidigungsministerium der Vereinigten Staaten von Amerika (Department of Defence, DoD) autorisierte Nutzer 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. Für zivile Anwender besteht diese Möglichkeit nicht.

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 Seefunkfrequenzband 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 Permanenten Positionierungsservice (HPPS) der Niedersächsischen Landesvermessung (*LGN 1998*) 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 et al. (1997)* dokumentiert. Möglichkeiten der Nutzung des während der Dauer des Vorhabens erfolgten Ausbaus von Referenzstationen wurden im Rahmen des Vorhabens intensiv verfolgt.

2 Verlauf des Projekts

Der Projektverlauf erfolgte im wesentlichen nach den Planvorgaben (siehe Tabelle 2.1). Einzelne zeitliche Verschiebungen ergaben sich aus dem technischen Ablauf.

Jahr	Datum	BfG	IfE	Geo++
1995	01. 09.	Beginn des Vorhabens		
		Erarbeitung von Spezifikationen zum Prototyp		
		Voruntersuchungen	Voruntersuchungen, Detailentwicklungen	Softwareentwicklung zur hochpräzisen Echtzeitlösung
1996	15. 04.	Festschreibung der Spezifikation des Prototypsystems		
		Entwicklung des Prototypsystems		
	01. 09.	Fertigstellung des Prototypsystems		
		Gemeinsame Untersuchung und Verbesserung des Prototypsystems		
		Spezifikation des operationellen Systems		
1997	15. 01.	Festschreibung der Spezifikation des operationellen Systems		
		Anwenderinput	Spezialuntersuchungen	Entwicklung des operationellen Systems
	01. 09.	Fertigstellung des Produkts		
		Erprobung des fertigen Produkts		
		Dokumentation und Feinabstimmung		
1998	01. 04.	Entwurf der Dokumentation		
	31.05.	Abschluß des Vorhabens		
	31. 08.	Abschluß des Vorhabens		

Tabelle 2.1: Zeitplan des Vorhabens

Im ersten Projektjahr 1995 wurden die Beschaffungen für das Projekt durchgeführt und die Firma Geo++ vom IfE mit der Entwicklung des Produktes beauftragt. Weiterhin fand im Dezember 1995 ein Treffen potentieller Nutzer am Institut für Erdmessung statt (siehe Kapitel 3.1). Das Treffen diente der Ermittlung der Anforderungen und Wünsche der möglichen Anwender zur Erstellung der Spezifikation für das Prototypsystem. Hierauf aufbauend wurde ein Fragebogen entwickelt, der Institutionen aus öffentlichen Verwaltungen, mit der Ausbildung hydrographischen Fachpersonals betrauten Hochschulen und Vertretern aus dem privatwirtschaftlichen Bereich im Februar 1996 zugeschickt wurde. Die Spezifikation für das Prototypsystem wurde in Zusammenarbeit aller Beteiligten erstellt und an potentielle Nutzer im Juli 1996 zur Kenntnisnahme verschickt.

Im Rahmen des Vorläuferprojektes „Präzise GPS gestützte Höhenzuordnung für kontinuierliche Lotungsmessungen auf Gewässern“ (Förderkennzeichen: MTK 0551) wurden in Echtzeitanwendungen des öfteren falsche Mehrdeutigkeitsfestsetzungen festgestellt. Ein Ansatz zur Steigerung der Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Mehrdeutigkeitslösungen ist die Online-Vernetzung der Referenzstationen (siehe hierzu Kapitel 5.3). Erste Untersuchungen hierzu wurden im Februar 1996 in der Umgebung von Hamburg durchgeführt und in *Wübbena et al. (1996b)* veröffentlicht. Diese Entwicklungen sind zwar nicht Teil des Vorhabens, sie sind jedoch eng mit den Zielsetzungen

- genaue Positionsbestimmung
- sichere Mehrdeutigkeitslösung
- schnelle Mehrdeutigkeitslösung
- Nutzung des SAPOS-Dienstes

verbunden.

Im Mai 1996 fand eine dreitägige Meßkampagne zur Erprobung von Teilkomponenten des Systems im Elbeästuar statt. Auf dem VWFS „Atair“ des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Hamburg konnten in Zusammenarbeit mit dem BSH bestehende Probleme aufgezeigt und die Lagebestimmung mit GPS (COMPASS) mit einem in der Hydrographie handelsüblichen inertialen Sensor (TSS 335B) verglichen werden. Ergebnisse finden sich in Kapitel 3.2 und sind zum Teil veröffentlicht in *Böder, Seeber (1997)* und *Goffinet (1996)*.

Im Herbst 1996 wurde eine Marktanalyse der Hersteller inertialer Navigationssysteme (INS) durchgeführt, wobei besonderer Wert darauf gelegt wurde, mit Herstellern oder Vertreibern von INS in Deutschland Kontakt zu bekommen und konkrete Möglichkeiten einer Zusammenarbeit zu diskutieren (siehe Kapitel 3.3)

Im Jahr 1997 entstand die endgültige „Spezifikation für ein Meß- und Auswertesystem für die präzise Positions- und Lagebestimmung auf Gewässern“ in Zusammenarbeit der Projektbeteiligten BfG, Geo++ und IfE. Ein erster Entwurf wurde im Dezember 1996 verfaßt und in mehreren Schritten bis zum 01. April 1997 überarbeitet (siehe Kapitel 4.1). Die erstellte Spezifikation diente zum einen als Grundlage für die Erprobung des fertigen Systems und zum anderen als Diskussionsgrundlage im Dialog mit den potentiellen Nutzern des fertigen Systems. Aus diesem Grund wurde die Spezifikation im Mai 1997 an 35 Institutionen mit der Bitte um Stellungnahme versandt.

Weiterhin konnten am IfE 1997 erste Erfahrungen mit der Vernetzung von GPS-Referenzstationen gemacht werden (siehe Kapitel 5.3.2). Im wesentlichen wurden 1997 verschiedene Tests zur Integration von GPS/INS vorgenommen (siehe Kapitel 6.2 und Kapitel 7.2). Hierzu wurde auf ein inertiales Meßsystem der Fachhochschule Bochum (Litef LCR-88) zurückgegriffen. Um weitere Erfahrungswerte mit handelsüblichen Sensoren und neueren technischen Entwicklungen in der marinen Inertialtechnik zu erhalten, wurden auf einer Testfahrt mit dem VWFS „Deneb“ des BSH vor Rostock-Warnemünde im August 1997 zwei weitere Sensoren (TSS335B, TSS POS/MV 320) getestet (siehe Kapitel 6.2.2). Teilergebnisse sind in einer Diplomarbeit (*Eichhorn, 1998a*) nachgewiesen.

Um die schiffstypischen Bewegungen eines in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) eingesetzten Peilbootes zu erfassen, wurden im April 1997 Messungen mit einem inertialen Navigationssystem (INS) und dem Global Positioning System (GPS) durchgeführt. Die Meßfahrten wurden mit dem Peilboot MB „Hamster“ des WSA Köln auf dem Rhein bei Bonn-Mondorf durchgeführt (siehe Kapitel 6.2.1).

Im Dezember 1997 veranstalteten die BfG und das IfE eine Präsentation des fertigen Systems in Cuxhaven (siehe Kapitel 2.3 und Kapitel 8.3), an der Vertreter von ca. 30 Institutionen aus der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, aus dem Hochschulbereich und aus der privaten Wirtschaft teilnahmen. Im Rahmen einer Vortragsreihe wurden die Konzepte und Ergebnisse des Vorhabens erläutert.

Anschließend wurde das System bei mehreren Testfahrten auf dem VS „Greif“ des WSA Cuxhaven präsentiert. Die Testfahrten dienten gleichzeitig zur weiteren Erprobung des Systems (siehe Kapitel 8.3).

Im Jahr 1998 sind vom IfE weitere Tests zur Vernetzung von Referenzstationen in der Umgebung von Hannover (Ottbergen) durchgeführt worden (siehe Kapitel 5.3.2). Die Teilnahme an einer Meßfahrt mit dem VS „Greif“ des WSA Cuxhaven im März 1998 in der Elbemündung erlaubte Aussagen über die erreichbare Genauigkeit der Positions- und Lagebestimmung mit dem inertialen Sensor Litel LCR-88 der FH Bochum (siehe Kapitel 7.2.1).

Die Erprobung des fertigen Systems wurde bei der BfG mit einer Testfahrt auf dem Rhein mit dem MB „Hamster“ des WSA Köln fortgeführt. Dabei wurde ein inertialer Sensor der Firma TSS, der Dynamic Motion Sensor DMS-05, eingesetzt.

Auf dem 13. Hydrographentag der Deutschen Hydrographischen Gesellschaft e.V. (DHG) im Juni 1998 wurden das Vorhaben und die erreichten Ergebnisse im Rahmen eines Vortrages einer breiten Öffentlichkeit vorgestellt (*Seeber, G., V. Böder, H. Wirth, J. Dybek, G. Wübbena, A. Bagge, 1998*).

2.1 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Vorhaben wurde, wie oben angegeben, durch eine Projektgruppe des KFKI begleitet. In dieser Gruppe waren die folgenden Institutionen und Behörden vertreten.

- Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
- Bundesanstalt für Gewässerkunde
- Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein
- Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen
- Landesvermessungsamt Mecklenburg-Vorpommern
- Landesvermessungsamt Schleswig-Holstein
- Niedersächsisches Landesamt für Wasser und Abfall - Forschungsstelle Küste -
- Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord
- Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest

Die Projektgruppe trat zweimal jährlich zusammen und diskutierte die Berichte der Vorhabenbeteiligten. Auf diese Weise war eine ständige Abstimmung mit den Belangen der Praxis gewährleistet.

Durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Hamburg ergaben sich mehrere Möglichkeiten, an Meßfahrten auf der Nord- und Ostsee teilzunehmen und die an Bord befindlichen und andere, zusätzliche Sensoren hinsichtlich der Aufgabenstellung des Vorhabens zu untersuchen. Weitere Meßfahrten wurden auf Vermessungsschiffen und Peilbooten der Wasser- und Schifffahrtsämter Cuxhaven und Köln unternommen.

Der Landesbetrieb Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN), Hannover, und das Amt für Geoinformation und Vermessung, Hamburg, unterstützten die Beteiligten bei Testmessungen im Bereich der SAPOS-Referenzstationen Braunschweig, Cuxhaven, Clausthal, Hannover und Hamburg.

2.2 Veröffentlichungen

Im Verlauf des Vorhabens wurden mehrfach von den Beteiligten Teilergebnisse und Ergebnisse auf nationalen und internationalen Veranstaltungen veröffentlicht. Im folgenden sind die Veröffentlichungen in zeitlicher Reihenfolge genannt (Vortragende sind unterstrichen).

- **Wübbena, G., A. Bagge, G. Seeber, V. Böder, P. Hankemeier (1996b):** Reducing Distance Dependent Errors for Real-Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks. in: Proceedings ION GPS-96, Kansas City, September 1996
- **Böder, V., G. Seeber (1997):** Real-Time PDGPS Positioning, Attitude Determination and INS-Integration for Hydrographic Applications. In: International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation (KIS), Banff, Kanada, 03.-06. Juni, 1997
- **Wirth, H. (1998):** Hydrographisches Vermessungssystem HYMAS. Beitrag zum 44. DVW Seminar „Hybride Vermessungssysteme - Grundlagen und Anwendungen -“, 19.6.-20.6.1997, Neubiberg, in: „Hybride Vermessungssysteme - Grundlagen und Anwendungen-“, Schriftenreihe des DVW Nr. 29, Stuttgart, 1998
- **Dybek, J. (1997):** KFKI/BMBF Projekt „Optimierung der hydrographischen Positions- und Lagebestimmung“. Vortrag zum Kolloquium „Anwendungen der Satellitenpositionierung für die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung“ bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Koblenz, 12. August 1997, unveröffentlicht
- **Seeber, G., V. Böder (1997):** New Developments in the Improvement of GPS Kinematic Applications. Scientific Assembly of the International Association of Geodesy (IAG), Rio de Janeiro, Brasilien, 03.-09. September, 1997
- **Seeber, G., V. Böder, H. Wirth, J. Dybek, G. Wübbena, A. Bagge (1998):** Hydrographische Positionsbestimmung mit präzisiertem DGPS und INS-Unterstützung in Echtzeit. Beiträge zum 13. Hydrographentag 1998, Papenburg, 08.-10.06.1998

Der vorliegende Schlußbericht wird neben der Technischen Informationsbibliothek (TIB) an der Universität Hannover und den im KFKI vertretenen Stellen einem größeren Kreis von potentiellen Nutzern zugänglich gemacht, insbesondere den in die Nutzerbefragung einbezogenen Stellen. Zusätzlich wird der Schlußbericht in der Berichtsreihe der Bundesanstalt für Gewässerkunde unter der Nummer BfG-1167 erscheinen. Eine Veröffentlichung der wesentlichen Ergebnisse des Vorhabens in der Zeitschrift „Die Küste“ ist in Vorbereitung. Im internationalem Rahmen werden die Ergebnisse im Dezember 1998 auf dem International Symposium on Marine Positioning (INSMAP 98) in Melbourne, Florida, USA, vorgestellt.

2.3 Nutzertreffen in Cuxhaven

Um die Praxisreife des im Vorhaben entwickelten Systems einer breiten Öffentlichkeit zu präsentieren, hatten die BfG und das IfE zu einer Informationsveranstaltung eingeladen. Die Veranstaltung fand am 09. Dezember 1997 in den Räumen der Staatlichen Seefahrtsschule in Cuxhaven statt. Sie diente zum einen der Information über Stand und Entwicklung des Projektes und zum anderen zur endgültigen Abstimmung des Produktes auf die Anforderungen potentieller Nutzer. Auf dem Vermessungsschiff VS „Greif“ des WSA Cuxhaven fand eine praktische Vorführung statt.

Gleichzeitig konnten die Vorbereitungen zu dieser Veranstaltung vom 04. und 05. Dezember 1997 bei Geo++ und am 08. Dezember beim WSA Cuxhaven genutzt werden, um reichhaltiges Datenmaterial zu sammeln und die Software intensiv zu testen (siehe Kapitel 8.3).

Zu der Informationsveranstaltung waren ca. 35 Teilnehmer erschienen, wobei der überwiegende Anteil aus der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung kam. Weiterhin waren auch Vertreter der Landesvermessung und der privaten Wirtschaft anwesend.

In Kurzvorträgen der Projektbeteiligten BfG, IfE und Geo++ wurde ein Überblick über die Anforderungen und den Aufbau des Systems gegeben, sowie von den Untersuchungen und Ergebnissen der Erprobung berichtet.

Die nachfolgende Diskussion betraf im wesentlichen folgende Themen:

- Wie und wo läßt sich das System in der WSV oder in der Privatwirtschaft einsetzen?
- Werden die Genauigkeitsanforderungen der WSV erfüllt?
- Kann der Datenaustausch mit Systemen der WSV und der Privatwirtschaft gewährleistet werden?

Während der Vorführung des Systems an Bord des VS „Greif“ wurde die Diskussion lebhaft weitergeführt. Die Rückmeldung seitens der Teilnehmer war insgesamt sehr positiv.

3 Vorbereitende Untersuchungen

Zur Vorbereitung für die Erstellung der Spezifikation des Systems wurden zu Beginn des Vorhabens Kontakte mit Institutionen aufgenommen, die in der Hydrographie tätig sind. Hierzu fand am 14. Dezember 1995 ein Treffen potentieller Nutzer am Institut für Erdmessung in Hannover statt. Um einen größeren Teil möglicher Anwender zu erreichen, wurde weiterhin eine Nutzerumfrage durchgeführt.

3.1 Nutzerumfrage

Am Institut für Erdmessung wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern ein Fragebogen entwickelt, der potentiellen Nutzern des Systems aus öffentlichen Verwaltungen, mit der Ausbildung hydrographischen Fachpersonals betrauten Hochschulen und Vertretern aus dem privatwirtschaftlichen Bereich am 21. Februar 1996 zugeschickt wurde. Ziel war es, die Anforderungen des Anwenderkreises detailliert zu ermitteln, um das Produkt möglichst marktnah zu entwickeln.

Der Fragebogen (siehe Kapitel 11.1) umfaßte 29 Fragen zu Aufgaben, Ausstattung, Anforderungen und Nutzerwünschen. Von den 26 angeschriebenen Institutionen haben 11 geantwortet, davon 7 aus dem Bereich der öffentlichen Verwaltung, 1 aus Forschung und Lehre und 3 Vertreter aus dem privatwirtschaftlichen Bereich. Auch wenn der Rücklauf nur 42% beträgt, kann das Ergebnis als weitgehend repräsentativ angesehen werden, da alle wesentlichen Bereiche der potentiellen Nutzer vertreten sind.

Aufgaben, Meßgebiete

Als Aufgabenbereiche nannten die Beantworter des Schreibens Anwendungen im Küstenschutz, in der Verkehrssicherung, Hydrographie, Ingenieurvermessung, Ingenieurgeophysik, Wracksuche, Geologie und in der Forschung. Zukünftige Aufgabenstellungen sollen sich mit der Gezeitenbestimmung und die Einbeziehung von GIS-Anwendungen beschäftigen. Als Meßgebiete kommen vor allem die deutschen Wasserstraßen und die Häfen in Betracht, aber auch das Wattenmeer, Binnenseen, Flüsse und das offene Meer. Dabei werden von 2 Institutionen Distanzen von mehreren hundert Kilometern zur Küste erreicht, einige Meßgebiete befinden sich in Entfernungen von bis zu 50 km vom Festland. Der weitaus größte Anteil der Messungen findet aber in weniger als 20 km Entfernung von der Küste statt.

Ausstattung, Personal

Insgesamt wurden von den Institutionen 40 Vermessungsschiffe und -boote unterschiedlicher Größe angegeben, zusätzlich 24 Beiboote, die für Vermessungsaufgaben eingesetzt werden. Dabei werden in 10 von den 11 Institutionen bereits DGPS-Verfahren eingesetzt, allerdings mit geringeren Genauigkeiten. Weitere Verfahren bei der Positionsbestimmung waren die Polarortung (bei 8 Institutionen) und Syledis (6). Zur Tiefenbestimmung werden zumeist Mehrfrequenzlote (5), aber auch Einzelstrahl- (2) und Fächerecholote (je bei 2 Institutionen) eingesetzt. Die Aufnahmesoftware (in 6 Fällen NAVISOFT von NAVITRONIC, in 2 Fällen HYDROMAP von STN ATLAS Elektronik, 1 HYMAS von BfG) läuft üblicherweise auf PC-Basis (8 Anwender) und/oder auf Workstations (4) an

Bord. Als meistgenutzte Schnittstelle ist das NMEA-Format (5 Nutzer) genannt worden, ansonsten lagen herstellerabhängige (z.B. HCE) und selbstentwickelte Formate (Punktformat WSV) vor. Über die Hälfte der Anwender benutzt bereits digitale Kartengrundlagen zur Navigation, in 9 von 11 Fällen wird dies für die Zukunft angestrebt.

Das Bedienungspersonal an Bord hat in den WSV-Verwaltungen üblicherweise eine (see-) vermessungstechnische Ausbildung, während die privatwirtschaftlichen Anwender eher Ingenieure einsetzen. Für die häusliche Bearbeitung der Daten werden beide Ausbildungsniveaus genannt.

Anforderungen

Zur Abschätzung anfallender Datenmengen wurden Fragen über die Dauer der Meßfahrten gestellt (üblicherweise mehrere MB pro Tag, aber bis zu 8 GB möglich). Die Zeitzuordnung auf den Schiffen wird zumeist über Rechneruhr (7 Fälle) oder DCF-Zeitzeichen (2) realisiert. Die GPS-Zeit wird nur in einem Fall benutzt.

Gebräuchliche Punktabstände zwischen einzelnen Peilungen liegen bei Hafenanwendungen bei 1m bis 10m, sonst eher bei 10 m bis 50 m. Fünf Institutionen geben an, daß eine höhere Punktdichte gegebenenfalls sinnvoll sein kann, vier Institutionen streben keine Erhöhung an.

Fünf Institutionen fordern von dem neu zu erstellenden System, daß es echtzeitfähig ist, weitere fünf finden dieses Merkmal wünschenswert.

Hinsichtlich der Höhenbezugsflächen, auf die sich die Messungen beziehen sollen, wird von allen Anwendern das NN-System genannt. Zusätzlich werden aber von acht Institutionen das Seekarten-null (SKN) und von drei Institutionen das HN angegeben.

Die Beantwortung der Frage nach der Genauigkeit der Positionsbestimmung wird in Tabelle 3.1 zusammengefaßt:

	Horizontal	Höhe
Anfang 1996		
Verwaltung	1 - 10 m	0,03 - 0,3 m
Privat	0,05 - 1 m	0,05 - 0,1 m
zukünftig		
Verwaltung	0,5 - 1 m	0,03 - 0,1 m
Privat	0,03 - 0,2 m	0,05 - 0,1 m
Navigation		
Verwaltung	1 - 5 m	
Privat	0,2 - 1 m	

Tabelle 3.1: Gewünschte Genauigkeitsanforderungen an ein hydrographisches Meßsystem, Ergebnis der Nutzerumfrage vom 21. Februar 1996

Die Anforderungen für die Höhenkomponente sind erwartungsgemäß größer als für die horizontalen Komponenten. Für das zu entwickelnde Produkt wird daraus die zu erreichende Genauigkeit für die Höhe mit 5 cm und 95% Sicherheitswahrscheinlichkeit abgeleitet.

Erwartungen an das System

Die letzte Frage bezog sich auf die weiteren Erwartungen, die an das System zu stellen sind. Die wichtigsten dabei genannten Punkte waren:

- zuverlässige, qualitätsgesicherte Meßwerte auch in schwierigen Gebieten
- Verringerung der derzeitigen Kosten
- einfache Bedienung
- Mobilität, Robustheit
- modularer Aufbau
- Editierungsmöglichkeiten
- Möglichkeit der Postprozessierung
- Datenrate bis zu 10 Hz
- lauffähig auf handelsüblichen Rechnern, unabhängig vom Betriebssystem
- offener Datenstandard
- offene Schnittstellen
- Protokollierung der Systemzustände
- gute Beschreibung des Systems

Die Nutzerumfrage floß in die Erstellung der Spezifikation für das Prototypsystem und für das operationelle System ein. Naturgemäß konnten nicht alle Einzelwünsche berücksichtigt werden, jedoch hält sich die Spezifikation weitgehend an die aus der Nutzerumfrage erhaltenen Informationen. Die Spezifikation für das Prototypsystem wurde gemeinschaftlich von den an dem Vorhaben beteiligten Gruppen 1996 erstellt und an potentielle Nutzer im Juli 1996 versandt. Ebenso wurde mit der Spezifikation für das fertig System verfahren (Erstellung Frühjahr 1997, Versendung Mai 1997).

3.2 Meßfahrt auf dem VWFS „Atair“

In Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg, wurde eine Peilfahrt mit dem Vermessungsschiff VWFS „Atair“ durchgeführt, um die Möglichkeiten des an Bord vorhandenen Systems austesten zu können und um Voruntersuchungen zur Lagebestimmung mit inertialen Sensoren und der GPS-Auswertesoftware COMPASS vorzunehmen. Im Zeitraum vom 21. Mai bis zum 23. Mai 1997 wurden wiederholt Profile in der Deutschen Bucht befahren. Erste für das BSH relevante Ergebnisse sind in *Goffinet (1996)* beschrieben.

3.2.1 Meßaufbau

Um eine dreidimensionale GPS-Lagebestimmung in Echtzeit vornehmen zu können, müssen mindestens drei GPS-Antennen an Bord fest installiert werden. Zusätzlich müssen die Koordinaten der Antennen in den Komponenten dx , dy , dz des Schiffssystems hochgenau bekannt sein.

Die Installation und Einmessung der Antennen in das Schiffssystem gelang an Land während das Schiff auf Werft in Rendsburg lag. So konnte auch der Höhenbezug zwischen GPS-Antennen und Schwinger mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern bestimmt werden. Die Einmessung der Antennen mit statischem GPS ergab die in den Tabellen 3.2 und 3.3 dargestellten Werte.

Einmessung im System Schiff			
	X	Y	Z
MA01	28,140	-0,720	24,006
MA02	28,093	0,779	24,006
HD01	-0,009	-4,289	9,600
HD02	0,001	4,289	9,620

Tabelle 3.2: Einmessung der Antennen im Schiffssystem in [m]; VWFS „Atair“, 21.-23. Mai 1996

Zwischenantennenstrecken			
	MA01	MA02	HD01
MA01			
MA02	1,500		
HD01	31,821	31,983	
HD02	32,000	31,756	8,578

Tabelle 3.3: Zwischenantennenstrecken der Antennen in [m]; VWFS „Atair“, 21.-23. Mai 1996

Die Abbildung 3.1 stellt den Messungsaufbau für die Messungen dar. Zwei Antennen wurden im Mast befestigt, zwei weitere am Heck an Backbord und an Steuerbord. Weiterhin wurde eine Funkantenne zum Empfang der RTCM-Korrekturen im Mast angebracht. Als Referenzstation für die Echtzeitanwendung wurde die Permanentstation Cuxhaven der Niedersächsischen Landesvermessung genutzt (Trimble 4000 SSI-Empfänger). Eine zweite Referenzstation für das Postprocessing wurde in unmittelbarer Nähe der Permanentstation auf dem Dach des Hafenamtes Cuxhaven errichtet.

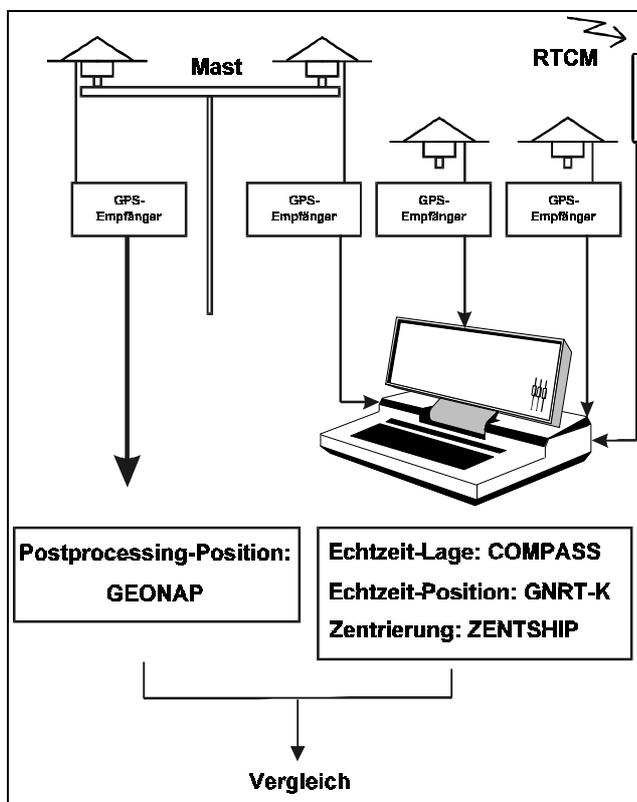


Abbildung 3.1: Messungsaufbau auf dem VWFS „Atair“; Peilfahrt Elbeästuar; 21.-23. Mai 1996

Als Referenzstation für die Echtzeitanwendung wurde die Permanentstation Cuxhaven der Niedersächsischen Landesvermessung genutzt (Trimble 4000 SSI-Empfänger). Eine zweite Referenzstation für das Postprocessing wurde in unmittelbarer Nähe der Permanentstation auf dem Dach des Hafenamtes Cuxhaven errichtet.

Sämtliche Empfänger an Bord der „Atair“ waren Produkte der Firma Ashtech (Z12 und Z12 Sensor). Es wurden zwei Heckantennen und eine Mastantenne für die Echtzeitanwendungen verwendet. Eine zweite Mastantenne diente zur Datenaufzeichnung für die Auswertung im Postprocessing. Die Echtzeitauswertungen wurden auf einem Pentium 90 MHz-Rechner durchgeführt. Die Daten wurden mit einer Rate von 1 Sekunde aufgezeichnet.

Desweiteren wurde auf dem VWFS „Atair“ das Lagemeßsystem 335B der Firma TSS betrieben. Es wurden die Werte für Rollen, Stampfen und den Hub ausgegeben. Die Werte wurden in einem Programm mit einem GPS-Zeitstempel versehen und abgespeichert.

3.2.2 Auswertung und Ergebnisse

Die Auswertung umfaßte zum einen den Vergleich zwischen der GPS Positions- und Lagebestimmung in Echtzeit und den in Postprocessing erhaltenen Ergebnissen der zweiten Mastantenne, zum anderen wurden die TSS-Daten mit den Daten des COMPASS-Systems verglichen. Weiterhin wurde eine Beschickung der Tiefenmessungen mit den im Postprocessing berechneten GPS-Höhen und den in Echtzeit gemessenen GPS-Lagen berechnet. Da die Peilprofile mehrmals in verschiedene Richtungen befahren wurden, konnten die Tiefen verglichen werden. Letzteres wird in *Goffinet (1996)* beschrieben. Die Auswertungen im Postprocessing wurden mit dem Programmsystem GEONAP durchgeführt.

Vergleich Echtzeitpositionierung und Postprocessing

Für den Vergleich zwischen Echtzeitpositionierung und den im Postprocessing berechneten Werten wurde die GNRT-K Position mit den Lagewerten aus dem COMPASS-System und den Einmessungen mit einer Transformationsroutine (Programm ZENTSHIP, siehe Abbildung 3.1) in die Position der zweiten Antenne umgewandelt. Somit wurden die Echtzeitergebnisse auf eine im Postprocessing berechnete Position zentriert. Abbildung 3.2 zeigt die Ergebnisse des Vergleichs exemplarisch an einem ca. 2 h 40 min langem Datensatz in Form der dreidimensionalen Abweichung zwischen den Lösungen.

Es wird erkennbar, daß die Abweichungen in den Positionen im allgemeinen unter einem Dezimeter liegen. Ab der GPS-Sekunde 223231 kam es jedoch zu einer offensichtlich falsch festgesetzten Mehrdeutigkeit, die die Abweichungen auf bis zu 0,6 m ansteigen ließ. Nach ca. 20 min wurde die falsche Mehrdeutigkeitsfestsetzung vom System bereinigt. Die Abweichung um 0,6 m läßt sich auf

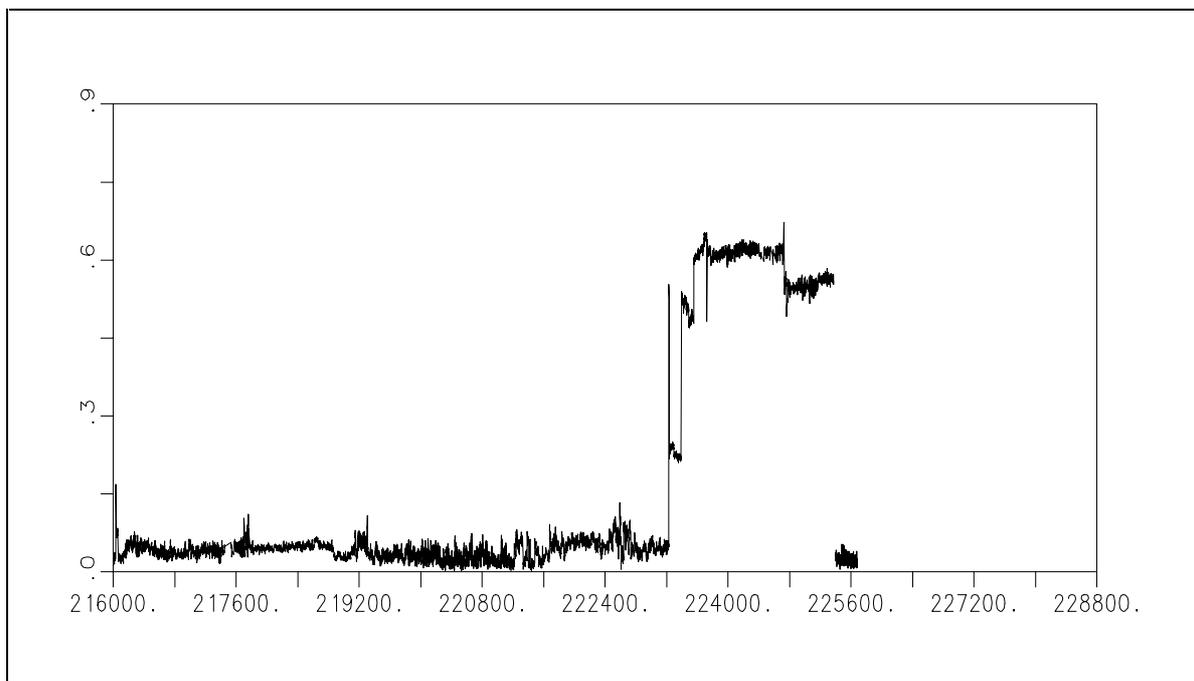


Abbildung 3.2: Differenzen Echtzeitlösung (GNRT-K + COMPASS) zu Postprocessinglösung (GEONAP) in [m]; Profile 1-2, 3-4: Entfernung zur Referenz Cuxhaven 3-15 km; VWFS „Atair“, 21.-23. Mai 1996

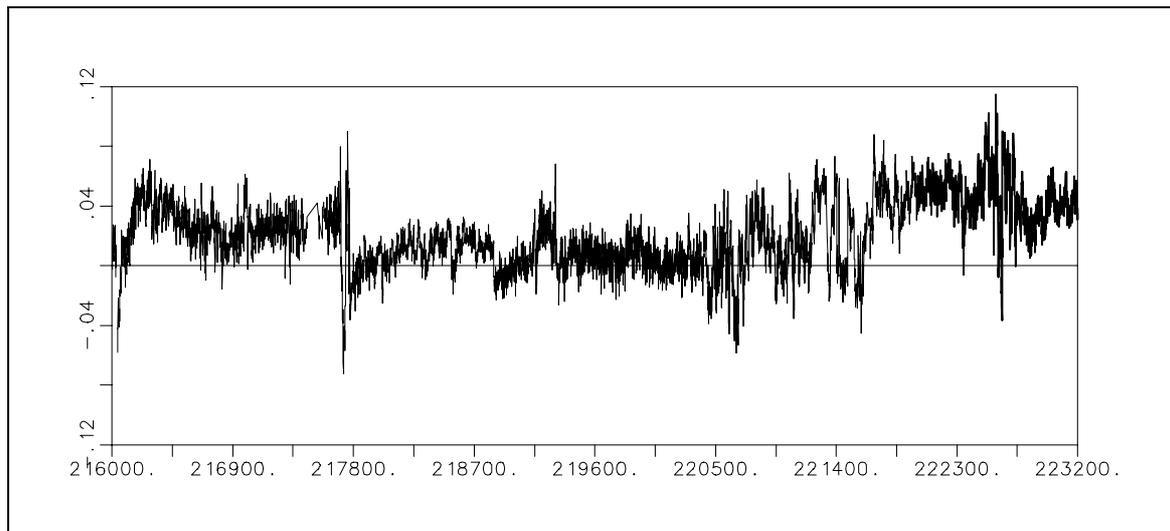


Abbildung 3.3: Höhendifferenzen Echtzeitlösung (GNRT-K+COMPASS) zu Postprocessinglösung (GEONAP) in [m]; Profile 1-2, 3-4: Entfernung zur Referenz Cuxhaven 3-15 km; VWFS „Atair“, 21.-23. Mai 1996

einem vom Seegang bewegten Schiff schwerlich erkennen, selbst wenn es sich um eine Abweichung nur in der Höhenkomponente handelt. Ein derartiger Fehler kann also vor Ort nicht sicher erkannt werden. Zu diesem Zeitpunkt fallen Signalverluste zu den GPS-Satelliten und Störungen in den Korrekturdaten auf. Die in Abbildung 3.3 dargestellten Höhendifferenzen zur Zeit der korrekt gelösten Mehrdeutigkeiten variieren zwischen -8 cm und +10 cm, liegen im wesentlichen aber unter einem Betrag von 5 cm.

Für die Zuverlässigkeit des Systems ist eine sichere Mehrdeutigkeitslösung von entscheidender Wichtigkeit. Aus diesem Grunde wurde dieses Kriteriums im Rahmen des Vorhabens sorgfältig untersucht.

Vergleich zwischen der GPS-Lagebestimmung mit COMPASS und dem Roll-Stampf-Hub-Sensor TSS

Die Lagebestimmung wurde jeweils in Echtzeit mit dem GPS-Lagebestimmungssystem COMPASS der GEO++ und dem Roll-Pitch-Heave Sensor TSS 335B vorgenommen. Das TSS gibt Informationen über Rollen, Stampfen und Hub zur Korrektur der Tiefenmessungen aus. Um einen Vergleich der TSS-Daten mit den GPS-Daten durchführen zu können, müssen die Systeme zeitlich synchronisiert werden. Da die GPS-Daten mit einem GPS-Zeitstempel versehen sind, bot es sich an, auch die Daten des TSS mit der GPS-Zeit zu versehen. Dazu wurde ein GPS-Zeitimpuls aus einem Empfänger auf den Rechner gelenkt, der gleichzeitig für die Aufzeichnung der TSS-Daten genutzt wurde. Eine GPS-Zeitzuordnung der TSS-Daten war also gegeben, so daß der direkte Vergleich möglich war.

Abbildung 3.4 zeigt, daß die Abweichungen im Mittel um die Werte $0,1^\circ$ für das Stampfen und für das Rollen um $-0,3^\circ$ streuen. Die untere Darstellung der Abbildung greift zur Veranschaulichung einen Teilbereich von 200 s Länge für das Rollen heraus. Die Differenzen des Stampfens variieren wesentlich geringer ($\pm 0,1^\circ$) als die Differenzen des Rollens ($\pm 0,2^\circ$). Dies liegt zum großen Teil am geringeren Auflösungsvermögen der Rollbewegung aufgrund der kleineren Basis (Heck-Heck,

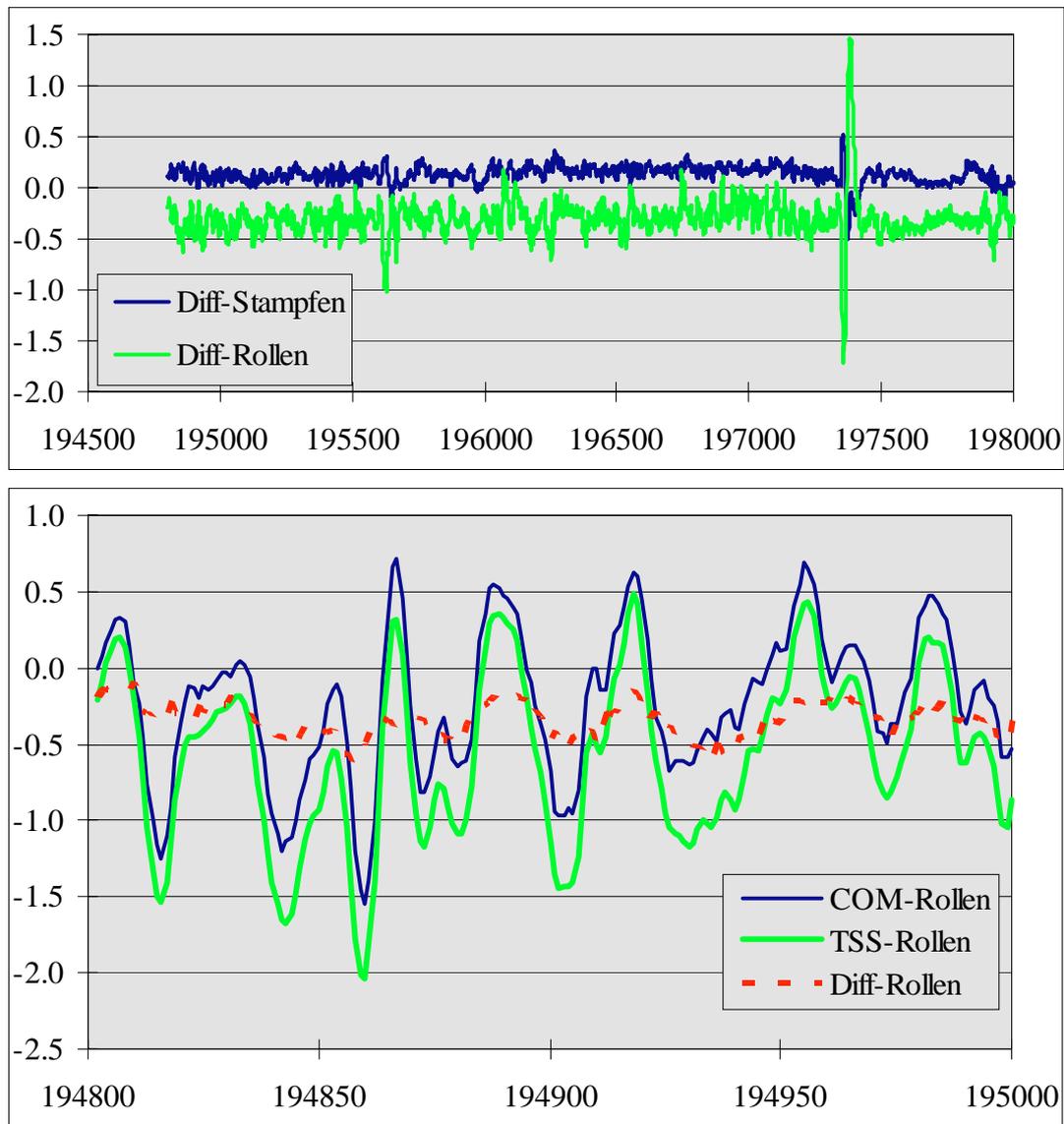


Abbildung 3.4: Vergleich COMPASS- mit TSS-Lagebestimmung; Werte in [°]; VWFS „Atair“, 21.-23. Mai 1996

ca. 8,5 m) im Vergleich zur Basis längs der Schiffsachse (Heck-Mast, ca. 28 m) zum Messen der Stampfbewegung. Weiterhin wies die Rollbewegung eine weitaus größere Dynamik auf, so daß Rest-synchronisationsfehler sich stärker bemerkbar machten. Die große Amplitude bei Epoche 197300 ist auf eine Kurvenfahrt zurückzuführen.

Von Interesse ist auch der konstante Versatz um $0,1^\circ$ für das Stampfen bzw. $-0,3^\circ$ für das Rollen. Hier sind Unstimmigkeiten in der Definition der Lagebezugssysteme anzunehmen. Diese können zum einen auf ein dejustiertes TSS-System und zum anderen auf eine fehlerhafte Einmessung der GPS-Antennen hinweisen. In jedem Falle liegen die Koordinatenachsen der Systeme nicht parallel. Um dies zu vermeiden, kann zum Anfang der Messungen eine Justierung vorgenommen werden. Im Rahmen des Projektes war es leider nicht möglich die erforderlichen Messungen vorzunehmen. Bezogen auf die Länge der jeweiligen Basis (Heck-Heck, Mast-Heck) entspricht eine Differenz von $0,3^\circ$ im Rollen einer Abweichung von 4,5 cm, bzw. eine Differenz von $0,1^\circ$ im Stampfen einer Abweichung von 4,9 cm in der Höheneinmessung.

Vergleich der Profilaufnahmen

In *Goffinet (1996)* wird ein Vergleich über die mehrfache Aufnahme der Profile vorgenommen. Es wurden dabei die mit GEONAP bestimmten Koordinaten mit den mit COMPASS erhaltenen Lagewinkel auf den Schwinger reduziert und die gemessenen Tiefe abgezogen. Bei mehrfacher Befahrung des Profils bei unterschiedlichem Tiedeeinfluß ergab sich eine Wiederholgenauigkeit besser als 7,5 cm nach Elimination der auf fehlerhafte Tiefenmessung zurückzuführenden Daten. Diese Genauigkeiten sind für hydrographische Anwendungen im Bereich der Küste und Off-Shore als sehr gut einzustufen.

3.2.3 Folgerungen aus der Meßfahrt

Die Untersuchungen zeigten, daß die Beschickung einer hydrographischen Vermessung mit GPS mit hoher Genauigkeit effizient durchgeführt werden kann. Eine erste Version des Echtzeitsystems GNRT-K der Firma Geo++ GmbH zur Positionsbestimmung kam zum Einsatz, mit der die geforderten Genauigkeiten weitestgehend erreicht wurden. Gleichzeitig wurden an dieser Version der Software aber auch Mängel festgestellt, so zum Beispiel die fehlerhafte Festsetzung von Mehrdeutigkeiten.

Zusätzlich wurden erste Erfahrungen mit inertialen Meßsystemen zur Lagebestimmung gesammelt. Das TSS 335B ist ein für hydrographische Anwendungen handelsübliches System zur Messung des Roll- und Stampfwinkels und des Hubs. Im weiteren Verlauf des Vorhaben wurde eine explizite Datenschnittstelle zu diesem inertialem System geschaffen.

Die Lagebestimmung mit GPS mit dem Programm COMPASS der Firma Geo++ GmbH zeigte, daß auch dieses System für hydrographische Anwendungen grundsätzlich geeignet ist. Bei dem Vergleich mit den Ergebnissen dem inertialen System wurde ersichtlich, daß die GPS-Lagebestimmung weniger von der Schiffsdynamik beeinflußt wurde und somit bei bewegten Fahrten eine höhere Genauigkeit gewährleistet war.

Die Erfahrungen mit dem Umgang der Echtzeitsoftware GNRT-K und die beschriebenen Erkenntnisse flossen in die weitere Entwicklung des Systems ein.

3.3 Marktanalyse inertielle Meßsysteme (INS)

Die Einbeziehung inertialer Meßsysteme (INS) zur Positionsbestimmung gehörte nicht ausdrücklich zu den Zielen des Vorhabens. Da aber in Zukunft angesichts neuerer Entwicklungen auf dem Gebiet der Inertialsensoren mit einer starken Verknüpfung von GPS und INS gerechnet werden kann, wurden die Möglichkeit und der Nutzen einer Stützung der GPS-Lösung durch INS im Rahmen des Vorhabens näher betrachtet. Die Untersuchung von INS im Hinblick auf die Bestimmung der Lagewinkel ist jedoch in der Aufgabenstellung des Vorhabens gefordert, deshalb wurden solche INS im Rahmen des Vorhabens näher untersucht. Die erforderlichen Informationen über komplette inertielle Navigationssysteme zur Positionsbestimmung und Einzelkomponenten zur Messung von Beschleunigungen und Drehwinkeln wurden zum Teil aus der Literatur entnommen und teils von den Herstellern erfragt.

3.3.1 Kontaktaufnahme zu deutschen und internationalen Herstellern

Es wurden 23 Faxmitteilungen an Firmen in USA, England, Norwegen und Israel versendet, deren Anschriften aus der Zeitschrift 'GPS-World' stammen. Es kamen sieben Rückmeldungen, wovon fünf Firmen Informationen zu entsprechenden Produkten lieferten.

Die für das Vorhaben relevanten Informationen sind der Tabelle 3.4. Im Laufe des Vorhabens haben sich sowohl die Preise, als auch die Leistung einzelner Systeme verändert.

	TSS 335B Motion Sensor	TSS DMS 05 Motion Sensor	Seatex MRU-5	Honeywell Gyrocube C102-D-3	Systron Donner MotionPak	ATLAS Dynaba- se C
Hersteller	TSS (UK) Ltd. New Mill, New Mill Lane, Witney, Oxfordshire OX8 5TF United Kingdom	TSS (UK) Ltd. New Mill, New Mill Lane, Witney, Oxfordshire OX8 5TF United Kingdom	Seatex AS Pirsenteret N-7005 Trondheim Norway	IAT Ingeniergesell- schaft für Auto- matisierungs- technik Friedrich-Engels-Str. 1 14727 Premnitz	Systron Donner Inertial Division 2700 Systron Drive Concord, California 94518 USA	STN Atlas Elektronik GmbH Sebaldsbrücker Heerstr. 235 28305 Bremen
Preis	ca. 60.000,- DM	ca. 65.000,- DM	ca. 48.000,- DM		ca. 20.000,- DM	ca. 65.000,- DM
Ausstattung	3 Beschleunigungs- messer, 3 Drehwin- kelmesser Heave, Roll, Pitch	3 Beschleunigungsmes- ser, 3 Drehwinkelmes- ser Heave, Roll, Pitch	3 Beschleunigungsmes- ser, 3 Drehwinkelmes- ser Heave, Roll, Pitch, Surge, Sway	3 Ringlaserkreisel, Eulerwinkel und aufbereitete Meßda- ten, optional Einbin- dung Positionsmes- system	3 Beschleunigungs- messer, 3 „solid-state“ Kreisel Roll, Pitch, Yaw	3 Drehwinkelmesser, 1 Temperatursensor Heave, Roll, Pitch
Genauigkeit	Heave: 5 cm oder 5% Roll/Pitch: 0,1° dynamic	Heave: 5 cm oder 5% Roll/Pitch: 0,05° dynamic	Drehwinkelmesser: < 10°/√h Drift 0,04° statisch 0,05° dynamisch 0,01° rms Roll/Pitch Beschleunigungsmes- ser: 0,01 m/s ² (Heave) 0,001 m rms (Surge) 0,1 m rms (Sway)	<0,003°/√h - 0,05°/√h Drift	0,5°/s Drift	Heave: 5 cm Roll/Pitch: 0,05° dynamic
Meßbereich	Heave: ± 10 m Beschleunigung: ± 20 m/s ²	Heave: ± 10 m Roll/Pitch: ± 30°	Drehwinkelmesser: ± 150° Beschleunigungsmes- ser: ± 5 m/s	± 400°/s		Heave: ± 10 m
Auflösung		Heave: 1 cm Roll/Pitch: 0,01 digital 0,0003° analog	Drehwinkelmesser: < 0,01°	0,0003°		
Sonstiges	Ausgaberate: 21 Hz Initialisierungszeit: < 3 min	Ausgaberate: 200 Hz	Ausgaberate: 100 Hz Initialisierungszeit: < 10-20 min	Interne Taktrate: 1600 Hz Initialisierungszeit: < 1 min	Drehwinkelmesser: >60 Hz Beschleunigungsmes- ser: >500 Hz	

Tabelle 3.4: Leistungsdaten einiger inertialer Meßsysteme (Stand November 1996)

In der Tabelle 3.5 werden einige Systeme, die INS und GPS bereits in einer Navigationseinheit vereinigen, zusammengestellt. Solche Systeme erreichten zum Zeitpunkt der Erhebung aber nicht die im Vorhaben geforderten Genauigkeiten und werden daher nicht weiter untersucht. Im Laufe des Vorhabens haben sich die Leistungsdaten einzelner Systeme geändert, und mit dem System POS/MV (Nachfolgesystem des APPLANiX POS/MV) der Firma TSS Ltd. ist ein weiterer Anbieter hinzugekommen, dessen System den Anforderungen schon näher kommt. Das System TSS POS/MV wurde im Rahmen einer Diplomarbeit am IfE untersucht (Eichhorn, 1998a und 1998b).

Durch telefonische Anfragen bei mehreren deutschen Anbietern (AERODATA Flugmeßtechnik GmbH, Braunschweig, IAT Ingenieurbetrieb für Automatisierungstechnik GmbH, Premnitz, LITEF GmbH, Freiburg und STN ATLAS ELEKTRONIK GmbH, Bremen) wurde versucht, bei den Herstellern inertialer Meßsysteme Interesse für das Vorhaben zu wecken und eine Zusammenarbeit zu vereinbaren. Von den genannten Firmen war nur die IAT GmbH daran interessiert, ihre Systeme den Erfordernissen des Vorhabens anzupassen, bzw. geeignete Systeme zum Zweck der Erprobung bereitzustellen.

Anbieter	System	Genauigkeit	
		Position	Lage
Aerodata	AeroNav H	< 5 m (2 σ)	
	SeaNav		
APPLANiX	POS/MV 320	0,75 m - 5 m (CEP)	0,05° (1 σ)
IAT	μ -INS/GPS	< 34 m (1 σ)	0,1° (1 σ)
	H-764 G EGI	< 16 m (SEP)	
Rockwell	M-Migits	16 m (SEP)	0,14°
Seatex	Seapath 200	2 m (1 σ)	0,05° (1 σ)
	Seapath 400	1 m (1 σ)	0,05° (1 σ)
Vista Controls	Score Navigator	16 m (SEP) / 10 m (CEP)	

Tabelle 3.5: Anbieter hybrider GPS/INS Systeme (Stand November 1996)

Durch Vermittlung der Firma Geo++ kam es zu Kontakten mit der Firma iMAR GmbH, Gesellschaft für inertielle Meß-, Automatisierungs- und Regelsysteme, St. Ingbert. Diese Firma stellt inertielle Meß- und Navigationssysteme her, und wendet die Produkte z. B. bei Lage- und Fahrdynamikanalysen, inertialen Kfz-Vermessungen, Kurs- und Lage-Referenzsystemen und INS/GPS gekoppelten kinematischen Vermessungen an.

Mit den Firmen IAT und iMAR wurden im Januar 1997 weitere Gespräche geführt.

3.3.2 Nutzung von INS zur ungestützten Lagebestimmung

Für die reine Lagebestimmung und Zentrierung sind auch INS geeignet, die nicht von GPS gestützt werden. Zu dieser Kategorie zählen unter anderem die Hubsensoren und INS der Firmen SEATEX, STN ATLAS ELEKTRONIK und TSS Ltd.. Mit den Herstellern bzw. deren deutschen Vertriebspartnern können die technischen Details der Datenschnittstellen geklärt werden.

3.3.3 Literatur über die Integration von GPS und INS

In der aktuellen Literatur wird in zunehmenden Maße über die Integration von GPS und INS geschrieben. So befassen sich diverse Hochschulen in Deutschland (Institut für Erdmessung und Navi-

gation, Bundeswehrhochschule München; Institut für Physikalische Geodäsie, TU Darmstadt; FH Bochum; ...) mit diesem Thema. International gibt es aktuelle Veröffentlichungen vom ION GPS '96 Symposium, das im Herbst 1996 in Kansas City, USA stattfand. Unter anderem befassen sich auch amerikanische Firmen (NAVSYS, KNIGHT SYSTEMS) mit der Entwicklung einer Integrationssoftware, wobei die Einbindung von PDGPS mit Zentimeter-Positionsgenauigkeit aber nicht erwähnt wird.

An den oben genannten Hochschulen sind Dissertationen entstanden, die sich mit der Integration von GPS und INS befassen, wobei der Charakter dieser Arbeiten mehr wissenschaftlich zu sehen ist und den in diesem Vorhaben erarbeiteten Nutzeranforderungen weniger entsprechen. Die eingesetzten INS sind zumeist für die im Vorhaben verfolgten Anwendungen zu teuer.

Eine Vielzahl internationaler Veröffentlichungen berichten über Erfahrungen bei Anwendungen aus dem geodätischen Bereich, wobei vorwiegend die kinematische Punktbestimmung beim Einsatz von INS in Flugzeugen und Automobilen gemeint ist.

Ausgewählte Aufsätze sind im Literaturverzeichnis aufgeführt (z.B.: *Heinze 1996, Keller 1991, Söhne 1996*).

4 Aufbau des Meß- und Auswertesystems

Kern des Vorhabens war die Entwicklung und Erprobung eines Meß- und Auswertesystems für die hydrographische Positions- und Lagebestimmung auf Gewässern. Das System ist modular aufgebaut und besitzt Erweiterungsmöglichkeiten, um auf die Anforderungen verschiedener Nutzer abgestimmt zu werden. Der Einsatz auf handelsüblichen Rechnern (PC) wird ebenso gewährleistet, wie die Auf- und Abwärtskompatibilität gegenüber den eingesetzten GPS-Sensoren. Weitere Sensoren und inertielle Meßsysteme (INS) zur dreidimensionalen Lagebestimmung (Kurs-, Roll- und Stampfwinkel) können optional eingebunden werden. Der Datenaustausch mit Software zur Erfassung von hydrographischen Daten und anderen Anwendungen wird über standardisierte Schnittstellen sichergestellt.

Das System liefert eine hohe Genauigkeit in Echtzeit mit einem geringen Datenalter. Desweiteren ist die Navigation mit eingeschränkter Genauigkeit möglich, wobei durch Prädiktion ein Datenalter Null realisiert werden kann. Es erfolgt die definierte Zuordnung einer Zeitinformation zur Positions- und Lagebestimmung. Die Zeitinformation wird einer hydrographischen Datenerfassung zur Verfügung gestellt.

Das Kernmodul ist ein umfassendes Softwarepaket zur Auswertung von relativen GPS-Code- und Trägerphasenmessungen (PDGPS) mit „On-the-way“ (OTW) Mehrdeutigkeitsalgorithmen für die präzise dreidimensionale Positionsbestimmung mit hochgenauer Zeitzuordnung. Die Mehrdeutigkeiten werden schnell und zuverlässig gelöst. Die Möglichkeit zum GPS-Postprocessing durch optionale Rohdatenaufzeichnung und Nutzung einer Postprocessing-Option wird ebenfalls bereitgestellt. Das Kernmodul ist durch die Software GNRT der Firma Geo++ realisiert.

Die präzise GPS-gestützte Positionierung kann an das Netz von Referenzstationen des Satellitenpositionierungsdienstes der deutschen Landesvermessung (SAPOS) angeschlossen werden, aber auch der Betrieb eigener Referenzstationen ist möglich.

Die dreidimensionale Lagebestimmung kann optional durch mehrere GPS-Empfänger und die Software COMPASS der Firma Geo++ oder durch inertielle Meßsysteme (INS) geschehen. Diese Sensoren dienen zur Zentrierung und soweit geeignet, auch zur Positionsbestimmung (*Bäumker 1995b*).

4.1 Spezifikation für ein Meß- und Auswertesystem für die präzise Positions- und Lagebestimmung auf Gewässern

Die „Spezifikation für ein Meß- und Auswertesystem für die präzise Positions- und Lagebestimmung auf Gewässern“ ist im Verlauf eines mehrmonatigen Diskussionsprozesses entstanden. Die Grundlage bildete die Spezifikation des Prototypsystems und die Anregungen der befragten potentiellen Nutzer des Systems. An der Ausarbeitung der Spezifikation waren alle Teilnehmer des Vorhabens beteiligt. Die fertig ausgearbeitete Spezifikation wurde noch einmal möglichen Nutzern zugeschickt, um abschließend noch offene praxisrelevante Anregungen mit berücksichtigen zu können.

Zusammenfassung der Spezifikation

Die endgültige Form der Spezifikation gliedert sich in zehn Kapitel.

Die **Einleitung** beschreibt das Projektziel.

Unter **Allgemeines** wird das System aus Hard- und Software erklärt. Es wird auf bereits vorhandene Softwaremodule hingewiesen, die den Kern des Systems bilden. Die Kompatibilität zu verschiedener Hardware und die Nutzung des Satellitenpositionierungsdienstes der deutschen Landesvermessung (SAPOS) wird gefordert. Der Systemaufbau ist im Schema skizziert und das Stufenkonzept des Integrationsmoduls wird erläutert.

Kapitel 3 beschreibt die zu Grunde liegenden **Bezugssysteme** der Koordinaten und der Zeit.

Danach wird auf die angestrebte **Genauigkeit der Positions- und Lagebestimmung** und die **Genauigkeit der Zeitzuordnung** eingegangen. Es wird unterschieden, ob das GPS verfügbar ist oder nicht. Die Genauigkeit der Zeitzuordnung wird nach Bestimmung von Position, bzw. Lage, getrennt.

Datenschnittstellen, Datenrate und **Datenalter** sind in den folgenden Kapiteln erläutert. Datenschnittstellen bestehen zu den Korrekturdaten des PDGPS, zu den GPS-Empfängern und zu den INS und anderen Sensoren. Die Schnittstellen sollen möglichst internationalen Standards genügen (z.B.: RINEX, NMEA-0183). Die Häufigkeit, mit der Daten an den verschiedenen Schnittstellen anliegen ist in hohem Maße von der eingesetzten Hardware abhängig. Gleiches gilt für das Datenalter, wobei das System die Prädiktion für ein Datenalter von 0 Sekunden ermöglichen soll.

Das System soll eine umfassende **Dokumentation** haben. Die Beschreibung der **Nutzeroberfläche** zur Kommunikation des Nutzers mit dem System schließt die Spezifikation ab.

Befragung potentieller Nutzer des Systems zur Spezifikation

Im Rahmen der Versendung der Spezifikation wurden 38 Adressaten angeschrieben, mit der Bitte, die Spezifikation kritisch im Hinblick auf praxisrelevante Anforderungen zu prüfen. Von den Angeschriebenen wurden von fünf Stellen weitere Anregungen eingebracht, die soweit es möglich und sinnvoll war, bei der Entwicklung des Systems umgesetzt wurden.

Die Gestaltung der Software sollte sich an allgemeine Standards der Informatik orientieren. Die Oberflächen sollten dem gebräuchlichen Layout von MICROSOFT WINDOWS angeglichen sein und Hilfetexte als Hyperlinktextsysteme erhältlich sein. Schnittstellen sollten kompatibel zu in der WSV existierenden Programmen (z.B. TIMPAN) oder Datenformaten (WSV-Punktformat) sein.

Die Überbrückung von Datenlücken des GPS mit INS ist nach Erfahrungen einiger Nutzer sehr schwierig zu realisieren. Andere Verfahren, wie die Nutzung von bestehenden Hyperbelnavigationsverfahren wie LORAN-C und die Berücksichtigung von Schiffs- und Umweltparametern in den Algorithmen der Positionsberechnung könnten die Überbrückung der Datenlücken unterstützen. Wenn man sich auf die Überbrückung der Höhenkomponente beschränken würde, wäre eine Realisierung mit hochgenauen Beschleunigungsmessern möglich.

Die Einbindung weiterer GPS-Empfängertypen wird gewünscht. Insbesondere Empfänger der Firmen NovAtel Inc., Calgary, Kanada, und Dassault-Sercel NP, Carquefou Cedex, Frankreich sollten vom System unterstützt werden.

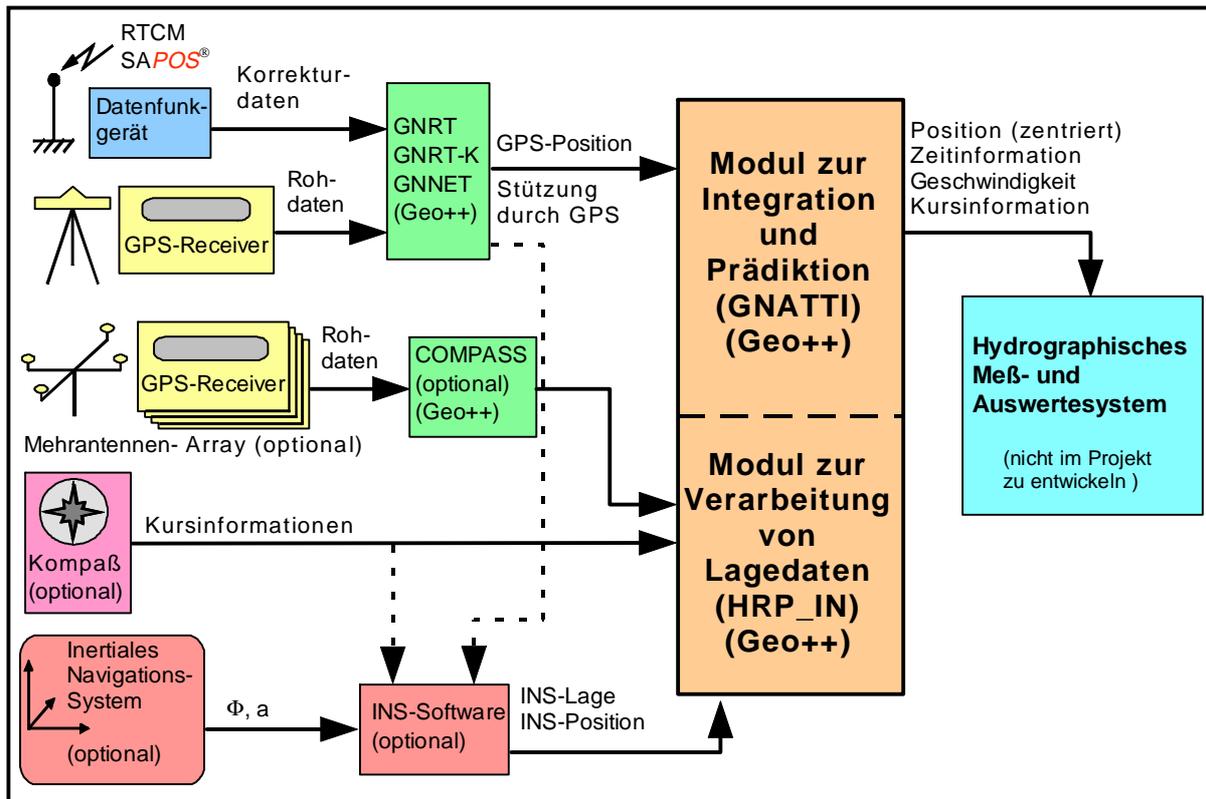


Abbildung 4.1: Konfiguration des Systems

4.2 Systemaufbau

Das Meß- und Auswertesystem besteht in seinem Kern aus einem umfassenden Softwarepaket zur echtzeitfähigen Auswertung von relativen GPS Code- und Trägerphasenmessungen mit „On-The-Way (OTW)“-Mehrdeutigkeitslösungen für die präzise dreidimensionale Positionsbestimmung und hochgenaue Zeitzuordnung. Dieses Modul basiert auf dem Programmpaket GNRT der Firma Geo++ GmbH.

Die hochgenauen dreidimensionalen Positionsdaten sowie die optionalen Lageinformationen (Kurs, Rollen, Stampfen) werden in Echtzeit über definierte Schnittstellen für die gewünschte Nutzung zur Verfügung gestellt.

Die Verbindung von Positions- und Lagedaten geschieht in einem Modul zur Integration, Stützung und Prädiktion (siehe Abbildung 4.1). Dieses Modul ermöglicht die dreidimensionale Zentrierung von GPS-Antennenpositionen auf beliebige Punkte der bewegten Plattform und die Überbrückung von GPS-Positionsdatenlücken, wenn Positionsinformationen von einem alternativen Positionierungssystem vorliegen. Die Stützung von INS durch GPS-Daten, soweit geeignete INS eingesetzt werden, ist ebenfalls möglich.

Als Zentrierung wird die Reduktion der GPS-Antennenposition auf einen oder mehrere definierte Meßpunkte der bewegten Plattform bezeichnet, so zum Beispiel auf den Schwinger der Lotungsanlage zur Höhenbeschickung von Tiefenmessungen.

Die Entwicklung des Software-Modules, das die Integration von Positions- und Lagedaten vornehmen soll, wurde in fünf Stufen unterteilt. Abbildung 4.2 verdeutlicht den stufenhaften Aufbau.

Die erste Stufe beinhaltet nur die hochpräzise Echtzeit-Position der GPS-Antenne, und ist mit der Software GNRT realisiert.

Die zweite Stufe ermöglicht die Zentrierung der GPS-Antennenposition in der horizontalen Komponente mit Hilfe des GPS-Kurses (Kurs über Grund) oder über einen Kurssensor (z.B. einen elektronischen Kompaß). Die Daten des Kurssensors werden über eine NMEA (National Marine Electronics Association)-Schnittstelle übertragen.

Die dritte Stufe ermöglicht die dreidimensionale Zentrierung, die entweder über ein GPS-Lagemesssystem (z.B. COMPASS von Geo++) oder ein INS-Lagemesssystem mit zusätzlichem elektronischen Kompaß realisiert wird.

Die vierte Stufe ermöglicht es, durch ein INS eventuelle GPS-Positionsdatenlücken zu überbrücken. Zusätzlich beinhaltet sie die Stützung des INS durch die GPS-Position, soweit geeignete INS vorhanden sind.

Die fünfte Stufe betrifft die komplette Integration von GPS und INS mit beiderseitiger Stützung der Systeme. Die höhere INS-Datenrate kann zur Positionsinterpolation genutzt werden. Diese fünfte Stufe war nicht Projektziel und wird nur der Vollständigkeit halber genannt.

4.3 Beschreibung der Nutzeroberfläche

Der modulare Aufbau des Systems spiegelt sich auch in der Benutzeroberfläche wider. Jedem Aufgabenbereich ist ein Programmmodul zugeordnet, welches seine spezifische Aufgabe optimal erfüllt und mit anderen Modulen über definierte Schnittstellen kommuniziert.

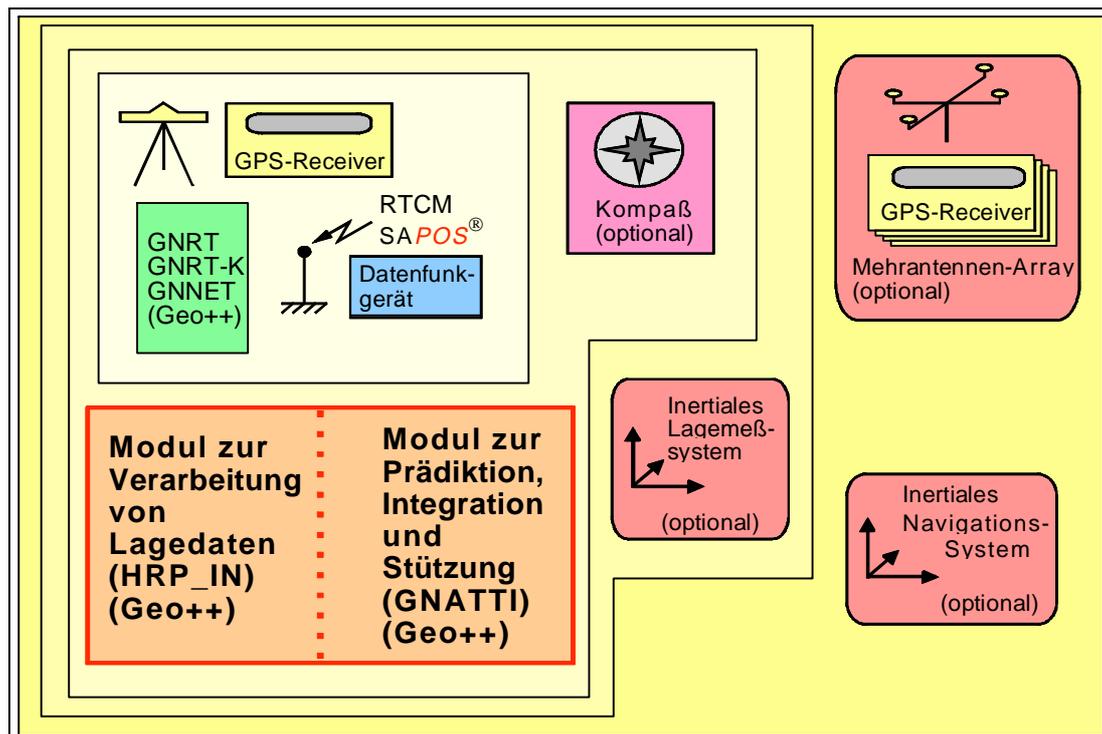


Abbildung 4.2: Stufenhafter Aufbau des Meß- und Auswertesystems

Kommunikationsschnittstellen

Bevor der Systemaufbau und die Einzelkomponenten näher erläutert werden, sollen zunächst die Kommunikationsschnittstellen vorgestellt werden.

Wo eine Kommunikation nach außen mit externen Anwendungen sinnvoll ist, werden international anerkannte Schnittstellenformate verwendet oder es werden die Schnittstellen dokumentiert (vergleiche Spezifikation des Systems, Kapitel 4.1). Die Schnittstellen, die nur der programminternen Kommunikation dienen, sind vor dem Benutzer verborgen. Sie werden durch die vom Betriebssystem bereitgestellten Mechanismen wie Shared Memory, Pipes, Messages u.ä. realisiert. Die Identifikation der Schnittstellen erfolgt über eindeutige Bezeichner, die dem Benutzer z.B. über graphische Auswahlfenster präsentiert werden (siehe Abbildung 4.3).

Allgemeiner Systemaufbau

Die einzelnen Programmmodule und Ihre Beziehungen untereinander lassen sich anhand einer Grafik aufzeigen (siehe Abbildung 4.4).

Die Basis des System stellt das GNRT/GNRT-K Paket dar. Es verarbeitet lokale GPS-Beobachtungen einer an Bord montierten GPS-Antenne und berechnet daraus mit Hilfe von RTCM-Korrekturdaten aktuelle DGPS-Positionen. Die Koordinaten der GPS-Codelösung (SOL_1) wie auch der Trägerphasenlösung (SOL_2) werden in einer internen SOL-Schnittstelle für die weitere Verarbeitung bereitgestellt. Mit SOL_2 steht bereits eine einfache GPS-Lösung gemäß der ersten Ausbaustufe des in der Spezifikation beschriebenen Stufenkonzeptes bereit (siehe Kapitel 4.2).

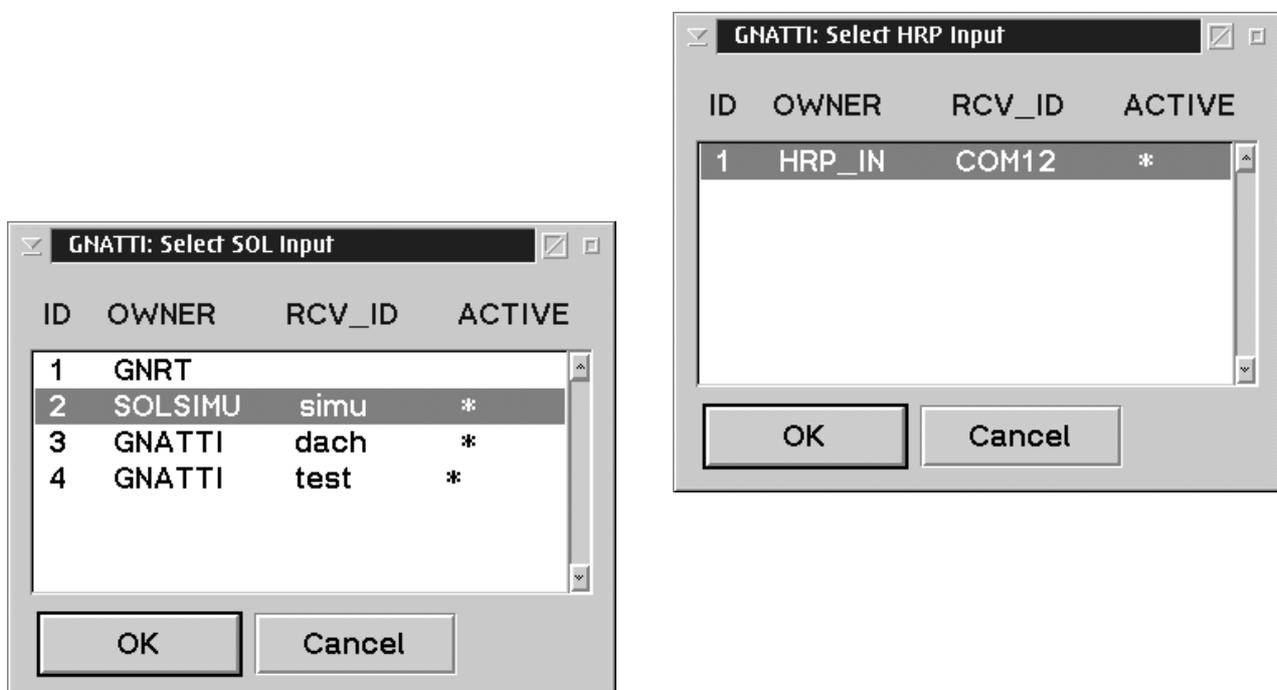


Abbildung 4.3: Auswahlfenster zur *SOL*- bzw. *HRP*-Schnittstelle im Programmmodul GNATTI, mit der eine Koordinatenlösung (links) bzw. ein Sensor-Input für Kurs-/Roll-/Stampfwinkel (rechts) ausgewählt werden kann. Über *Owner* und *Rcv_Id* sind die verschiedenen Datenquellen eindeutig zu identifizieren. Derartige Auswahlfenster stehen in allen Programmmodulen zur Verfügung, in denen eine Schnittstelle bestimmt werden muß.

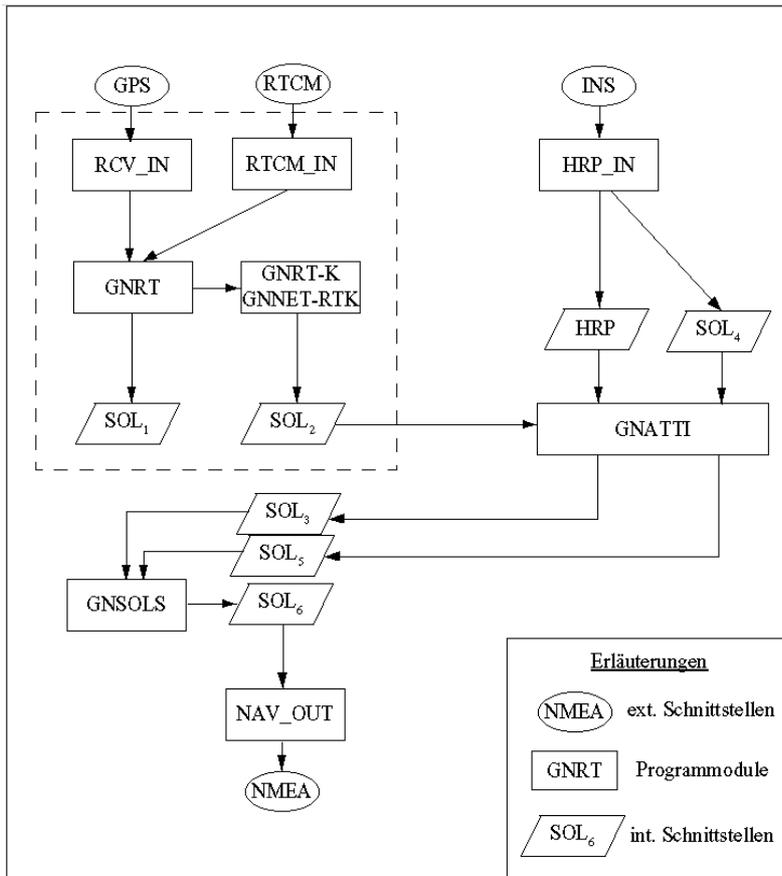


Abbildung 4.4: Programmmodule und Kommunikationsbeziehungen. Dargestellt ist eine exemplarische Möglichkeit zur Systemkonfiguration. Je nach Anwendung und zur Verfügung stehenden Sensoren sind viele andere Konfigurationen realisierbar. Erläuterungen im Text.

realisierenden Verbindungen in o.a. Abbildung nicht eingetragen.

Je nach Sensortyp können neben einer oder mehreren Lagedaten auch aktuelle Positionen geliefert werden. Diese werden vom Programmmodul HRP_IN in einer eigenen SOL-Schnittstelle (SOL₄) abgelegt und können ebenfalls von GNATTI auf andere Stationen an Bord transformiert werden (SOL₅). Damit stehen für diese Station zwei unabhängige Positionsbestimmungen vor, die sich hinsichtlich Genauigkeit und Verfügbarkeit unterscheiden. In der Regel ist die GPS-Lösung (SOL₃) genauer, sie steht aber nicht immer zur Verfügung. Eine INS-Lösung (SOL₅) ist meist weniger genau, kann aber prinzipiell zumindest kurzzeitig auch dann noch Daten liefern, wenn eine GPS-Lösung ausgefallen ist. Das Programmmodul GNSOLS wird daher eingesetzt, um automatisch die jeweils optimale der zur Verfügung stehenden Lösungen zu finden und für die weitere Verarbeitung bereitzustellen (SOL₆).

Eine Formatierung und Ausgabe der Lösung erfolgt durch das Programmmodul NAV_OUT.

Die einzelnen Programmmodule werden im folgenden näher erläutert.

Steht zusätzlich ein Lagebestimmungssystem, z.B. ein Inertialsensor INS oder Geo++[®] COMPASS zur Verfügung, so können dessen Daten (Orientierungswinkel Kurs-, Roll- und Stampfwinkel) über das Modul HRP_IN eingelesen und für die weitere Verarbeitung im System in einer HRP-Schnittstelle verfügbar gemacht werden. Die Orientierungswinkel werden vom Programmmodul GNATTI benötigt, um die Positionen der GPS-Antenne (SOL₂) auf beliebige andere Stationen an Bord der Plattform (SOL₃) zu transformieren.

Einige INS benötigen eine regelmäßige Stützung durch GPS. Diese Stützung kann auf jeder der Lösungen SOL₁, SOL₂ oder SOL₃ aufbauen, je nachdem wie genau die Lösung sein soll und ob eine Transformation auf den INS-Standort vom INS selbst erledigt werden kann oder durch GNATTI erfolgen muß. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die dafür zu

Programmpaket GNRT/GNRT-K

Das Programmpaket GNRT/GNRT-K ist die Basis des gesamten Systems. Es enthält standardmäßig die erforderlichen Module zur Anbindung eines GPS-Empfängers und einer RTCM-Korrekturdatenquelle (Funk, GSM oder andere Kanäle). Der Nutzer kann sich den aktuellen Zustand der Eingangsdaten-Schnittstellen in entsprechenden Statusfenstern graphisch anzeigen lassen (Abbildung 4.5 und Abbildung 4.6).

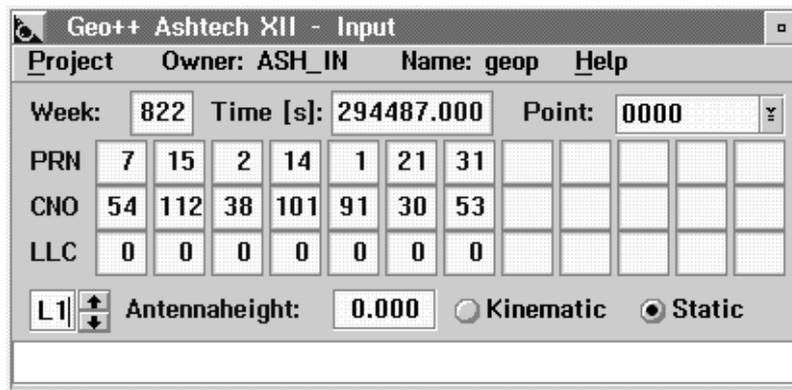


Abbildung 4.5: Statusfenster des GPS-Empfängermoduls (Beispiel für Ashtech-Empfänger). Über das Menü können bei Bedarf empängerspezifische Einstellungen vorgenommen (z.B. Datenrate etc.) oder ein Logging im RINEX- oder Rohdatenformat aktiviert werden.

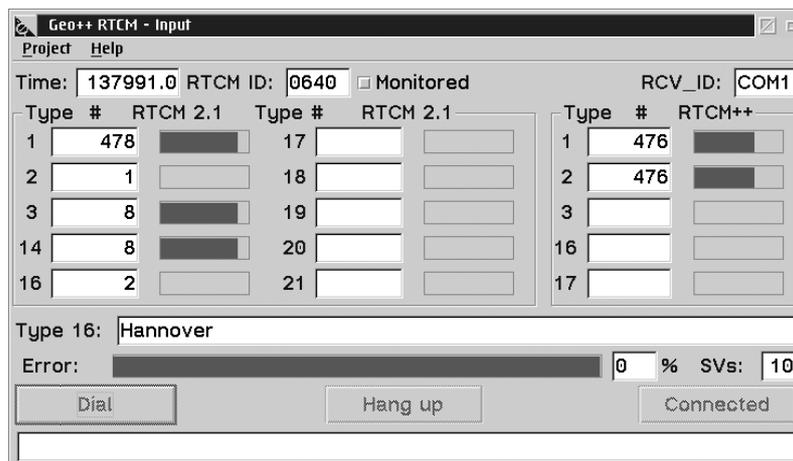


Abbildung 4.6: Statusfenster des RTCM_IN Moduls. Neben den laufend eintreffenden RTCM-Message-Typen wird die aktuelle Fehlerrate des Eingangssignals angezeigt, so daß die Signalqualität des Funkempfangs jederzeit überprüft werden kann.

Im nächsten Schritt wird durch das Kernmodul GNRT eine DGPS-Code-Lösung berechnet. Diese hat, abhängig von der Qualität des GPS-Empfängers und der Korrekturdaten, typischerweise eine Genauigkeit von etwa einem halben bis zu wenigen Metern. Das Modul GNRT arbeitet vollständig

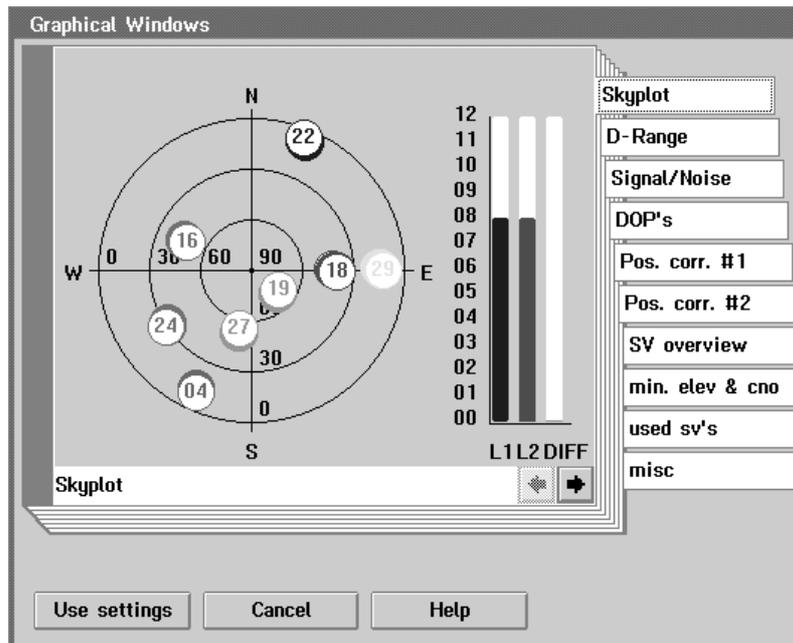


Abbildung 4.7: Skyplot zur Satellitenkonstellation

im Hintergrund und hat kein eigenes Statusfenster. Der aktuelle Bearbeitungszustand kann jedoch

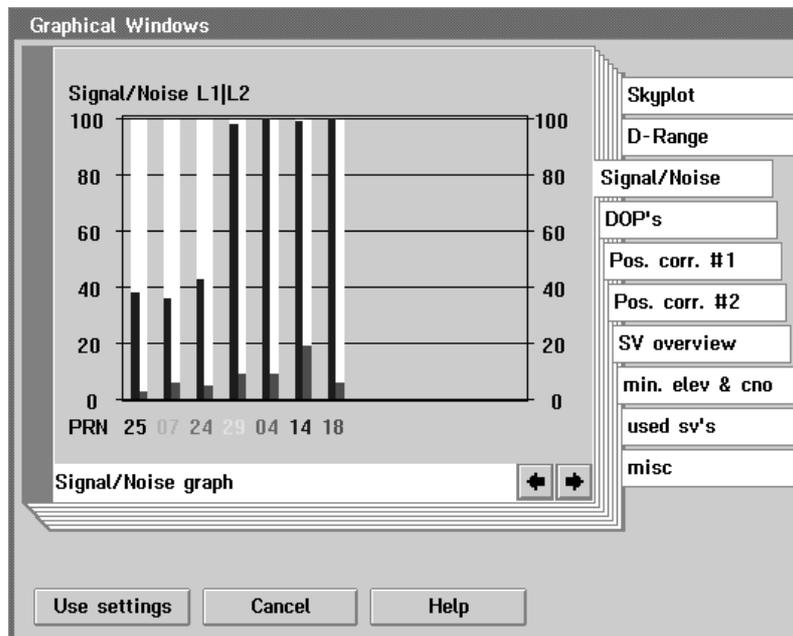


Abbildung 4.8: Signalqualität der einzelnen Satellitenkanäle

über Hilfsprogramme wie z.B. STAGRA jederzeit visualisiert werden, indem z.B. Satellitenkonstellation (Abbildung 4.7), Signalqualität (Abbildung 4.8), PDOP, Entfernungsfehler, Positionsfehler etc. numerisch oder graphisch angezeigt werden.

Parallel zur DGPS-Lösung von GNRT wird durch das Programmmodul GNRT-K eine Trägerphasenlösung (PDGPS) berechnet. GNRT-K verarbeitet immer nur eine Mobilstation und eine Referenzstation und ist damit funktional äquivalent zu den RTK-Lösungen anderer GPS-Anbieter. Hinsichtlich der verwendeten Modelle (z.B. Ionosphäre) und Algorithmen (z.B. zur Mehrdeutigkeitssuche) ist GNRT-K jedoch erheblich weiterentwickelt, so daß auch größere Entfernungen überbrückt

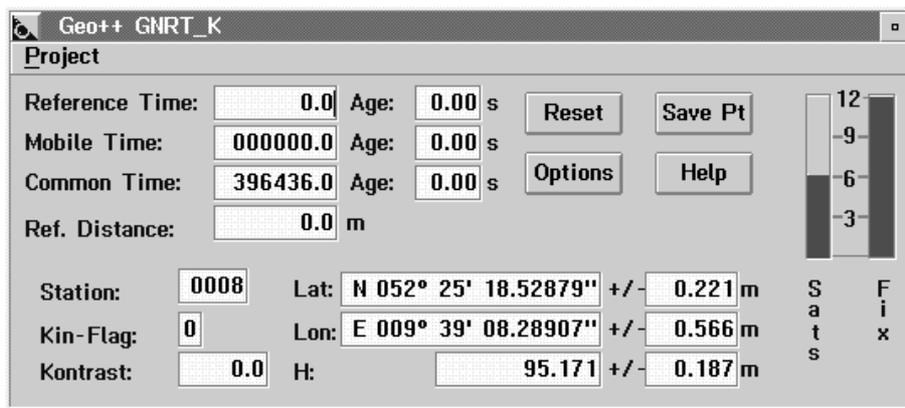


Abbildung 4.9: Statusfenster zur Trägerphasenlösung mit GNRT-K

werden können, was insbesondere im Zusammenhang mit Referenzstationsdiensten wie SAPOS von Bedeutung ist.

Die wesentlichen Zustandsgrößen der Lösung (gefixte Satelliten, Genauigkeit, Datenalter) werden in einem Statusfenster angezeigt (Abbildung 4.9).

Programmmodul GNNET-RTK

Durch das Programmmodul GNNET-RTK wird die Beschränkung von GNRT-K auf eine Mobil- und eine Basisstation aufgehoben. GNNET-RTK erlaubt eine Multistationslösung in Echtzeit. Die Modelle und Algorithmen in GNNET-RTK sind gegenüber GNRT-K nochmals weiterentwickelt worden. Es können beliebige Kombinationen von Referenz- und Mobilstationen verarbeitet werden. In seiner Grundkonfiguration kann GNNET-RTK das Modul GNRT-K daher vollständig ersetzen.

Anwendungsmöglichkeiten für GNNET-RTK sind insbesondere die Steigerung der Genauigkeit und die Verbesserung der Korrekturdatenverfügbarkeit durch gleichzeitigen Empfang von mehreren Referenzstationen, oder die Optimierung der lokalen GPS-Empfangsbedingungen durch Verwendung mehrerer GPS-Antennen an Bord.

Die aktuellen Zustandsgrößen von GNNET-RTK werden in einer Reihe von Fenstern angezeigt. Für den Benutzer wichtig ist die Qualität der Lösung (Abbildung 4.10).

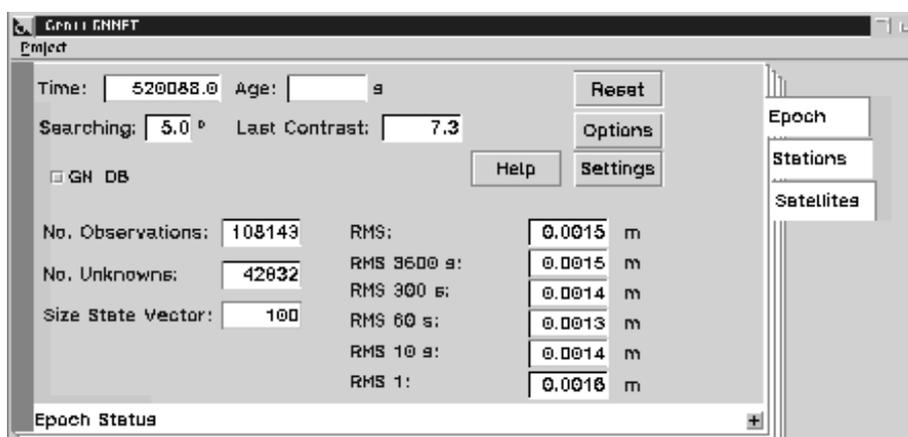


Abbildung 4.10: Statusfenster von GNNET-RTK. Über die Register am rechten Rand gelangt man zu weiteren stations- oder satellitenbezogenen Informationen.

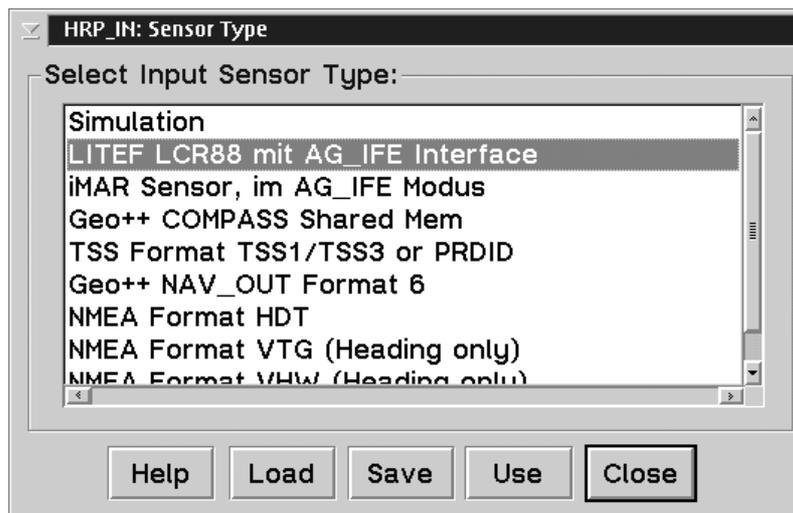


Abbildung 4.11: Auswahl des Sensor-Typs über ein Auswahl-Fenster

Programmmodul HRP_IN

Verschiedene Sensoren für den Kurswinkel oder für Roll- und Stampfwinkel können über das Modul HRP_IN angeschlossen werden. Die Auswahl des verwendeten Sensortyps kann anhand einer Auswahlliste (siehe Abbildung 4.11) oder durch Vorgabe einer entsprechenden Option beim Programmstart erfolgen.

Verschiedene Sensoren für den Kurswinkel oder für Roll- und Stampfwinkel können über das Modul HRP_IN angeschlossen werden. Die Auswahl des verwendeten Sensortyps kann anhand einer Auswahlliste (siehe Abbildung 4.11) oder durch Vorgabe einer entsprechenden Option beim Programmstart erfolgen.

Die meisten Sensoren werden über eine serielle Schnittstelle mit dem Verarbeitungsrechner verbunden. Das Kommunikationsprotokoll basiert dementsprechend auf RS232 (siehe Abbildung 4.12).

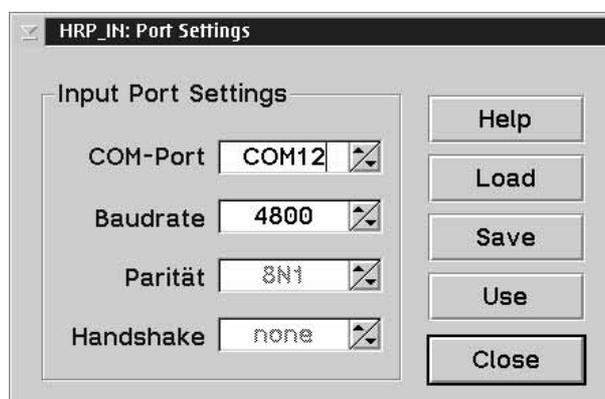


Abbildung 4.12: Einstellungen zum Kommunikationsprotokoll RS232

Die Dateninhalte sind je nach Sensor entweder in NMEA-Standardformaten oder in

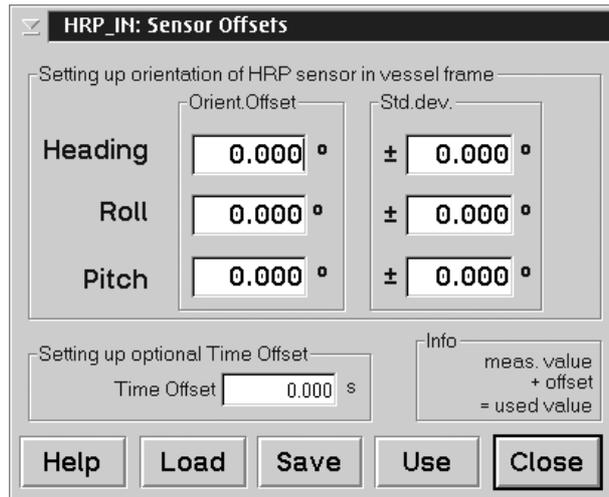


Abbildung 4.13: Berücksichtigung der inneren Orientierung eines Sensors gegenüber dem Schiffssystem

sensorspezifischen, herstellereigenen Formaten verpackt. Daneben ist auch die Kommunikation über rechnerinterne Schnittstellen (z.B. Pipes) möglich, wenn die Daten bereits im selben Rechner oder innerhalb eines Rechnernetzes zur Verfügung stehen. Insbesondere zum Lagebestimmungssystem COMPASS der Firma Geo++ GmbH besteht eine direkte Schnittstelle über Shared Memory.

Wichtig für die korrekte Einbindung eines externen Sensors ist die Berücksichtigung der inneren Orientierung des Sensors gegenüber dem Schiffssystem, da im Regelfall die Achsen des Sensors nicht parallel zu den Achsen des Schiffssystems eingerichtet werden können. HRP_IN erlaubt deshalb die Eingabe entsprechender Offsets in den drei Orientierungswinkeln (siehe Abbildung 4.13).

Neben den Offsets der Orientierungswinkel kann auch deren Standardabweichung angegeben werden, die später bei der Genauigkeitsberechnung der zentrierten Position (SOL₃, GNATTI) berücksichtigt und ausgegeben wird. Um eine eventuelle Abweichung in der Zeitskala des Sensor-Systems zu kompensieren, kann in HRP_IN auch ein Zeit-Offset für die Eingangsdaten berücksichtigt werden.

Über ein Optionen-Fenster läßt sich zur Laufzeit das Verhalten des Programms beeinflussen (siehe

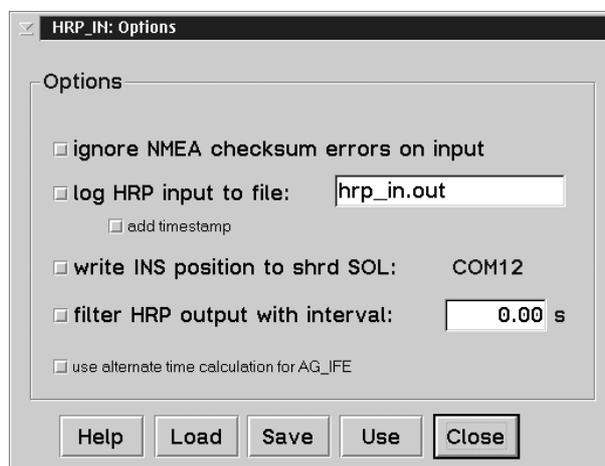


Abbildung 4.14: Optionen-Fenster von HRP_IN

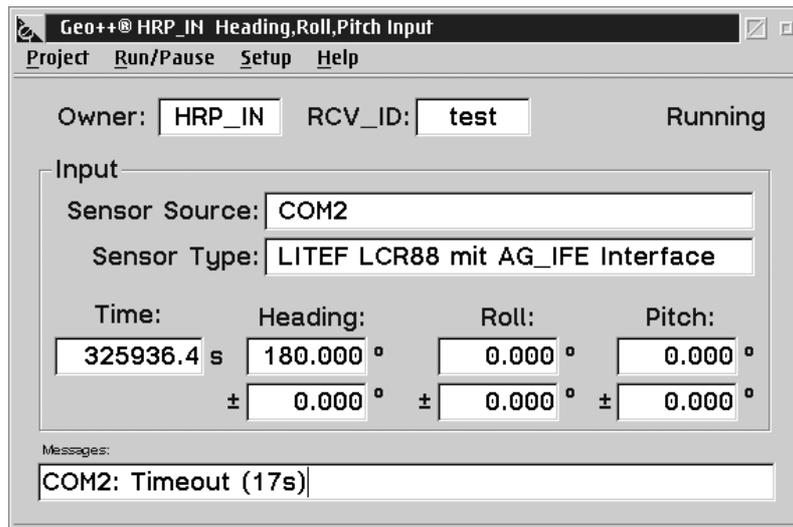


Abbildung 4.15: Statusfenster von HRP_IN. Eventuelle Fehlfunktionen werden über eine Statuszeile am unteren Fensterrand gemeldet.

Abbildung 4.14). Hier kann z.B. eine Protokollierung aller Eingangsdaten des Sensors aktiviert werden. Bei Inertial-Sensoren, die auch Positionsinformationen liefern können, kann die Position über eine SOL-Schnittstelle (siehe oben) anderen Programmen innerhalb des Systems verfügbar gemacht werden. Dies ist z.B. erforderlich, wenn GPS-Datenlücken kurzzeitig mit INS-Positionen überbrückt werden sollen.

Während des normalen Programmablaufs ist keine interaktive Bedienung erforderlich. Zur Information des Nutzers werden die Kenngrößen zusammen mit den aktuellen Meßwerten des Sensors dargestellt (siehe Abbildung 4.15).

Programmmodul GNATTI

Das Programmmodul GNATTI verknüpft die Daten von Lagesensoren mit den Positionsinformationen des GPS-Systems. Insbesondere ist GNATTI damit in der Lage, die GPS-Position auf beliebige Punkte auf dem bewegten Schiff zu übertragen. Voraussetzung ist, daß die Einmessung der Punkte im Schiffskoordinatensystem bekannt ist.

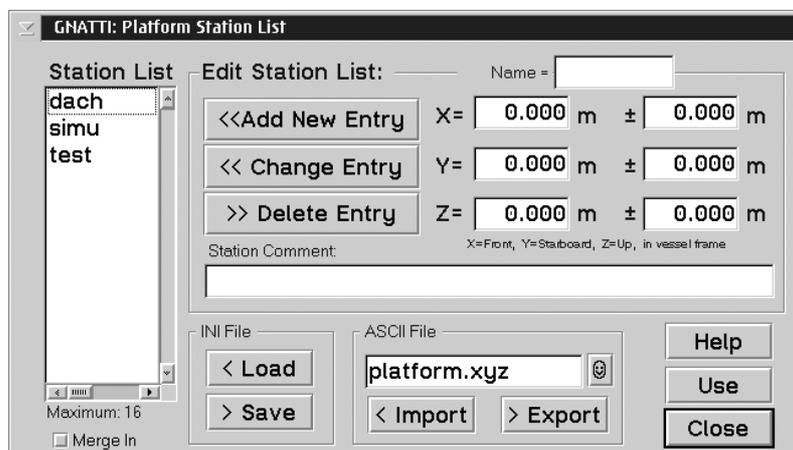


Abbildung 4.16: Fensterdialog zum Bearbeiten der Punktliste in GNATTI

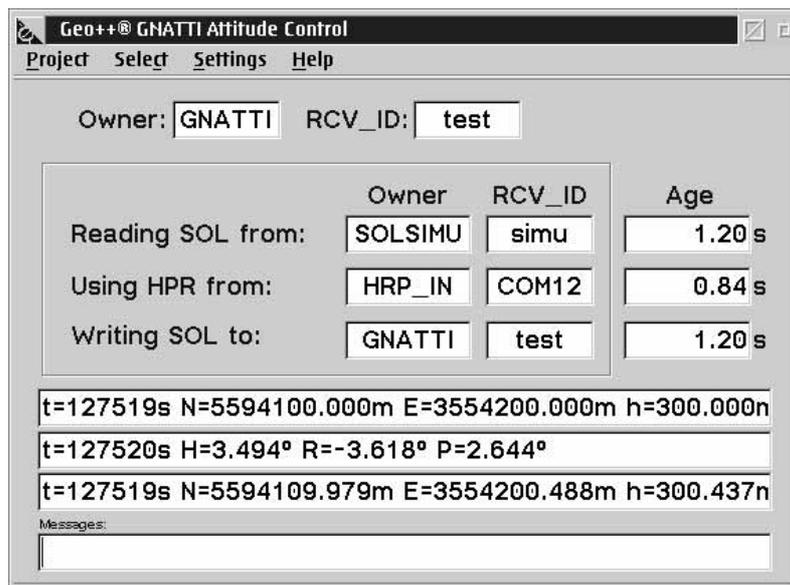


Abbildung 4.17: Statusfenster von GNATTI. Eventuelle Fehlerzustände werden am unteren Fensterrand in einer Statuszeile gemeldet.

GNATTI führt intern eine Liste der Stationen, auf die die GPS-Position zu übertragen ist. Das Programm bietet über einen Fensterdialog die Möglichkeit, diese Liste zu bearbeiten und zu erweitern (siehe Abbildung 4.16).

Neben den kartesischen Koordinaten XYZ im Schiffssystem werden auch deren Standardabweichungen für eine Genauigkeitsberechnung der Ergebnisse herangezogen. Die Liste kann im ASCII Format exportiert und wieder importiert werden, so daß eine externe Bearbeitung der Liste möglich ist. Über weitere Fenster läßt sich das Programmverhalten an besondere Betriebszustände anpassen. In der Regel ist hier jedoch kein Eingriff durch den Benutzer nötig.

Während des normalen Programmbetriebs ist keine interaktive Bedienung des Programms GNATTI erforderlich. Das Programm stellt für Kontrollzwecke kontinuierlich die Kenngrößen und die aktuellen Werte der Eingangsdaten dar (siehe Abbildung 4.17).

Die von GNATTI erzeugten Koordinaten aller transformierten Plattformpunkte stehen im Programmsystem über die SOL-Schnittstelle zur Verfügung.

Programmmodul GNSOLS

Das Programmmodul GNSOLS bietet die Möglichkeit, Koordinaten aus unterschiedlichen Quellen derart zu vereinigen, daß Datenlücken in der einen Quelle durch Koordinaten aus einer zweiten Quelle aufgefüllt werden. Dies ist zum Beispiel nützlich, wenn bei Verlust einer GPS-Lösung ersatzweise eine INS-Lösung verwendet werden soll. Ein anderes Beispiel ist die Verwendung der zwar ungenaueren, aber sicheren GPS-Code-Lösung nach Verlust der hochgenauen GPS-Trägerphasenlösung.

GNSOLS setzt auf SOL-Schnittstellen der Quellen auf und stellt seinerseits die resultierenden Koordinaten wieder über eine SOL-Schnittstelle zur Verfügung.

Programmmodul NAV_OUT

Das Programmmodul NAV_OUT macht die SOL-Schnittstelle für Nutzer nach außen verfügbar. NAV_OUT liest aktuelle Koordinaten (und ggf. Geschwindigkeiten) aus einer SOL-Schnittstelle aus und schreibt sie auf eine der folgenden möglichen Ausgabekanäle:

- Bildschirm,
- Datei und
- serielle Schnittstelle.

Der Umfang der ausgegebenen Daten und das Ausgabeformat kann dabei vom Nutzer vorgegeben werden.

Programmmodul GNMAIN

Alle Programmmodule des Systems können durch das Programm GNMAIN in ein gemeinsames Fenster integriert werden. Die einzelnen Fenster sind dabei hintereinander wie in einem Notizblock angeordnet. Zwischen den einzelnen Modulen kann durch Mausklick auf am Rand angeordnete symbolische Registerzungen umgeschaltet werden. Jedes Programmmodul hat seinen Platz in einer vorgegebenen Sektion (Eingabe, Verarbeitung, Ausgabe) und kann so leicht identifiziert und wiedergefunden werden.

GNMAIN zeigt die wichtigsten Zustandsgrößen des GPS-Systems (gefixte Satelliten, Korrekturdaten-Fehlerrate) in einem jederzeit sichtbaren Teil des Fensters an, so daß im täglichen Gebrauch auch für einen einfachen Bediener die wichtigen Informationen durch einen einzigen Blick erfaßt werden können.

Stapelverarbeitung

Für den Einsatz mit immer wiederkehrender Charakteristik lassen sich die verschiedenen Programme zu sogenannten Batch-Jobs zusammenfassen, in der der einzelnen Programmmodule nacheinander gestartet werden. Die spezifischen Einstellungen zu jedem Programm können als Kommandozeilenparameter zu jedem Programmmodul angegeben werden, so daß eine interaktive Einstellung nicht mehr erforderlich ist. Andererseits lassen sich viele Programmparameter auch während der Laufzeit interaktiv verändern und abspeichern, so daß sie beim nächsten Programmstart automatisch verwendet werden.

Durch diese Maßnahmen wird eine Stapelverarbeitung ermöglicht, die besonders für einen automatischen Betrieb geeignet ist. So kann das System z.B. automatisch beim Einschalten in einer betriebsbereiten Konfiguration gestartet werden.

5 Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Schnelligkeit der GPS-Positionsbestimmung

Ein wesentlicher Schwerpunkt des Vorhabens bestand darin, die Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Schnelligkeit der GPS-Positionsbestimmung zu untersuchen. Die Leistung der Positionsbestimmung mit GPS in Echtzeit ist abhängig von der Verfügbarkeit der Satelliten, von Störeinflüssen auf die Satellitensignale, aber auch von den Eigenschaften der Korrekturdatenübertragung.

Aus dem BMBF-Vorhaben „Präzise GPS-gestützte Höhenzuordnung für kontinuierliche Lotungsmessungen auf Gewässern“ (Förderungskennzeichen MTK 0551) ist bekannt, daß in einzelnen Fällen eine falsche Mehrdeutigkeitsfestsetzung möglich ist. Desweiteren sind entfernungsabhängige Fehleranteile nachgewiesen worden. Durch die Einbeziehung der Daten mehrerer Referenzstationen konnte die Sicherheit der Mehrdeutigkeitslösung in den genannten Untersuchungen gesteigert werden. Diese Untersuchungsergebnisse führen zum Ansatz der Vernetzung von Referenzstationen in Echtzeit.

5.1 Genauigkeit

Die Genauigkeit der kinematischen Positionsbestimmung mit GPS läßt sich nur schwer ermitteln, da die Trajektorie der Antennenbewegung selten mit einer den GPS-Möglichkeiten entsprechenden Genauigkeit unabhängig vermessen werden kann. Es bietet sich somit ein Vergleich zwischen Echtzeit- und Postprocessing-Lösung an.

Die Genauigkeit der Positionierung mit GPS wird im wesentlichen durch die in Tabelle 5.1 genannten Fehlereinflüsse eingeschränkt.

GPS-Fehlerhaushalt für relative GPS-Verfahren					
Bahnfehler	Ionosphäre	Troposphäre	Multipath	Phasenzentrumsvariationen	Empfänger-rauschen
0,1-0,5 ppm (ohne SA)	0,1-50 ppm (L1)	mm-cm (Zenit)	mm-dm	mm-cm	mm
0,5-5 ppm (SA)	0-0,2 ppm (L1/L2)	mm-dm (Horizont)			

Tabelle 5.1 Wesentliche Fehlereinflüsse für relative GPS-Verfahren

Die in der Tabelle 5.1 grau unterlegten Einflüsse Bahnfehler, Ionosphäre und Troposphäre sind abhängig von der Entfernung zur Referenzstation und wirken auf jede gemessene Satellitenstrecke. Es können entfernungsabhängige Fehleranteile von mehr als 5 ppm bei Zweifrequenz- und bis zu 50 ppm bei Einfrequenzempfängern auftreten. Mehrwegeeffekte (Multipath) lassen sich durch neue Antennentechnologien und den Meßaufbau einschränken. In statischen Anwendungen wirken sich Multipatheinflüsse systematisch aus, während sich der Multipatheinfluß bei bewegten Antennen stetig verändert und somit zu einer Erhöhung des Meßrauschens führt. Multipath ist in kinematischen Anwendungen nur schwer detektierbar. Einen Ansatz zur Bestimmung von Phasenzentrumsvariationen beschreiben *Wübbena et al. (1996a)*. Dieser ist für kinematische Anwendungen zunächst aber noch nicht anwendbar.

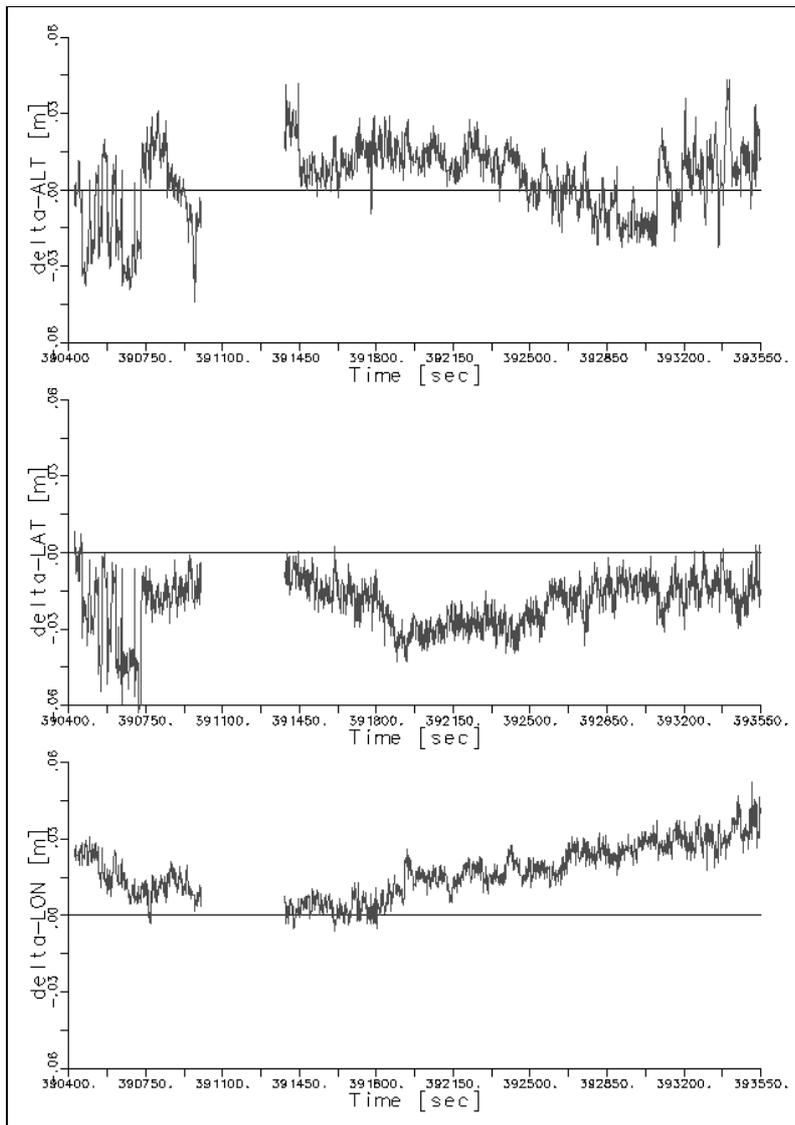


Abbildung 5.1: Differenzen zwischen Postprocessinglösung und Echtzeitlösung einer Meßfahrt mit VS „Greif“ in [m], WSA Cuxhaven, 26. März 1998

Auf einer Meßfahrt mit dem VS „Greif“ am 26. März 1998 wurde die Positionsbestimmung mit der Echtzeitsoftware GNNET durchgeführt und aufgezeichnet. Die SAPOS-Referenzstation der LGN in Cuxhaven sandte die Korrekturdaten im 2-m-Band. Die Entfernung zur Referenzstation betrug zwischen 10 km und 17 km. Die Abweichungen zwischen Postprocessing-Lösung und Echtzeitlösung sind in Abbildung 5.1 abgebildet. Die Differenzen der einzelnen Komponenten waren stets geringer als 5 cm und erfüllen somit die Genauigkeitsanforderungen.

5.2 Zuverlässigkeit und Schnelligkeit

Die Zuverlässigkeit der Mehrdeutigkeitslösungen läßt sich durch den Nachweis korrekter und fehlerhafter Mehrdeutigkeitsfestsetzungen darlegen. Hierzu wurden mehrere Untersuchungen vorgenommen, die nach einer Festsetzung der Mehrdeutigkeiten (Fixing) diese sofort wieder verwerfen und neu bestimmen. Ein Vergleich mit der Postprocessinglösung ergibt dann, ob diese Lösung korrekt oder falsch festgesetzt wurde.

Die Schnelligkeit der Mehrdeutigkeitslösungen wurde im Verlauf des Vorhabens mehrfach getestet. Hierzu wurde derselbe Ansatz gewählt wie zur Kontrolle der Zuverlässigkeit der Algorithmen. Im allgemeinen sind Mehrdeutigkeitslösungen innerhalb von 1 bis 2 Minuten gegeben. Dies hängt jedoch sehr stark von den Empfangseigenschaften des RTCM-Korrekturdatensignals ab. Störungen können zum Beispiel bei starkem Regen und Hagel auftreten und sind abhängig von der Frequenz des Signals. Der Empfang wird im Binnenbereich oftmals auch durch Abschattungen des Signals behindert. Im Bereich der Küstengewässer ist dagegen selten mit Störungen durch Abschattung zu rechnen, es sei denn die Aufbauten des Schiffes beeinflussen den Empfang. Es kann davon ausgegangen werden, daß bei störungsfreiem Betrieb innerhalb von 20 km stetig Korrekturdaten empfangen werden können.

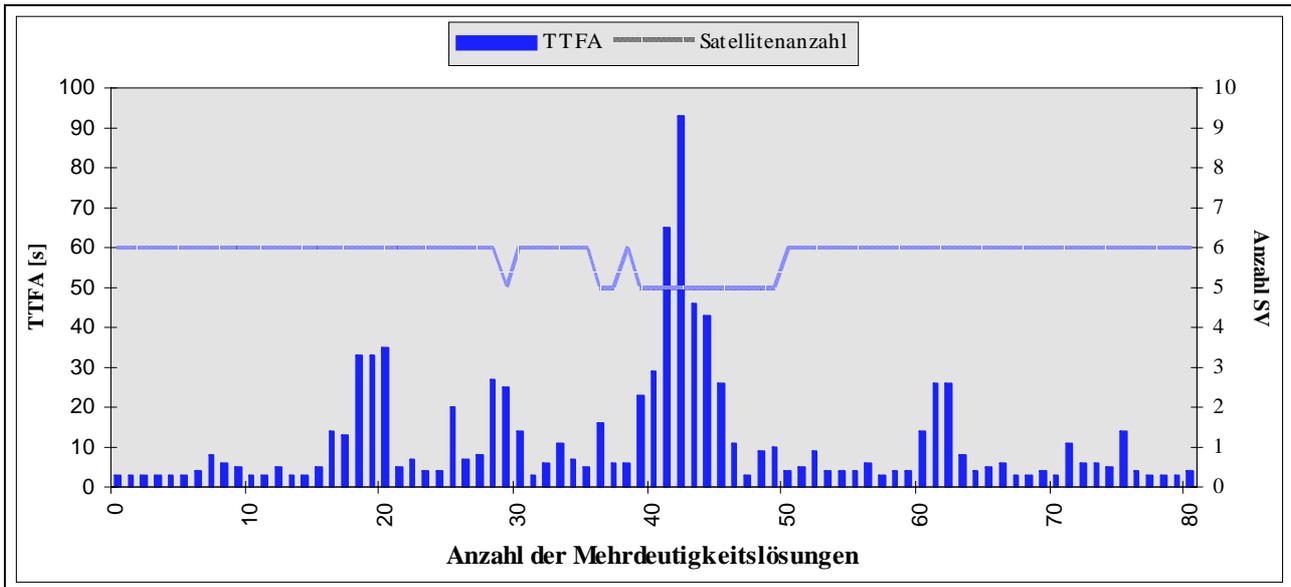


Abbildung 5.2: Dauer der Mehrdeutigkeitsfestsetzung, Testmessung Koblenz, 05. November 1996

Exemplarisch sind hier zwei Testmessungen bei der BfG in Koblenz aufgeführt. Im Herbst 1996 wurde mit der damals aktuellen Version von GNRT-K die Zeitdauer bis zur Festsetzung der Mehrdeutigkeiten getestet. Dabei war die Referenzstation nur wenige Meter entfernt, und die Übertragung der RTCM-Korrekturdaten geschah über ein serielles Datenkabel. Die Abbildung 5.2 zeigt einen Ausschnitt der Ergebnisse. Insgesamt wurden ca. 400 Festsetzungen durchgeführt, und in 97% der Fälle lag die Zeit bis zur Festsetzung unter 60 Sekunden. Bei 15 Festsetzungen war das Ergebnis grob falsch.

Bei einem ähnlichen Test mit der weiterentwickelten GNNET-Software, aber mit einer Referenzstation in etwa 7 km Entfernung und RTCM-Korrekturdatenübertragung über 2-m-Datenfunk, ergab sich das in Abbildung 5.3 dargestellte Ergebnis. Von 55 Festsetzungen waren 98% der Festsetzungen innerhalb von 60 Sekunden möglich. Die Mehrdeutigkeiten wurden zu 100% richtig gelöst.

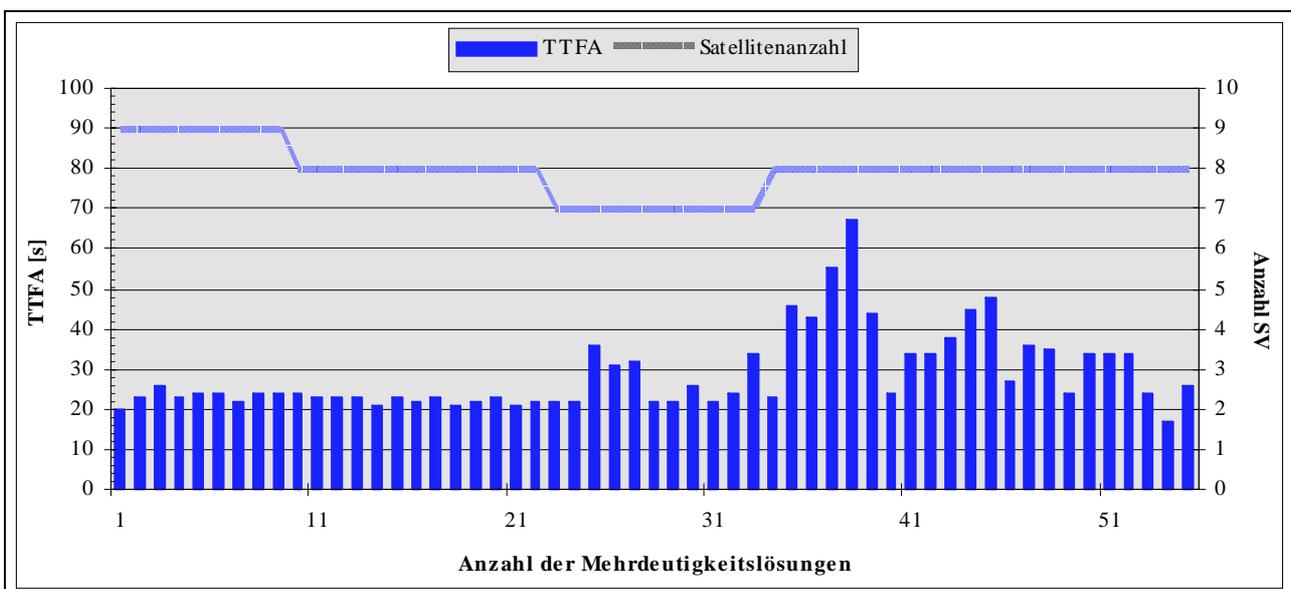


Abbildung 5.3: Dauer der Mehrdeutigkeitsfestsetzung, Testmessung Koblenz, 30. April 1998

Es ist zu erkennen, daß sich Änderungen in der Satellitengeometrie bei GNNET nicht so stark auswirken wie mit der älteren GNRT-K Software. Auch konnte unter schwierigeren äußeren Umständen die Zuverlässigkeit der Mehrdeutigkeitslösung gesteigert werden. Dieser Versuch belegt die Weiterentwicklung des Kernmoduls des Meß- und Auswertesystems im Sinne der postulierten Ziele des Vorhabens.

5.3 Reduzierung entfernungsabhängiger Fehleranteile

Die Verbesserung der Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Schnelligkeit der GPS-Lösungen sind, wie oben erwähnt, ein wesentlicher Bestandteil des Vorhabens. Dies kann zum einen durch verbesserte Algorithmen auf der Mobilstation und zum anderen durch eine Verringerung entfernungsabhängiger Fehleranteile auf Seiten der Referenzstationen erreicht werden.

Ziel der nachfolgend beschriebenen Untersuchungen ist die Reduzierung der entfernungsabhängigen Fehleranteile bei der GPS-Positionierung durch die Vernetzung von permanent messenden Referenzstationen. Netze solcher Referenzstationen können zum Beispiel durch das SAPOS-System realisiert werden. Entsprechende Referenzstationen mit der Möglichkeit zur Vernetzung werden in Niedersachsen, Berlin und Brandenburg von den Landesvermessungsbehörden (*Hankemeier et al., 1998*) betrieben.

Die Leistungsfähigkeit des Vernetzungskonzeptes wurde zu Beginn des Vorhabens im Februar 1996 bei Testmessungen in Hamburg aufgezeigt. Die Firma Geo++ entwickelte daraufhin Verfahren zur Nutzung vernetzter Referenzstationen in Echtzeit. Die weiterentwickelte Software wurde in einer Referenzstationsmasche der LGN (Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen) in der Umgebung von Hannover getestet. Im folgenden werden die Untersuchungsergebnisse dargestellt.

5.3.1 Untersuchungen im Raum Hamburg (Simulation einer Vernetzung)

Durchführung der Messungen

In Zusammenarbeit mit dem ehemaligen Stadtvermessungsamt Hamburg, jetzt Amt für Geoinformation und Vermessung, wurden 25 Punkte in der näheren Umgebung Hamburgs in Echtzeit mit GPS bestimmt. Die auf dem Hochhaus der Baubehörde betriebene Permanentstation sendete im Rahmen des SAPOS-Dienstes RTCM-Daten im 2-m-Band (VHF) über eine Funkeinrichtung auf dem Fernsehurm aus. Die Reichweite der Korrekturdaten betrug mehrere Zehnerkilometer. Die Permanentstation wurde mit der Software GNREF betrieben. Die Beobachtungen wurden im RINEX-Format gespeichert.

Die hochpräzise Positionsberechnung in Echtzeit auf der Mobilstation wurde mit dem Programm GNRT-K durchgeführt. Die Messungen wurden ausschließlich im statischen Modus durchgeführt. Auch hier wurden die Daten im RINEX-Format gespeichert. Es wurde in Entfernungsbereichen von 500 m bis 23 km zur Permanentstation gearbeitet.

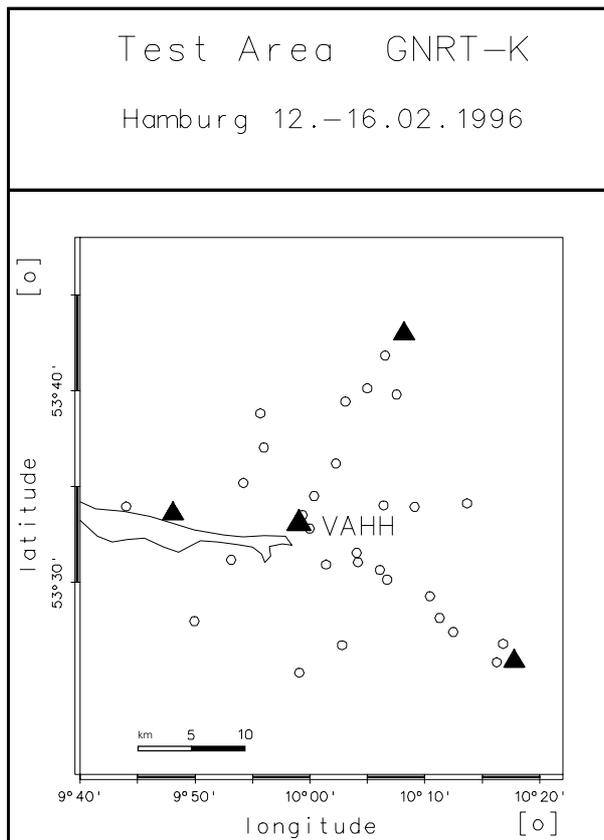


Abbildung 5.4: Übersicht über die Punkteverteilung, Referenzstationsvernetzung Hamburg, 12. - 16. Februar 1996

Dauer bis zur Festsetzung der Mehrdeutigkeiten hängt hauptsächlich von der Anzahl beobachteter Satelliten und der Qualität der Funkübertragung ab. Die teilweise starke Streuung der Werte läßt sich mit Störungen durch Verkehr und Bebauung besonders im Innenstadtbereich erklären.

Die TTFA-Werte schwankten zwischen wenigen Sekunden und 5 bis 10 Minuten. Eine berechnete mathematische lineare Regression in Abbildung 5.5 zeigt einen entfernungsabhängigen Anstieg von 1 min im Nahbereich bis 3 min in 25 km Entfernung zur Referenzstation. Diese Werte können nur als grober Anhalt für die Abschätzung der TTFA-Werte dienen. Wie bereits erwähnt, spielen neben der Entfernung auch die Satellitengeometrie und die Empfangseigenschaften des Korrekturdatensignals eine besondere Rolle. Dies gilt auch für alle weiteren Betrachtungen der Echtzeitergebnisse.

Drei zusätzliche GPS-Empfänger wurden temporär an der Peripherie Hamburgs betrieben. Sie bildeten zusammen mit der Permanentstation die Grundlage für die Simulation des Referenzstationsnetzes. Abbildung 5.4 zeigt eine Übersicht über die Punkteverteilung. Alle Stationen waren mit einem Ashtech Z12 Zweifrequenzempfänger ausgerüstet. Die Datenaufzeichnungsrate betrug 1 Sekunde.

Punktbestimmung in Echtzeit

Alle Neupunkte wurden bestimmt, in dem nach dem Start von GNRT-K und einer ersten Mehrdeutigkeitslösung ein Reset durchgeführt wurde, und dann die Dauer bis zur erneuten Festsetzung der Mehrdeutigkeiten („Time To Fix Ambiguities“, TTFA) gemessen wurde. Anschliessend wurde die Mehrdeutigkeitslösung etwa alle 5 Minuten erneut gestartet. Die Echtzeitpositionen dieser 5-Minuten-Intervalle wurden aufgezeichnet.

Das Zurücksetzen der Mehrdeutigkeiten fand im Mittel viermal pro Punkt statt. Abbildung 5.5 zeigt die gemessenen TTFA-Werte für jedes Experiment gegen die Entfernung zur Referenzstation. Die

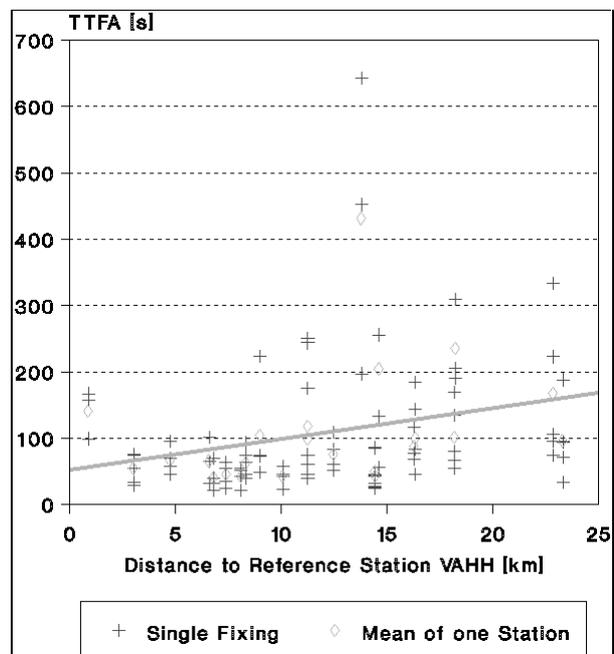


Abbildung 5.5: TTFA-Werte für jede Mehrdeutigkeitsfestsetzung (fixing), Echtzeitmessungen mit GNRT-K, Hamburg 12. - 16. Februar 1996

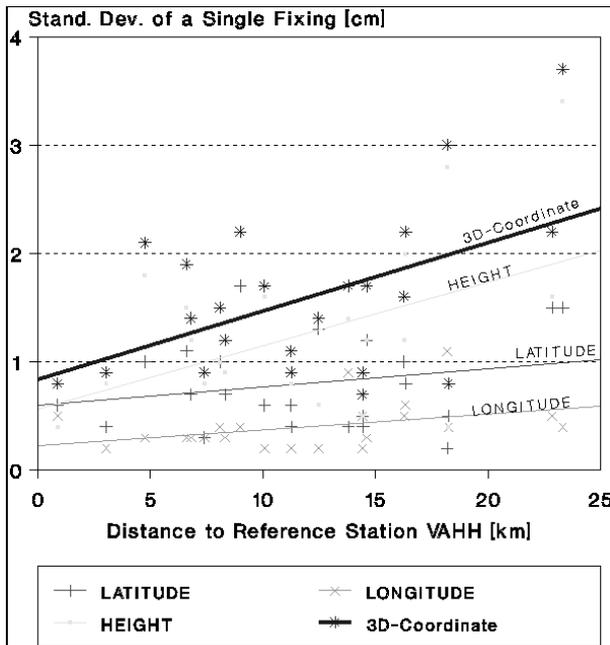


Abbildung 5.6: Standardabweichung für jede Festsetzung, Echtzeitmessung mit GNRT-K, Hamburg, 12. - 16. Februar 1996

Für die weitere Analyse wurden die nachfolgenden Berechnungsschritte vorgenommen: die Position für eine einzelne Festsetzung wurde über das Mittel aus einem fünf Minuten Positionsset ermittelt, das Mittel aus den vier Festsetzungen ergab die endgültige GNRT-K Position. Abbildung 5.6 zeigt die Standardabweichung für jede GNRT-K Position in den Komponenten Breite, Länge und Höhe und die gesamte 3-D-Position.

Die innere Genauigkeit der Messungen war generell besser als 4 cm und in den meisten Fällen besser als 2 cm. Eine berechnete Regression zeigte einen Anstieg in der 3-D Standardabweichung von ca. $1 \text{ cm} + 0,6 \text{ ppm}$. Die Höhenkomponente war ungenauer als die horizontalen Komponenten. Aufgrund der in Norddeutschland vorherrschenden Satellitengeometrie wurde die Breitenkomponente mit geringerer Genauigkeit geschätzt als die Längskomponente.

Die präsentierten Ergebnisse zeigen entfernungsabhängige Effekte in den Echtzeitmessungen, wenn auch nur von relativ geringer Größe, da die Beobachtungsbedingungen recht gut waren. Die durch Regressionen errechneten Anstiege können hier lediglich als tendenzielle Darstellung der Effekte betrachtet werden, nicht als Faustregel zur Berechnung von zu erwartenden Genauigkeiten und Zeiten bis zur Mehrdeutigkeitsfestsetzung.

Auswertungen im Postprocessing

Für die Simulation der Online-Vernetzung wurde zunächst eine Lösung für das Referenzstationsnetz mit dem Programm GEONAP im Postprocessing berechnet. Aufgrund der langen Beobachtungszeiten warf die Auswertung keine besonderen Probleme auf. Multipath-Effekte konnten vernachlässigt werden. Desweiteren wurde eine Sollösung für die Neupunkte berechnet, die im folgenden Grundlage für die dargestellten Differenzen ist.

Die Algorithmen in GEONAP sind denen in GNRT-K ähnlich, so daß eine Simulation der Echtzeitmessungen mit dem Programm möglich war. Die Simulation der Vernetzung der Referenzstationen wurde mit der GEONAP-Option +od durchgeführt. Mit dieser Option wurden zusätzliche Kor-

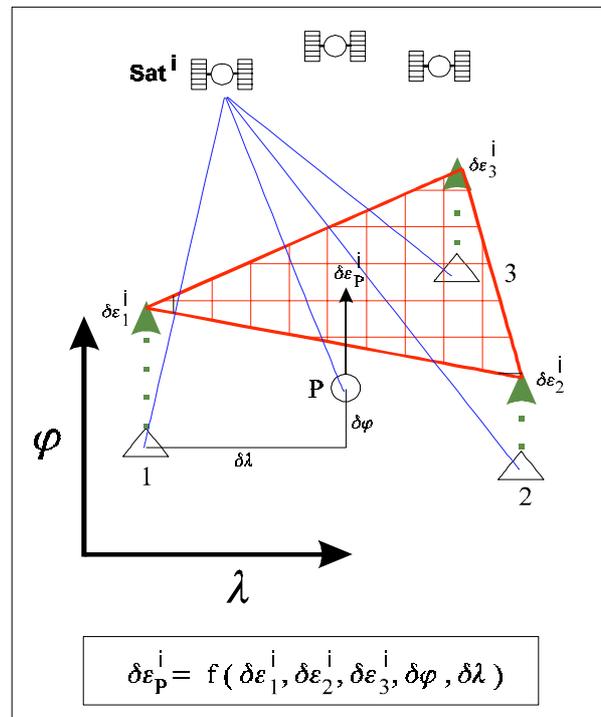


Abbildung 5.7: Berechnung der Flächenkorrekturparameter (FKP), vereinfachtes Schema

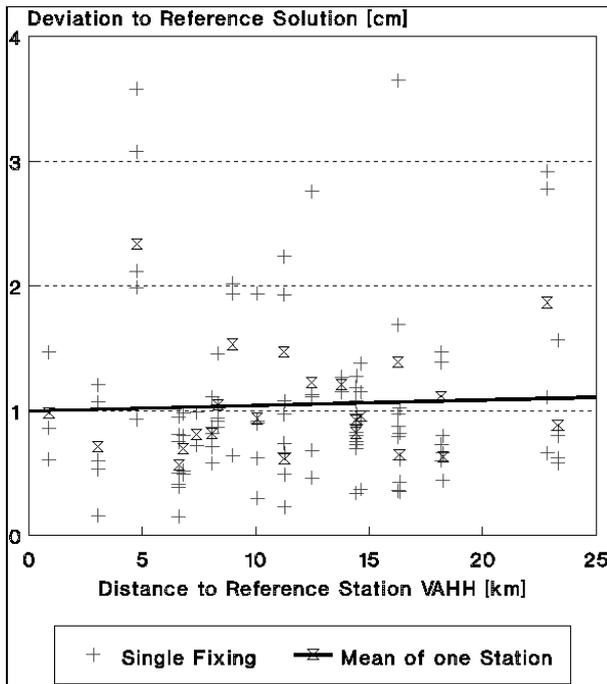


Abbildung 5.8: Differenz zwischen Referenzlösung und der simulierten Vernetzung, einzelne Festsetzungen und Mittel, Hamburg 12. - 16. Februar 1996

Für die praktischen Echtzeitanwendungen müssen die oben beschriebenen Koeffizienten dem Nutzer über Funk übermittelt werden. Zusätzlich müssen die Referenzstationen untereinander verbunden sein. Letzteres kann über Telefonstandleitungen geschehen, die eine ausreichend große Datenübertragungsrate gewährleisten, aber auch kostenintensiv sein können. Im Funkbereich des üblichen 2-m-Bandes, das dem Nutzer zur Verfügung steht, ist die Datenübertragungsrate jedoch begrenzt. Um die zu übertragene Information auf das Notwendige zu beschränken, muß die Dynamik der Koeffizienten untersucht werden. Abbildung 5.10 zeigt die Dynamik anhand eines Beispiels. Die Werte der Driftkomponenten reichen von etwa -2,4 ppm bis hin zu +2 ppm. Die höchste Änderungsrate findet man bei Satellit 5 ab GPS Sekunde 215200 mit 3 ppm in 5 Minuten. Um eine Genauigkeit geringer als 1 mm/10 km zu bekommen, müssen die Koeffizienten mit einer Genauigkeit von ca. 0,1 ppm bestimmbar sein. Hieraus kann grob abgeschätzt werden,

rekturen für jeden Satelliten berechnet und mit einem geometrischen Modell abhängig von Breite und Länge des Neupunktes in Form von Bahnverbesserungen angebracht. Im einfachsten Falle ergibt sich aus der Nutzung von drei Referenzstationen eine schräge Fläche zur Ermittlung der Korrekturen. Abbildung 5.7 zeigt eine vereinfachte Prinzipskizze für die Berechnung der Korrekturparameter. Die Fehlereinflüsse auf die gemessenen Satellitenstrecken wurden modelliert und als Driftparameter in Richtung der Breiten- und Längskomponente ausgegeben.

In Abbildung 5.8 ist die Differenz der simulierten Vernetzung zur Referenzlösung dargestellt. Die Differenzen der gemittelten Lösungen waren stets kleiner als 2 cm. Die Entfernungsabhängigkeit wurde nahezu vollständig eliminiert. Abbildung 5.9 zeigt die Differenzen aller Ansätze zur Solllösung zusammenfassend auf. Das bessere Genauigkeitsniveau und die Eliminierung entfernungsabhängiger Einflüsse im Vernetzungsansatz sind klar zu erkennen.

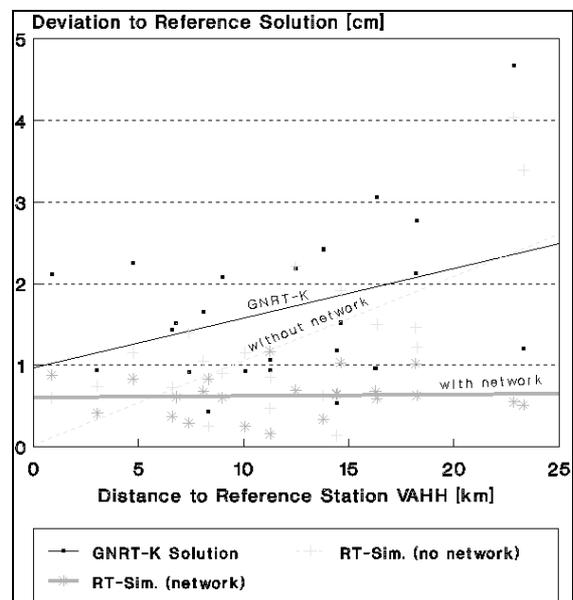


Abbildung 5.9: Differenz zwischen der Referenzlösung und der mittleren Position mit GNRT-K, GEONAP Echtzeitsimulation ohne Vernetzung und GEONAP Echtzeitsimulation mit Vernetzung, Hamburg 12. - 16. Februar 1996

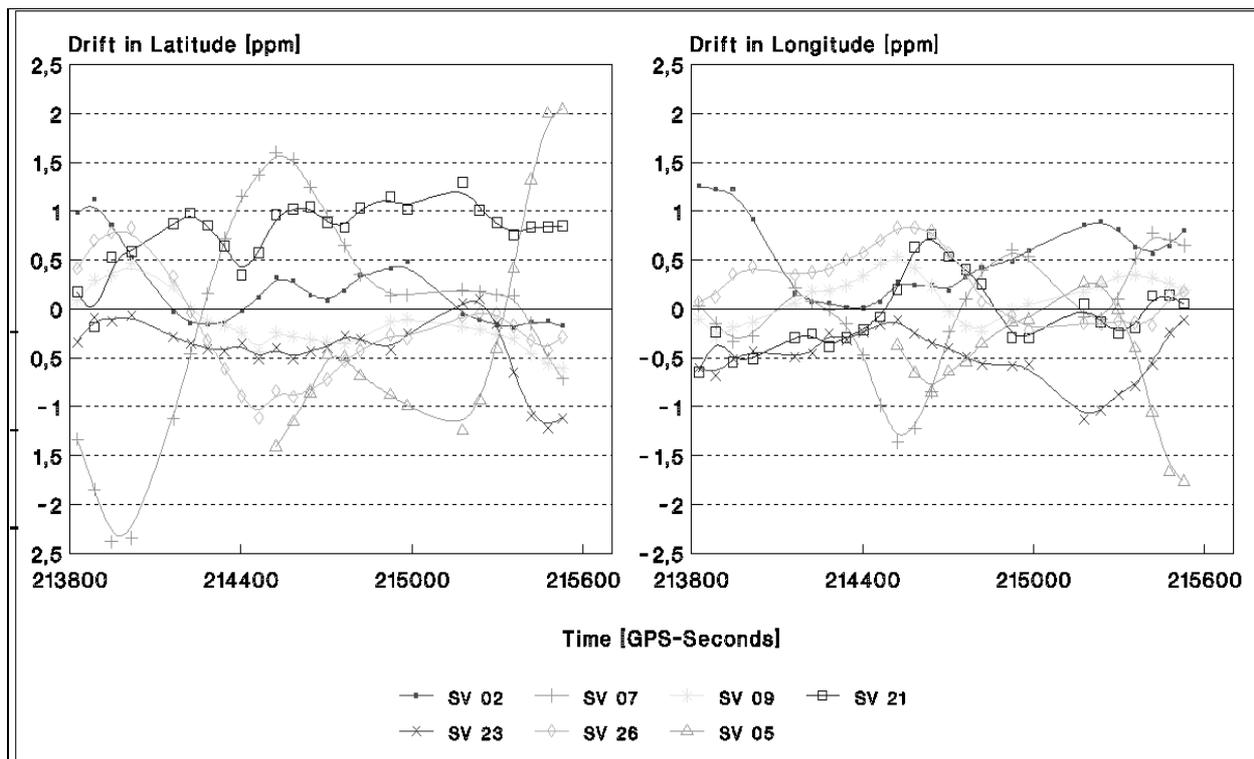


Abbildung 5.10: Dynamik der Vernetzungskoeffizienten, Drift in Breiten- und Längskomponenten versus GPS Zeit in Sekunden, Hamburg 12. - 16. Februar 1996

daß die Vernetzungskoeffizienten ca. alle 10 Sekunden gesendet werden müssen.

Das Ergebnis der Untersuchung kann in der Zusammenstellung in Abbildung 5.11 gesehen werden. Sowohl für die Dauer der Mehrdeutigkeitslösung als auch für die Genauigkeit der Positionsbestimmung sind entfernungsabhängige Effekte unter Nutzung von nur einer Referenzstation (hier: without network) erkennbar. Die Simulation einer Vernetzung der Referenzstationen (GNNET) zeigt, daß die Genauigkeit der statisch bestimmten Punkte im Mittel auf unter 1 cm zurückgeht. Für den TTFA-Wert wird erwartet, daß die Initialisierungszeiten auf ca. eine Minute gesenkt werden können. Hier konnten jedoch keine simulierten Ergebnisse generiert werden.

Aus den Untersuchungen kann gefolgert werden, daß ein Vernetzungsansatz die Mehrdeutigkeitslösung genauer macht. Mit Hilfe der zusätzlichen Informationen kann vermutet werden, daß neben der Genauigkeit auch die Schnelligkeit und die Sicherheit der Mehrdeutigkeitslösung in Echtzeit sowohl im statischen als auch im kinematischen Bereich gesteigert werden kann.

5.3.2 Untersuchungen im Raum Hannover

Im Rahmen des Vorhabens ist das Softwarepaket GNRT von der Firma Geo++ wesentlich weiterentwickelt worden. Das Modul zur Mehrdeutigkeitslösung und hochpräzisen Positionsbestimmung GNRT-K ist so erweitert worden, daß inzwischen u.a. Multistationslösungen, die Bestimmung von Systemparametern wie Bahnfehler und Ionosphärenfehler und die Bestimmung und Einführung von Flächenkorrekturparameter (FKP) möglich sind.

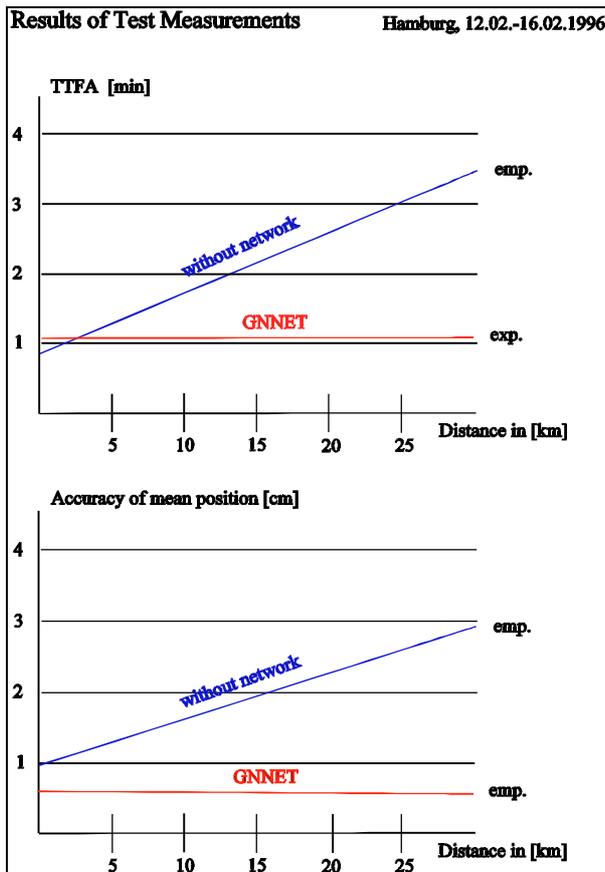


Abbildung 5.11: Ergebnisse der Testmessungen in Hamburg vom 12. - 16. Februar 1998

renzstation der im Vorhaben erstellten Spezifikation entspricht. Bis zu einer Entfernung von 20 km von der Referenzstation soll eine Positionsgenauigkeit von 5 cm gegeben sein (*Spezifikation, 1997*). Der Punkt Ottbergen liegt mit 33 km Abstand von der Referenzstation außerhalb der 20 km, wobei in diesem Fall eine Positionsgenauigkeit von 10 cm gewährleistet sein soll.

Der Versuchsaufbau sah vor, daß die Mehrdeutigkeitslösung zeitgleich mit und ohne Vernetzungsansatz untersucht wurde. Nach der Initialisierung wurden die Positionen 20 Sekunden lang aufgezeichnet, um Aussagen zur Genauigkeit machen zu können. Danach wurde ein automatisches Zurücksetzen der Filter und somit auch der Mehrdeutigkeitslösung herbeigeführt und die Zeit bis zur nächsten Initialisierung gemessen (TTFA). Die Daten für beide Ansätze wurden an demselben Empfänger generiert.

Die Realisierung der Vernetzung in Echtzeit erfordert einen zusätzlichen Aufwand seitens der Referenzstationsbetreiber, da die Stationen miteinander permanent in Verbindung stehen müssen. Die LGN hat langjährige Erfahrungen als Betreiber von Referenzstationen (*LGN, 1996*). Während des Vorhabens wurde eine Netzmasche mit Vernetzung unter Nutzung der permanenten Referenzstationen in Hannover (H), Braunschweig (BS) und Clausthal (CL) betrieben. Daher bot es sich an, in enger Zusammenarbeit mit der LGN Untersuchungen in diesem Raum durchzuführen. Es wurden mehrere Punkte in unterschiedlichen Abständen zur Referenzstation Hannover besetzt.

Exemplarisch sollen die Ergebnisse anhand von Messungen auf den Punkten Schulenburg und Ottbergen dargestellt werden. Der Punkt Schulenburg wurde gewählt, da er sich 20 km von Hannover entfernt befindet und somit einem Grenzwert für die Entfernung von der Referenzstation entspricht.

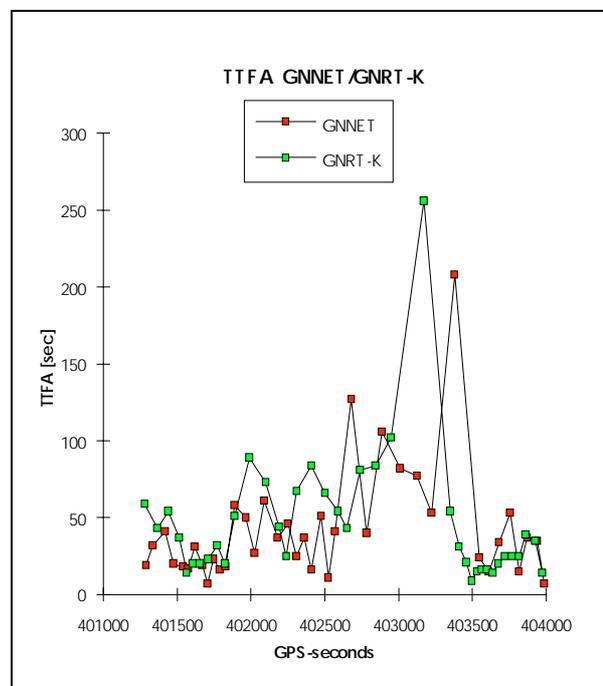


Abbildung 5.12: TTFA für Untersuchung zur Vernetzung im Raum Hannover, Punkt Schulenburg, Entfernung zur Referenzstation Hannover 20 km, 28. August 1997

Durch die Gleichzeitigkeit der Messungen und die identischen Daten waren die Ergebnisse der beiden Ansätze direkt vergleichbar.

In Abbildung 5.12 sind die Initialisierungszeiten (TTFA) mit (GNNET) und ohne Vernetzungsansatz (GNRT-K) dargestellt. Es ist zu erkennen, daß die TTFA-Werte generell mit Vernetzungsansatz kleiner waren als die Werte ohne Vernetzungsansatz. Demnach erfolgte die Lösung mit Vernetzung schneller. Die Initialisierungszeit lag im allgemeinen unter 1 min. Es wurden aber auch Zeiten bis zu 3 min ermittelt.

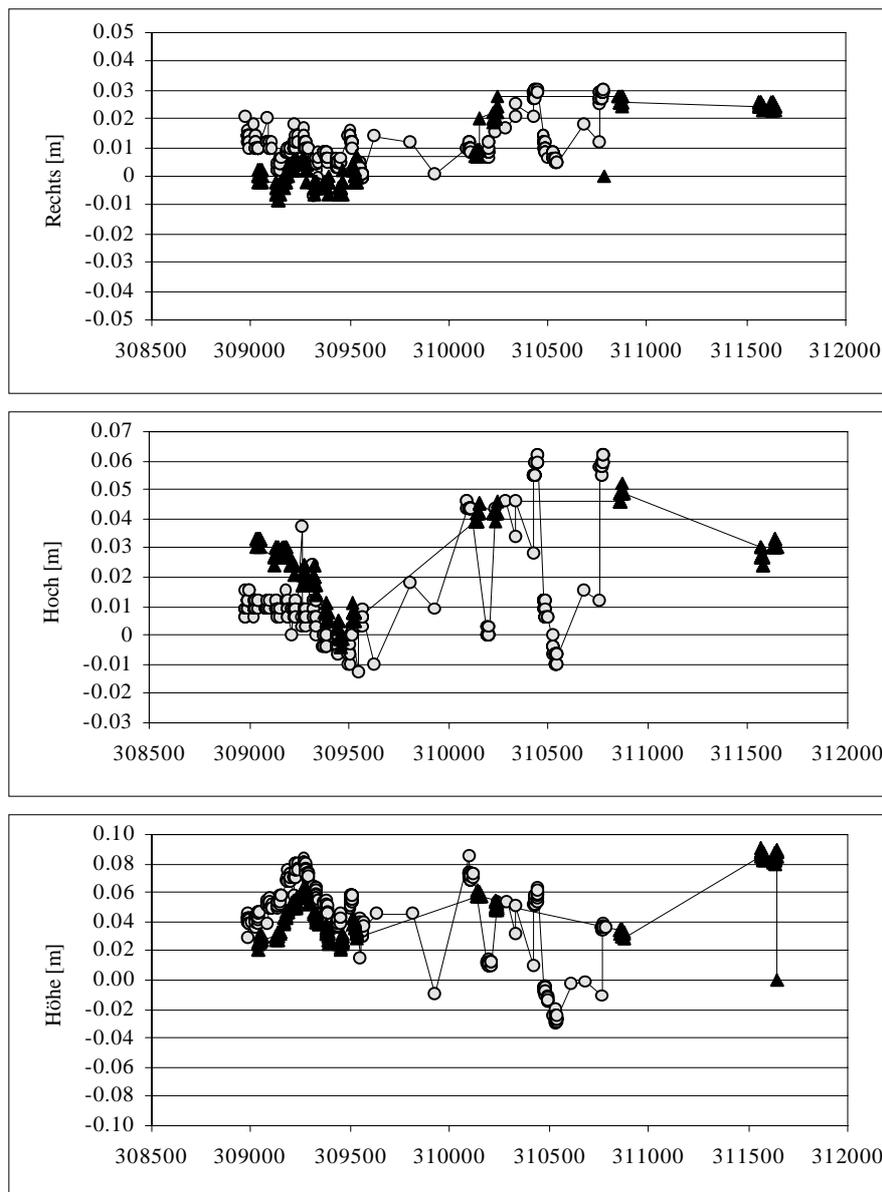


Abbildung 5.13: Variationen der Koordinaten, Vernetzung im Raum Hannover, Punkt Schulenburg, Entfernung zur Referenzstation Hannover 20 km, 28. August 1997
 graue Kreise: Lösungen mit Vernetzungsansatz
 dunkle Dreiecke: Lösungen ohne Vernetzungsansatz

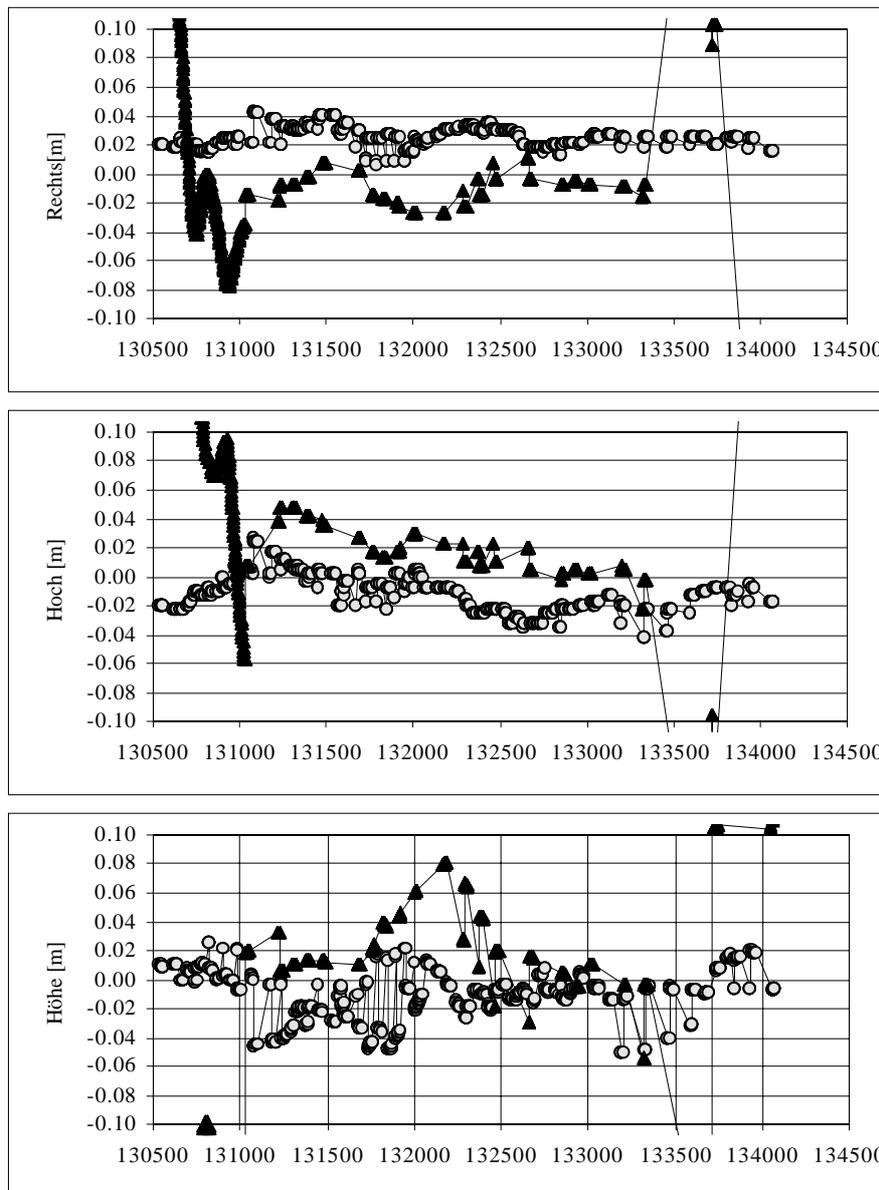


Abbildung 5.14: Variationen der Koordinaten, Vernetzung im Raum Hannover, Punkt Ottbergen, Entfernung zur Referenzstation Hannover 33 km, 02. März 1997

graue Kreise: Lösungen mit Vernetzungsansatz
dunkle Dreiecke: Lösungen ohne Vernetzungsansatz

Abbildung 5.13 zeigt die Abweichungen der unterschiedlichen Lösungen zu einem vorher berechneten Wert der LGN. Die mit Vernetzungsansatz ermittelten Werte sind als graue Kreise dargestellt. Über 20 km Entfernung zur Referenzstation ergaben sich im ersten Teil (bis ca. 309500) Abweichungen zwischen den Lösungen von ca. 2 cm in jeder Komponente. Gleichzeitig ist jedoch ein ähnliches Streuverhalten der Abweichungen zu erkennen. Es ist anzunehmen, daß diese Systematik auf Mutipatheinflüsse zurückzuführen ist, die im derzeitigen Vernetzungsansatz nicht reduziert werden kann. Die Größenordnungen des Streuverhaltens der Komponenten sind vergleichbar mit maximal ± 2 cm in dem Rechtswert, ± 3 cm im Hochwert und ± 4 cm in der Höhe. Bei genauerer Analyse sind Sprünge in den Koordinaten der Vernetzungslösungen zu finden, die das Ergebnis verzerren.

Zu der Herkunft dieser Sprünge sind verschiedene Einflüsse denkbar:

- Einflüsse seitens der Referenzstationen (Antennen, Multipath, Koordinaten),
- Einflüsse seitens der Mobilstationen (unterschiedlicher Empfängertyp zu den Referenzstationen),
- Extrapolation der FKP's durch Lage der Mobilstation außerhalb des Referenzstationsdreiecks H, BS, CL,
- Einflüsse seitens der Referenzstationssoftware und
- Einflüsse seitens der Mobilstationssoftware.

Ähnliche Ergebnisse gab es in einem späteren Versuch in der Nähe von Ottbergen, das zentral in der Referenzstationsmasche gelegen ist. Die Entfernung zur Referenzstation betrug ca. 33 km. Hier war zu erkennen, daß in den Lösungen ohne FKP's zum Anfang und zum Ende der Messung falsche Mehrdeutigkeiten festgesetzt wurden. Mit der Nutzung der Vernetzungsparameter kam dieses nicht mehr vor. Auch waren deutlich mehr Festsetzungen zu erkennen. Im Mittel streuten die Koordinaten um die von der LGN zuvor berechneten Lösungen. Die Streuung der Ergebnisse nahm mit der Nutzung der FKP zur Mehrdeutigkeitsbestimmung ab. Abbildung 5.14 zeigt dieses Verhalten.

Die mit Vernetzungsansatz ermittelten Werte sind wiederum als graue Kreise dargestellt. Über 33 km Entfernung zur Referenzstation ergeben sich Größenordnungen des Streuverhaltens der Komponenten von maximal ± 2 cm in dem Rechtswert, ± 2 cm im Hochwert für die GNNET- und ± 3 cm für die GNRT-K-Lösung und ± 3 cm für die GNNET- und ± 6 cm für die GNRT-K-Lösung in der Höhe. Auch bei der zwischen den beiden Messungen erneuerten GNNET-Lösung sind noch Sprünge in den Koordinaten zu entdecken. Aus der verminderten Streuung der Ergebnisse über 33 km kann auf eine Reduzierung entfernungsabhängiger Einflüsse geschlossen werden. Es ist anzunehmen, daß eine Verbesserung der Gegebenheiten bei der Vernetzung (Referenzstationskoordinaten, Fehlermodellierung, ...) eine höhere Genauigkeit der Positionsbestimmung zur Folge hat. Die hier vorgestellten Ergebnisse in Echtzeit sind mit großer Wahrscheinlichkeit zu übertreffen.

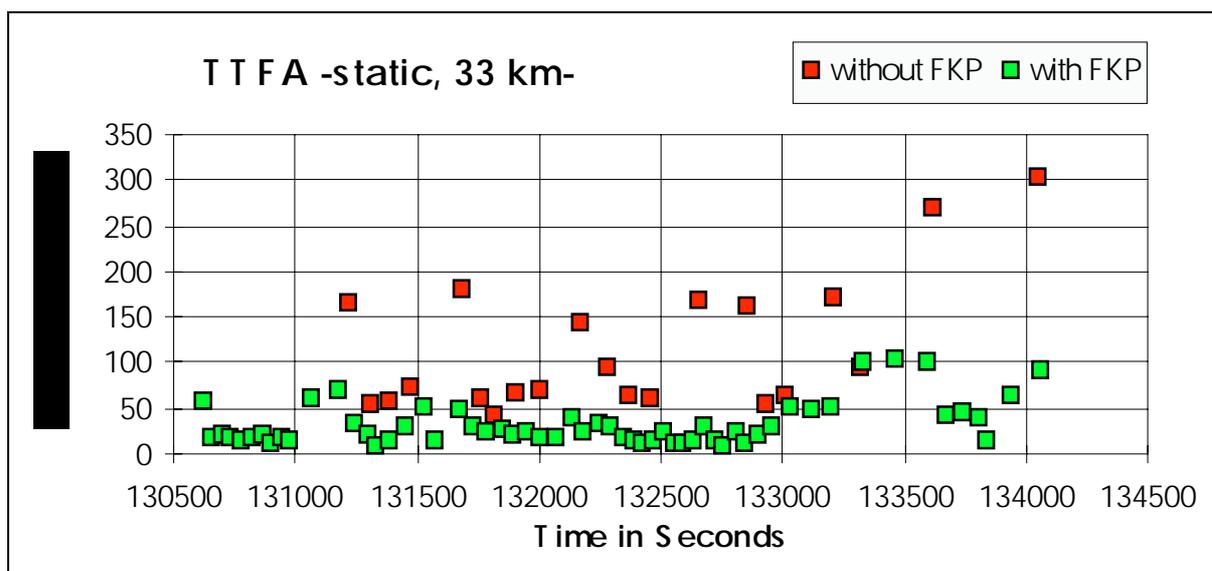


Abbildung 5.15: TTFA für Untersuchung zur Vernetzung im Raum Hannover in [s], Punkt Ottbergen, Entfernung zur Referenzstation Hannover 33 km, 02. März 1997

Für die Schnelligkeit der Mehrdeutigkeitslösungen ergeben sich mit den Vernetzungsparametern selbst über 33 km noch TTFA-Werte, die im wesentlichen unter 1 min liegen, also ähnlich wie bei dem Versuch über 20 km. Hingegen benötigen die Lösungen ohne FKP's bis zu 3 min bis zur Festsetzung (Abbildung 5.15).

Die Vernetzung von Referenzstationen erhöht die Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Schnelligkeit der Mehrdeutigkeitslösungen über lange Entfernungen wesentlich. Sie erscheint hier für Bereiche unter 20 km wenig sinnvoll, da eine ausreichende Genauigkeit zu erreichen ist. In den folgenden Jahren (ca. ab 1999) ist aufgrund vermehrter Sonnenfleckentätigkeiten aber mit erhöhtem Anstieg ionosphärischer Aktivitäten zu rechnen, und somit auch mit der Erhöhung entfernungsabhängiger Fehleranteile. Dann werden auch die Mehrdeutigkeitslösungen in einem Bereich unter 20 km Entfernung von der Referenzstation von diesen Störungen beeinflusst. Eine Vernetzung der Referenzstationen kann diese Einflüsse reduzieren.

5.3.3 Vernetzung der Referenzstationen an den deutschen Küsten

Eine Vernetzung ist nur dann sinnvoll, wenn die Meßgebiete der potentiellen Nutzer in oder zumindest nahe an einer Referenzstationsmasche gelegen sind. In Küstenbereichen besteht das Problem, daß feste Standpunkte für die Stationen im Seebereich im allgemeinen nicht vorhanden sind. Die Abbildung 5.16 zeigt bereits bestehende und mögliche Referenzstationen in Städten nahe der Küste. In Abbildung 5.17 wird ersichtlich, daß ein großer Teil der den Küsten vorgelagerten Gebiete in einer potentiellen Netzmasche liegen, so daß hier eine Vernetzung möglich ist. Das betrifft im Nord-

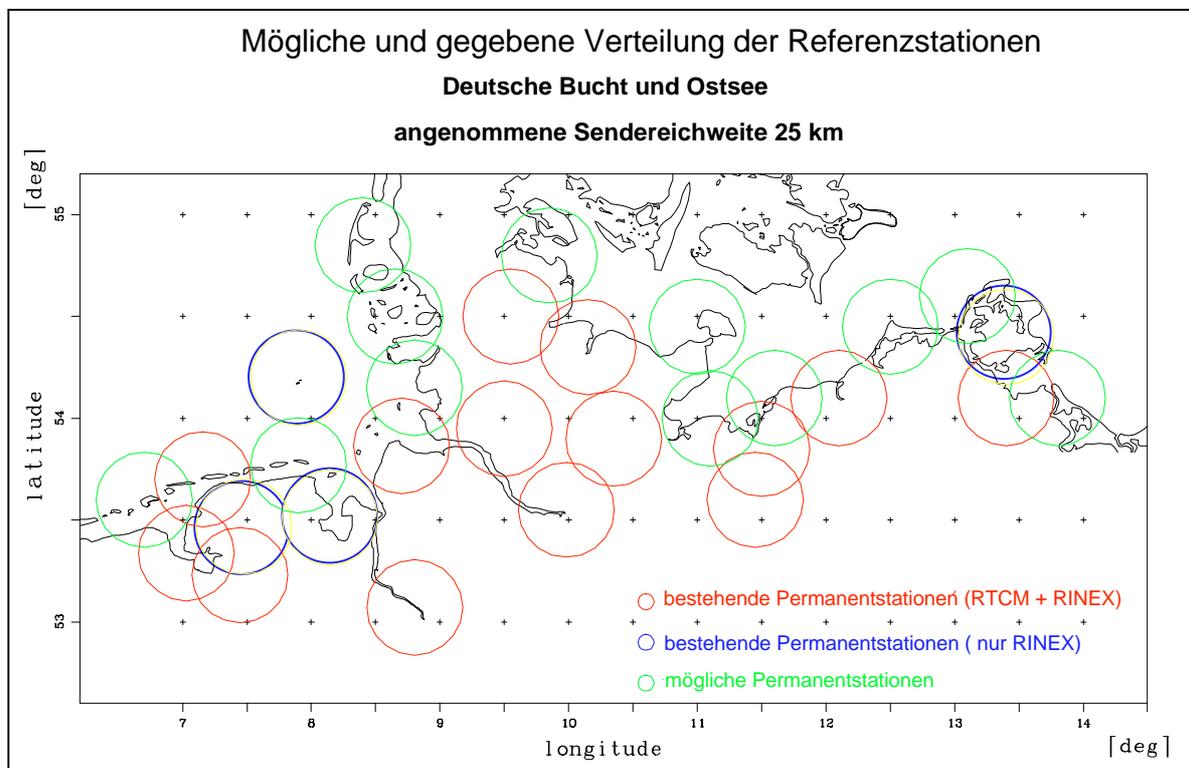


Abbildung 5.16: Bestehende und mögliche Referenzstationen an den deutschen Küsten

Vernetzung der "geplanten" Referenzstationen

Deutsche Bucht und Ostsee

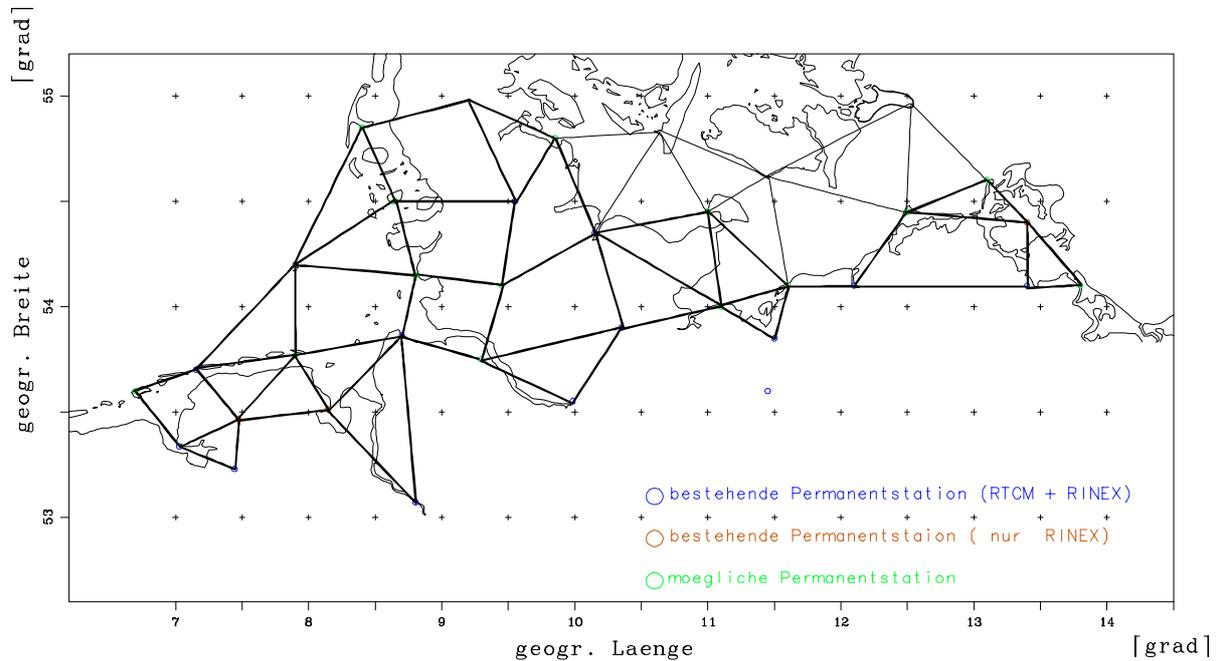


Abbildung 5.17: Mögliche Vernetzung von Referenzstationen an den deutschen Küsten

seeküstenbereich die Wattengebiete und den Bereich der stark frequentierten Schiffswege in der Nähe der Elb- und der Wesermündung. In der Ostsee ist eine besonders gute Überdeckung im Bereich der Lübecker Bucht aber auch in anderen Bereichen realisierbar. In Verbund mit einer dänischen Institution ist die vollständige Überdeckung zumindest im Bereich der südlichen Ostsee denkbar.

6 Lagewinkelbestimmung

Unter der Bezeichnung „Lage“ wird entsprechend der *DIN 33417 (1987)* („Die Lage eines Gegenstandes wird durch die Winkel zwischen Achsrichtungen des Objektsystems und denen des Bezugssystems angegeben. ...“) die Orientierung eines Meßschiffes im Raum mit den Parametern Rollen, Stampfen und den Kurswinkel verstanden.

Die Lagewinkelbestimmung kann dabei ganz oder zumindest teilweise von verschiedenen Sensoren übernommen werden.

Im Rahmen des Vorhabens wurden Untersuchungen mit inertialen Sensoren und auf GPS basierende Verfahren durchgeführt. Als inertialer Sensor konnte unter anderem auf das von der Firma Litef GmbH, Freiburg, gefertigte Inertialsystem LCR-88 von der Fachhochschule Bochum zurückgegriffen werden. Desweiteren konnten drei Entwicklungen der Firma TSS Ltd., Oxfordshire, England, der Roll-Pitch-Heave-Sensor 355B, der Dynamic Motion Sensor DMS-05 und das Positioning and Orientation System for Marine Vessels POS/MV 320 auf Meßfahrten untersucht werden. Die Firma iMAR GmbH, St. Ingbert, begleitete eine Testfahrt mit dem Motion Analysis System DMS. Zur Verifizierung der Datenschnittstellen stand kurzzeitig auch ein Produkt der Firma Seatex AS, Trondheim, Norwegen, die Motion Reference Unit MRU-5 zur Verfügung. Das im Projekt verfügbare COMPASS-System der Firma Geo++, Garbsen (Lagewinkelbestimmung mit Hilfe eines Mehrantennensystems auf GPS-Basis) wurde ebenfalls eingehend geprüft.

6.1 Lagewinkelbestimmung mit GPS

Die Lagewinkelbestimmung mit dem System COMPASS (Geo++, Garbsen) nutzt die Messungen eines GPS-Mehrantennenarrays mit bekannter Einmessung in das Schiffskoordinatensystem. Ergebnis der Messungen sind der Kurs, Rollen und Stampfen des Schiffes. Weitere Größen wie zum Beispiel die Geschwindigkeit sind aus der Messung an einer der Antennen ableitbar. Die Bestimmung einer hochpräzisen Position ist ebenfalls möglich, setzt aber voraus, daß entsprechende Korrekturdaten bereitgestellt werden. Die Module zur Echtzeit-Positionierung sind identisch mit denen des GNRT-Systems, so daß ein derartiges Gesamtsystem aus Positions- und Lagewinkelbestimmung kombiniert auf einem Rechner lauffähig ist.

Die Abbildung 6.1 verdeutlicht den typischen Aufbau eines Mehrantennensystems an Bord eines Peilschiffes.

Die Genauigkeit der COMPASS-Lösung wird maßgeblich durch

- die Genauigkeit der Antenneneinmessung,
- die Länge der Zwischenantennenstrecken,
- die Fehlereinflüsse des GPS und
- die unkontrollierten, installationsbedingten Bewegungen der Antennen

bestimmt.

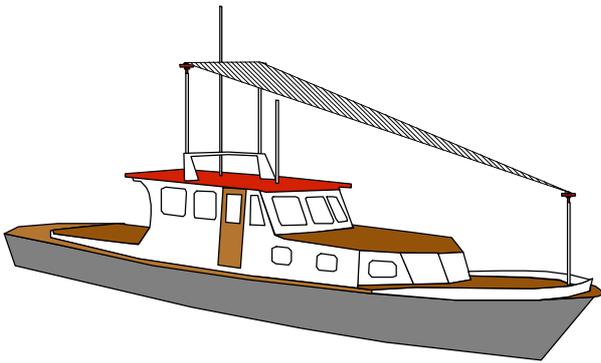


Abbildung 6.1: Lagewinkelbestimmung mit dem GPS-Mehrantennensystem COMPASS

Die Genauigkeit der Antenneneinmessung wirkt sich zum einen auf die Schnelligkeit und Korrektheit der Mehrdeutigkeitslösung aus, zum anderen auch direkt auf die Größen der Lagewinkel. In den Untersuchungen zeigte sich, daß die Einmessungen möglichst mit einer Genauigkeit von besser als 3 cm bestimmt werden müssen, um schnelle und korrekte Mehrdeutigkeitsfestsetzungen zu gewährleisten. Die Auswirkungen einer ungenauen Einmessung auf die Genauigkeit der Lagewinkelbestimmung steht im direkten Zusammenhang mit der Länge der Zwischenantennenstrecke.

Nach Abbildung 6.2 ergibt sich die Auswirkung dw eines Einmessungsfehler dx der Antenne in Abhängigkeit von der Zwischenantennenstrecke s auf einen Lagewinkel maximal mit

$$dw = \arctan(dx/s),$$

nämlich für den Fall, daß der Fehler rechtwinklig zur Winkelachse auftritt. In Tabelle 6.1 sind entsprechende Beispiele aufgeführt. Die grau unterlegten Felder kennzeichnen den Bereich, in dem eine angestrebte Winkelgenauigkeit von $0,1^\circ$ nicht erreicht wird. Bis zu einer Basislänge von 10 m ist eine Genauigkeit besser als 1 cm für die Einmessung erforderlich. Bei einer sehr kurzen Basis von nur 1 m müßte die Einmessgenauigkeit besser sein als 2 mm. Der Einmessungsfehler bewirkt in erster Näherung für kleine Winkel eine konstante Abweichung bei der Winkelbestimmung.

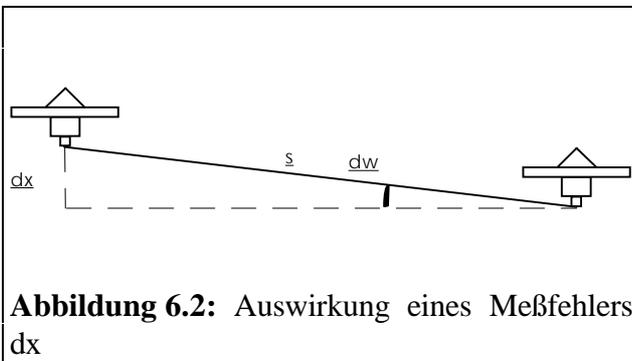


Abbildung 6.2: Auswirkung eines Meßfehlers dx

$s \backslash dx$	2 mm	1 cm	1 dm
1 m	$0^\circ 11$	$0^\circ 57$	$5^\circ 71$
5 m	$0^\circ 02$	$0^\circ 11$	$1^\circ 15$
10 m	$0^\circ 01$	$0^\circ 06$	$0^\circ 57$
30 m	$0^\circ 004$	$0^\circ 02$	$0^\circ 19$

Tabelle 6.1: Auswirkung dw eines Meßfehlers dx in $[\circ]$

Zu den Fehlereinflüssen der GPS zählen hauptsächlich das Phasenrauschen und der Mehrwegeeffekt (Multipath). Das Rauschen einer GPS-Trägerphasenmessung kann typischerweise mit 2-3 mm angenommen werden. Multipath wirkt sich in kinematischen Umgebungen als erhöhtes Rauschen aus. In statischen Anwendungen ist mit Effekten bis zu mehreren Zentimetern mit Variationslängen von 5 - 25 min zu rechnen. Der Nachweis von Multipath in kinematischen Anwendungen ist schwierig. Bei geringem Multipath kann analog zur Tabelle 6.1 mit Einflüssen auf eine 1 m Basis von $0,1^\circ$ gerechnet werden, bei 10 m entsprechend mit $0,01^\circ$. Bei stärkerem Multipatheinwirkungen (2 cm) muß schon bei einer Basislänge von 10 m ein Fehler von $0,1^\circ$ in Kauf genommen werden. Ein weiterer Einfluß ergibt sich durch die Verwendung unterschiedlicher Antennentypen im Antennenfeld. Dieses sollte möglichst vermieden werden.

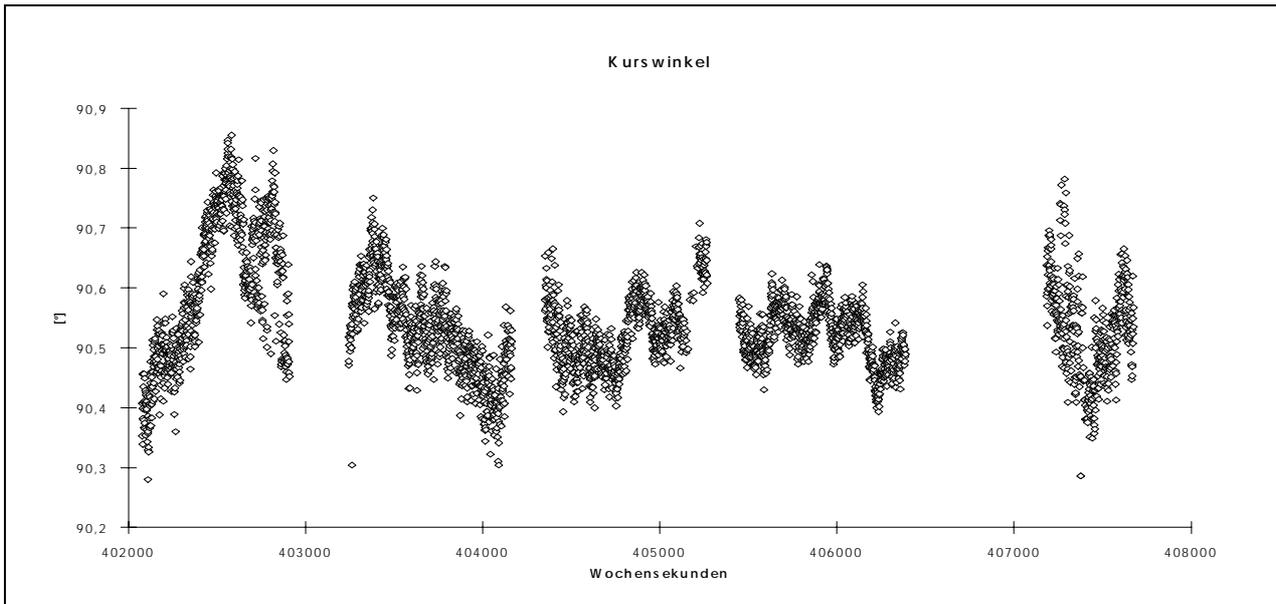


Abbildung 6.3: Ergebnisse eines COMPASS-Tests auf kurzer Basis -Kurs-

Unkontrollierte Antennenbewegungen treten auf, wenn die Zwischenantennenstrecken in dem Antennenarray durch Vibrationen und Verformungen des Schiffes verändert werden. Diese Auswirkung kann je nach Schiffstyp und Antennenmontierung stark unterschiedlich ausfallen. Ideal ist eine feste Verbindung zwischen den Antennen. Eine solche Forderung ist schwerlich mit der Forderung nach einer langen Basislänge zwischen den Antennen zu kombinieren.

In Testmessungen am IfE wurde die Genauigkeit der Lagewinkelbestimmung mit dem GPS-Lagemesssystem COMPASS der Firma Geo++ GmbH näher untersucht. Dazu wurde ein Antennenarray auf einem festen Kreuz montiert. Es sollte keine absolute Genauigkeit der Winkelbestimmung, sondern lediglich die Streuung der Meßergebnisse betrachtet werden.

Die Zwischenantennenstrecken wurden mit Feinmeßstäben mit einer Genauigkeit von besser als 0,3 mm bestimmt. Verwendet wurden dazu Anzielvorrrichtungen für Theodolite (Kegel mit Kopf),

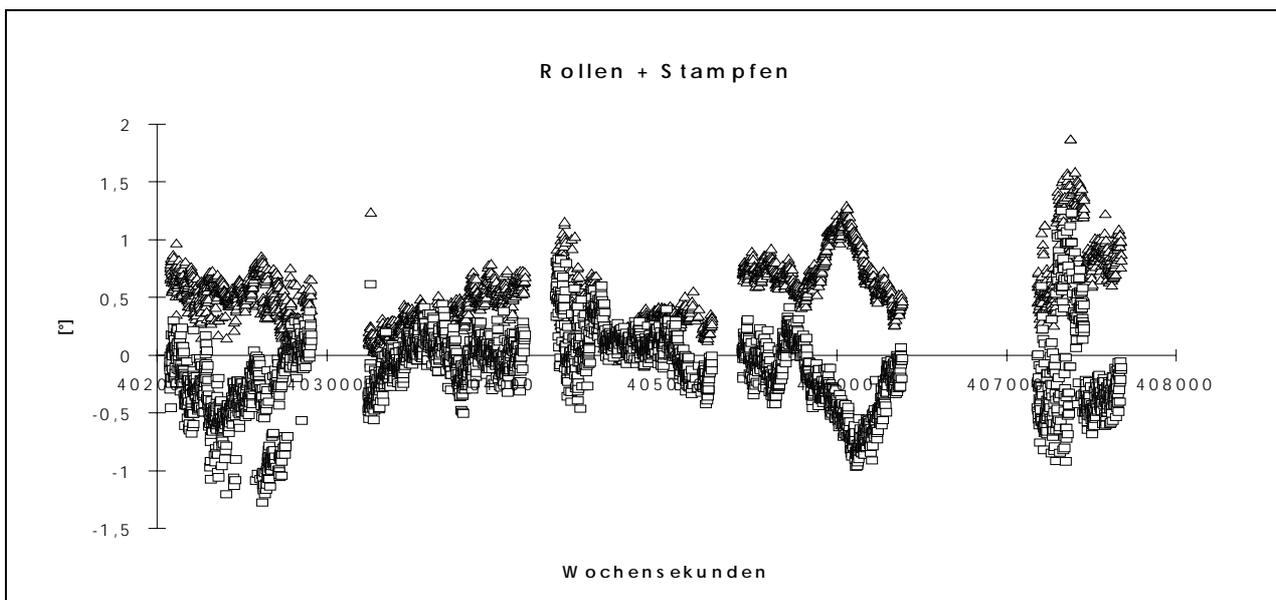


Abbildung 6.4: Ergebnisse eines COMPASS-Tests auf kurzer Basis -Rollen und Stampfen-

die in die Hülsen für die Steckzapfen der Antennen montiert wurden. Die Zwischenantennenstrecken konnten also als quasi fehlerfrei bekannt vorausgesetzt werden.

Die Abmessungen des Kreuzes betragen in etwa

- 2 m zwischen Steuerbord- und Backbordantenne
- mittelsenkrecht auf diese Basis 1 m entfernt die Bugantenne
- => ca. 1,40 m zwischen den seitlichen Antennen zur Bugantenne.

Das Kreuz war zum Zeitpunkt der Untersuchung unbewegt. In Abbildung 6.3 und Abbildung 6.4 sind die Meßwerte für den Kurswinkel, das Rollen und das Stampfen gegen die Meßepoche dargestellt. Multipatheinflüsse sind als systematische Effekte klar zu erkennen. Der Kurswinkel variiert in einem Bereich von ca. $\pm 0,25^\circ$ (Abbildung 6.3), Rollen und Stampfen in einem Bereich von $\pm 0,5^\circ$ (Abbildung 6.4). Die geringere Streuung des Kurswinkels ist auf die Ableitung aus den horizontalen Komponenten der GPS-Positionierung zurückzuführen. Die Höhenkomponente der GPS-Positionsbestimmung, die üblicherweise mit einer um Faktor 2-3 geringeren Genauigkeit bestimmt wird, schlägt sich besonders in den Komponenten Rollen und Stampfen nieder.

Aufgrund der gemachten Erfahrungen faßt die nebenstehende Abbildung 6.5 die Ergebnisse zur Genauigkeit der COMPASS-Lagebestimmung in Abhängigkeit der Basislänge zusammen. Als durchgezogene Kurve ist dabei die theoretische Winkelgenauigkeit aufgetragen, die mit einem Fehler von 2 mm (Phasenmeßrauschen) erreichbar wäre. Die bei den Untersuchungen erzielten Ergebnisse lagen alle etwas über dieser Kurve. Dieses ist aus verbliebenen Restfehlern, wie Multipath zu erklären. Der dargestellte Vergleich zur Basislänge 8 m wurde 1996 auf dem VWFS „Atair“ mit dem inertialen Meßsystem TSS 335B ermittelt. Dieses System läßt keine höheren Genauigkeiten zu.

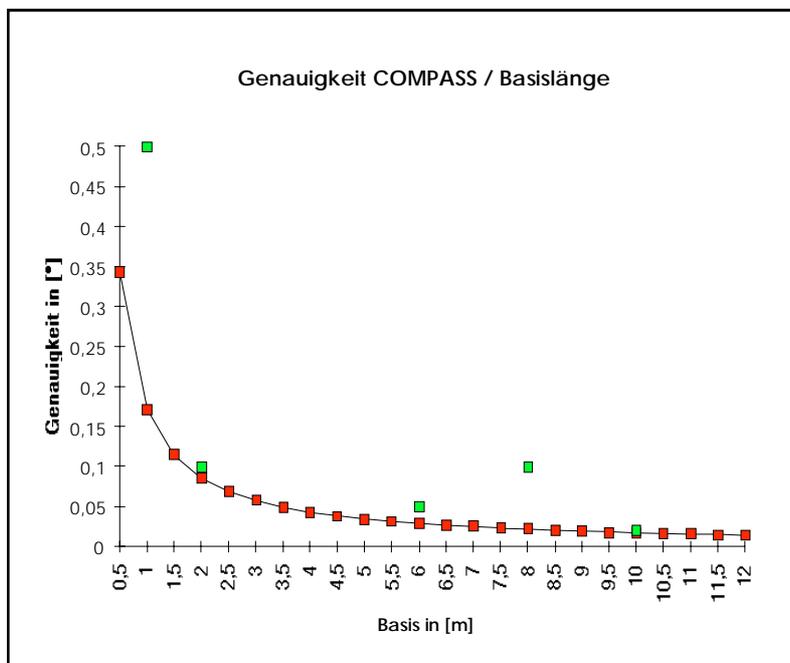


Abbildung 6.5: Bisherige Ergebnisse der COMPASS-Winkelgenauigkeit in Abhängigkeit von der Basislänge, untere Kurve: theoretische Genauigkeit bei einem Phasenrauschen von 2 mm

Weitere Details zu den oben beschriebenen Untersuchungsergebnissen sind in einer Diplomarbeit (Brandenburg, 1997) dokumentiert.

6.2 Inertiale Lagemeßsysteme

Inertiale Meßsysteme, auch Trägheitsmeßsysteme genannt, messen mit ihrem Sensorsystem Beschleunigungen und Drehraten, die ein bewegter Körper erfährt. Durch doppelte Integration können aus diesen Daten Geschwindigkeiten und Positionen ermittelt werden, wenn der Ausgangszustand bekannt ist (Hinüber, 1995).

Es werden Plattformsysteme, die kardanisch aufgehängt sind, von Strapdown-Systemen unterschieden,

die direkt mit dem bewegten Körper verbunden sind. Moderne Strapdown-Systeme arbeiten mit Servo-Beschleunigungsmesser, die einen Meßbereich von ± 2 g bei einer Auflösung von $0,5 \mu\text{g}$ haben. Als Drehratenaufnehmer werden je nach Anforderung mechanische (DTG, Dynamical Tuned Gyro), piezoelektrisch vibrierende (PVG, Piezoelectrical Vibrating Gyro) und optische Kreisel, die in faser-optische Kreisel (FOG, Faser Opticl Gyro) und Ringlaserkreisel (RLG, Ring Laser Gyro) unterschieden werden, verarbeitet (Hiniüber, 1995).

Nähere Informationen zu der Arbeitsweise und den Komponenten von inertialenen Meßsystemen findet man bei Titterton und Weston (1997) und eine Einführung in die Mathematik der Inertialtechnik ist bei Farkas-Jandl (1986) gegeben.

Die Hauptfehlerquellen bei inertialen Meßsystemen liegen in der Kreisel drift und dem Beschleunigungsmesser bias. Um diese Fehler klein zu halten, ist der Berechnungsalgorithmus mit Nullgeschwindigkeits- (Zero Velocity Updates, ZUPT) oder Koordinatenverbesserungen (Coordinate Updates, CUPT) zu versehen. Diese Informationen können den inertialen Sensoren unter anderem über das GPS zugeführt werden.

In der Tabelle 6.2 sind die im Rahmen des Projektes durch Softwareanpassungen eingebundenen inertialen Meßsysteme aufgeführt.

Hersteller	Sensorbezeichnung
iMAR GmbH, St. Ingbert, Deutschland	iMARhrpy, iMARrlg, DIS
Seatex AS, Trondheim, Norwegen	MRU-H,..., MRU-6
TSS Ltd., Oxfordshire, England	DMS-05, DMS-2
LITEF, Freiburg, Deutschland	LCR-88 (Auswertesoftware von Prof. M. Bäumker, FH Bochum)

Tabelle 6.2: Einbindbare INS

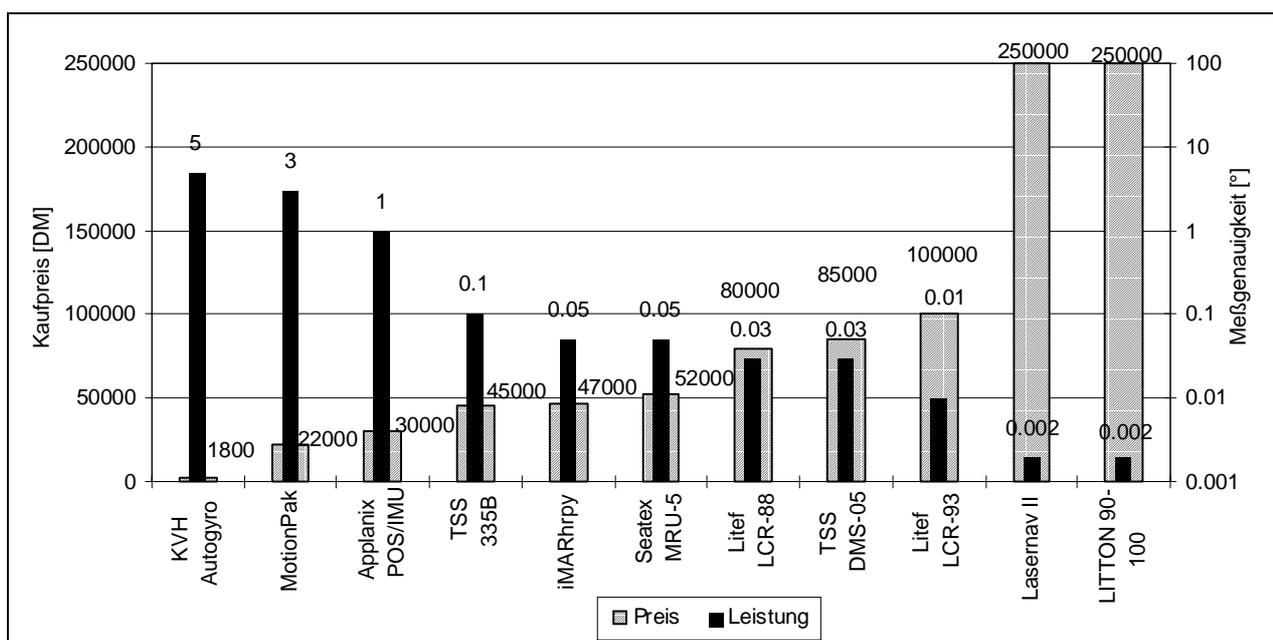


Abbildung 6.6: Preis-/Leistungsverhältnis inertialer Navigationssysteme (Stand Juni 1998)

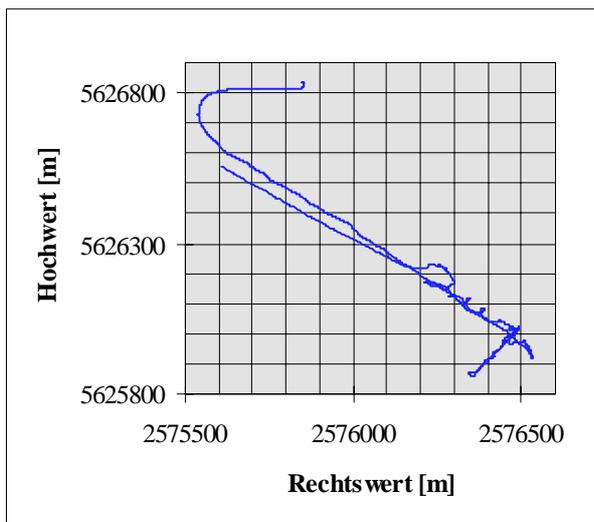


Abbildung 6.7: Meßfahrt vom 02. April 1997, MB „Hamster“

der Firma iMAR und mit dem GPS durchgeführt. Die mit dem INS gemessenen Drehraten um die Achsen des Schiffskordinatensystems (oder des INS-Koordinatensystems) und die gemessenen Beschleunigungen entlang dieser Achsen wurden registriert. Simultan wurden die Positionen von drei an Bord montierten GPS-Antennen aufgezeichnet. Aus diesen Positionen konnten im Postprocessing ebenfalls Drehwinkel und Geschwindigkeiten entlang der Koordinatenachsen bestimmt werden. Diese Daten wurden dann mit den INS-Daten verglichen.

Die Firma iMAR, St. Ingbert, stellte ein inertiales Meßsystem des Typs DIS zur Verfügung. Dieses INS ist mit drei faseroptischen Kreiseln (FOG) und drei Beschleunigungsmessern bestückt. Zur Datenaufzeichnung wurde ein handelsüblicher PC mit DOS-Betriebssystem eingesetzt.

Die BfG stellte drei GPS-Empfänger mit entsprechendem Zubehör zur Verfügung. Es wurden zwei TRIMBLE 4000 SSi und ein ASHTECH Z12-Sensor eingesetzt. Die Ausrüstung umfaßt ebenfalls die entsprechenden Antennen, Stromversorgung und Verbindungskabel. Zur Datenaufzeichnung der Daten vom ASHTECH Z12-Sensor wurde ein portabler PC mit OS/2-Betriebssystem benutzt. Als Software für das Postprocessing wurde GEONAP von der Firma Geo++ verwendet.

Eine vom WSA Köln gefertigte Antennenhalterung ermöglichte die Montage von zwei GPS-Antennen am Heck des Peilbootes. Zusätzlich wurden während der Meßfahrt auf der Referenzstation Bonn des Landesvermessungsamtes (LVerMA) Nordrhein-Westfalen GPS-Daten aufgezeichnet. Abbildung 6.7 zeigt die Schiffspeditionen für jede Sekunde der Meßfahrt.

Das Bordkoordinatensystem wird durch die Schiffslängsachse (positiv in Richtung Bug), eine dazu orthogonale Querachse (positiv in Richtung

Abbildung 6.6 zeigt die ungefähren Kosten für INS verschiedener Leistungsklassen im Frühjahr 1998. Die Preise sind nur als grober Richtwert anzusehen, da Modelländerungen, Wechselkursschwankungen und unterschiedlich teure Komponenten, sowie Zubehör, die Preise beeinflussen.

6.2.1 Untersuchungen mit ungestützten inertialen Lagemeßsystemen

Bestimmung der Schiffsdynamik von Peilschiffen im Binnenbereich

Um die schiffstypischen Bewegungen eines Peilbootes zu erfassen, wurden Messungen mit einem INS

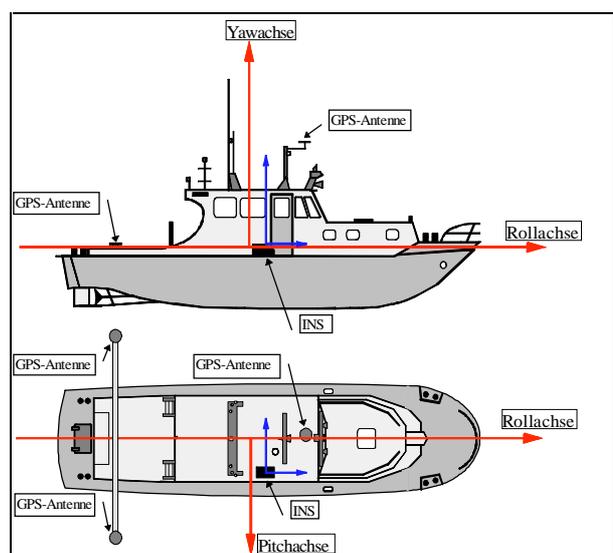


Abbildung 6. 8: Lage des Schiffskordinatensystems, MB „Hamster“

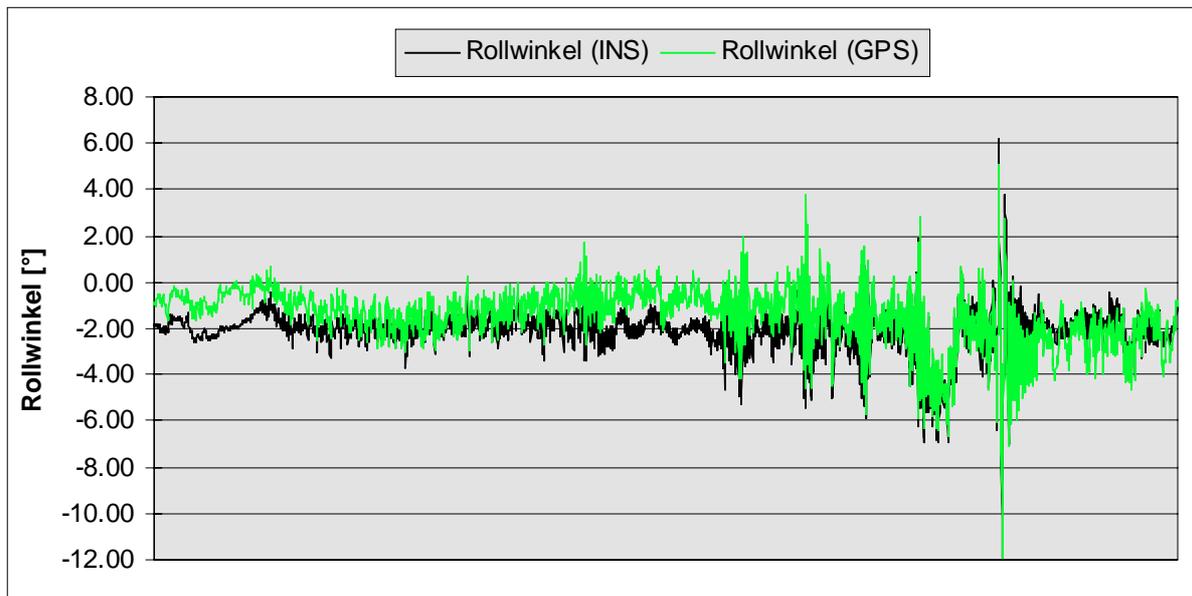


Abbildung 6.9: Rollwinkel aus INS-Messung und GPS-Postprocessing, MB „Hamster“, 02. April 1997

Steuerbord) und eine auf diesen beiden Achsen senkrecht stehende Achse (positiv nach oben) realisiert. Die Anordnung der GPS-Antennen und des INS an Bord des Peilbootes sind in Abbildung 6.8 dargestellt.

In Abbildung 6.9 erkennt man, daß die Amplituden des Rollwinkels maximal 12° betragen, in normaler Fahrt werden jedoch nur $2^\circ - 3^\circ$ erreicht. Die Amplituden des Stampfwinkels, dargestellt in Abbildung 6.10, betragen maximal 2° , in normaler Fahrt werden nur $0,5^\circ - 1^\circ$ erreicht. Die mit dem INS bestimmten Roll- und Stampfwinkel sind mit einer Meßunsicherheit von $0,1^\circ$ (1σ) behaftet. Die Standardabweichungen der Winkel aus dem GPS-Postprocessing liegen bei $0,8^\circ - 1,5^\circ$ (1σ). Die dargestellten Kurven stimmen aber im Trend und in den Amplituden überein. Weitere Untersuchungen bei der Firma iMAR zeigen, daß dieser Bootstyp eine vergleichsweise geringe Bewegungsdynamik besitzt. Die Beschleunigungen waren kleiner als 2 m/s^2 und die Drehraten waren kleiner als

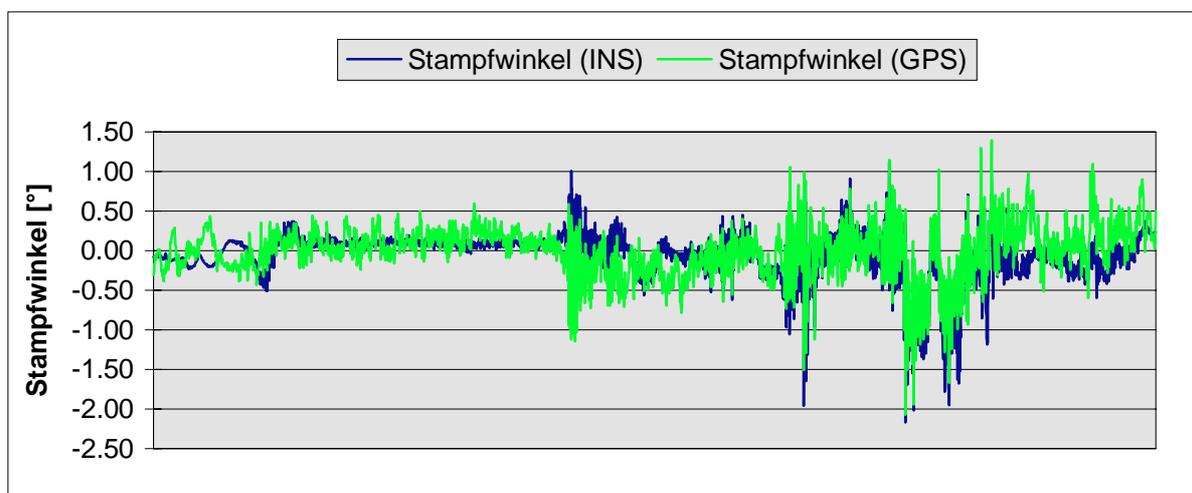


Abbildung 6.10: Stampfwinkel aus INS-Messung und GPS-Postprocessing MB „Hamster“, 02. April 1997

40°/s. Daraus folgt, daß ein INS, das Beschleunigungen von $\pm 20 \text{ m/s}^2$ ($\sim 2 \text{ g}$) und Drehraten von 100°/s verarbeiten kann, bei weitem den Anforderungen, die in diesem Vorhaben postuliert wurden, genügt.

Da die Auswertung der GPS-Messungen aufgrund von Mehrwegeeffekten (Multipath) sehr schwierig war, konnte bei diesen Untersuchungen nicht das hohe Genauigkeitspotential des GPS als Referenz genutzt werden. Es konnten nur überprüft werden, ob die mit dem INS gemessenen Werte plausibel sind und den tatsächlichen Schiffsbewegungen entsprechen.

6.2.2 Untersuchungen mit GPS-gestützten inertialen Lagemeßsystemen

Untersuchung des TSS POS/MV

Das TSS POS/MV basiert auf einer GPS-unterstützten, inertialen Navigationstechnologie. Das System besteht aus je drei orthogonal angeordneten Kreiseln und Beschleunigungsmessern. Zur GPS-Stützung wird das NovAtel-System 3151R/3051 (Einfrequenz, C/A-Code) mit dem GPS Azimuth Measurement Subsystem (GAMS) verwendet. Das GAMS arbeitet ähnlich wie das COMPASS-System mit den Informationen mehrerer Antennen, deren Einmessung bekannt ist, um den Kurswinkel abzuleiten. Mit diesem Kurswinkel wird die inertielle Einheit gestützt, so daß zum einen eine rein autonome Kurswinkelaustrichtung des inertialen Meßsystems vermieden wird und zum anderen die Messungen der Kreisel permanent extern gestützt wird. Die Genauigkeiten des TSS POS/MV 320 werden in der Systembeschreibung wie folgt angegeben:

	GPS-C/A-Code	DGPS-C/A-Code
Horizontale Positions-Fehler	50 m	1 m
Horizontale Geschwindigkeits-Fehler	0,25 m/s	0,1 m/s
Roll- und Pitch-Fehler	0,05°	<0,05°
Kurs-Fehler	0,05°	0,05°
Heave-Fehler	5% des Heaves/5 cm	5% des Heaves/5 cm

Tabelle 6.3: Genauigkeiten des TSS POS/MV 320 (laut *Systemmanual zum POS/MV*)

Das System konnte auf einer Fahrt mit dem VWFS „Deneb“ im August 1997 mit den an Bord verfügbaren Roll-, Pitch- und Heave-Sensor 335B von TSS, dem LCR-88 von Litef und dem GPS-Lagemeßsystem COMPASS von Geo++ verglichen werden.

Als Beispiel der umfangreichen Untersuchungen soll hier nur das Rollen bei „normaler Meßfahrt“ gemessen von den unterschiedlichen Sensoren (Abbildung 6.11) und die Differenzen zwischen den Meßwerten der Sensoren (Abbildung 6.12) exemplarisch dargestellt werden. Es traten keine extremen Ruderlagen auf. Die oben abgebildete Fahrt begann mit einer beschleunigten Fahrt, die dann aufgestoppt wurde (ab Epoche 160). Danach wurde der Kurs korrigiert (ab Epoche 320) und wieder beschleunigt Fahrt aufgenommen. Mit einer Kurve (ab Epoche 500) wurde wieder das ursprüngliche Profil befahren.

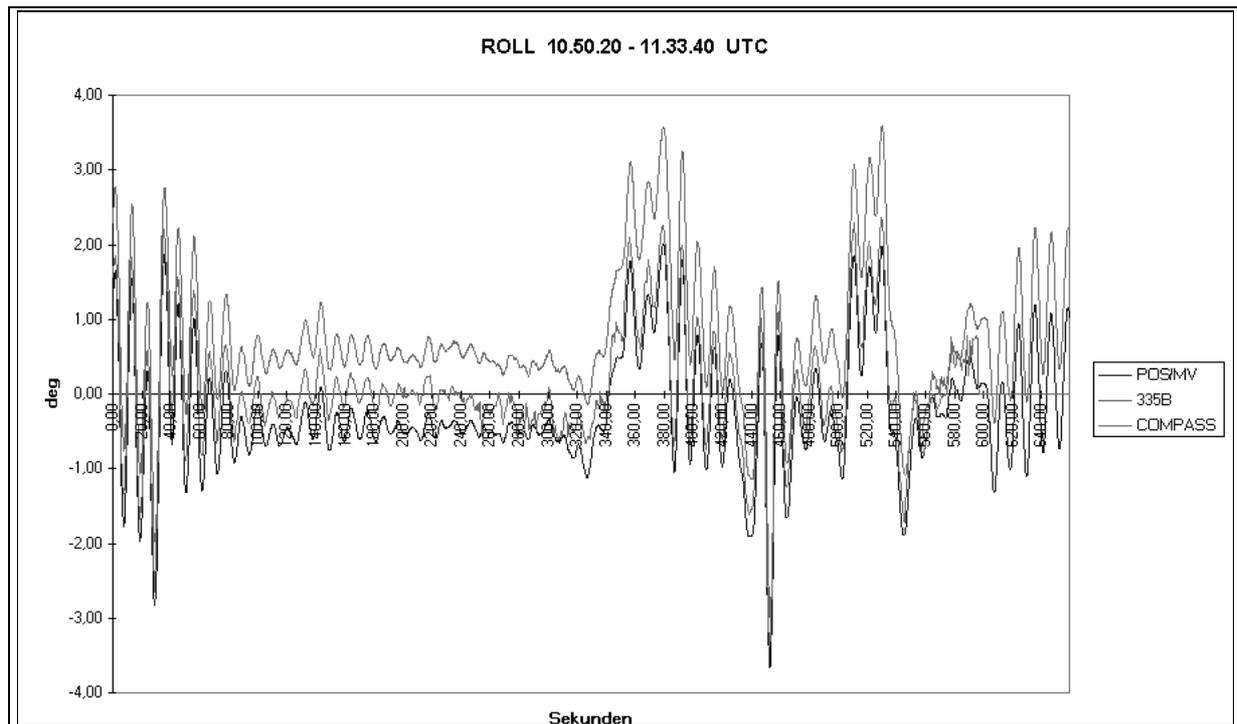


Abbildung 6.11: Rollen bei „normaler Meßfahrt“, VWFS „Deneb“, 20. August 1997

Die unterschiedlichen Niveaus der Werte sind auf die fehlende Abstimmung bei der Ausrichtung zwischen den Systemen zurückzuführen. Die Koordinatenachsen der Sensoren waren nicht streng parallel zueinander.

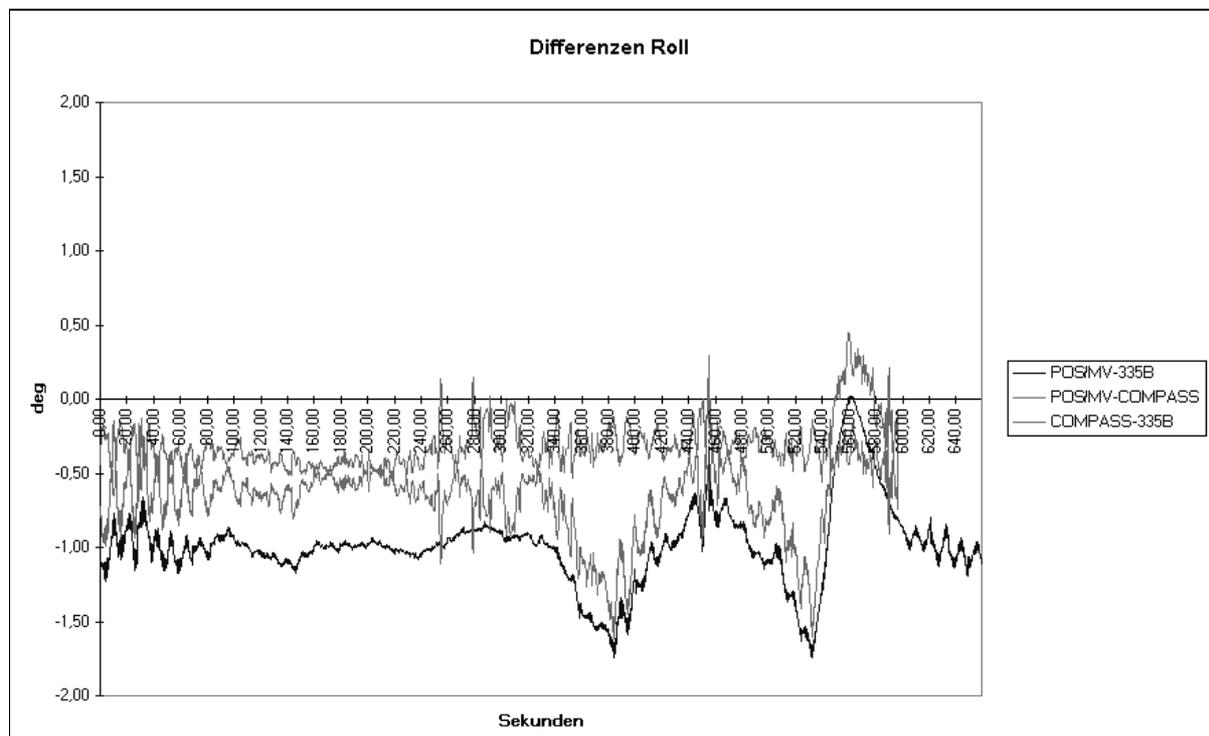


Abbildung 6.12: Differenzen bei der Größe Rollen bei „normaler Meßfahrt“, VWFS „Deneb“, 20. August 1997

Die Schiffsbewegung erreichte Größenordnungen von $\pm 3^\circ$ für die beschleunigten Fahrten und zur Zeit der Kurskorrekturen. Während des Aufstoppens waren nur geringe Rollbewegungen von ca. $\pm 0,5^\circ$ zu erkennen. In Abbildung 6.12 werden die Abweichungen zwischen den unterschiedlichen Sensoren dargestellt. Es zeigte sich, daß die POS/MV-Werte sehr gut zu den COMPASS-Werten passen, die Variationen der Abweichungen lagen hier maximal bei $0,2^\circ$, waren im allgemeinen aber besser als $0,1^\circ$. Die Variationen konnten in den Vergleichen mit den TSS 335B durchaus $\pm 1^\circ$ bis $\pm 0,5^\circ$ erreichen, aber bei ruhigen Verhältnissen auch nur $\pm 0,1^\circ$ betragen.

Es zeigte sich, daß die GPS-Stützung des TSS POS/MV deutliche Vorteile besonders bei größerer Dynamik gegenüber dem TSS 335B aufzeigt. Zusätzliche Beschleunigungen bei Manövern, wie z.B. Kurvenfahrten, können durch die GPS-Stützung kompensiert werden. Die Vorteile inertialer Meßsysteme, wie die höhere Datenrate und die Unabhängigkeit von Abschattungen in Häfen und durch Schiffsaufbauten, können in einem GPS/INS integriertem System voll genutzt werden.

Detaillierte Ergebnisse, auch im Hinblick für den Einsatz auf Vermessungsbooten, sind in einer Diplomarbeit (Eichhorn, 1998) nachgewiesen.

Untersuchung der Genauigkeit der Lagewinkelbestimmung mit dem LCR-88

Im Rahmen der oben geschilderten Untersuchungen auf dem VWFS „Deneb“ wurde auch ein Vergleich zwischen dem inertialen Meßsystem Litef LCR-88 und dem GPS-Lagemesssystem COMPASS vorgenommen. Das LCR-88 wurde hierbei nur mit stand-alone GPS-Positionen gestützt. Weiter gab es auch einen Versuch, die Lagewinkel bei höheren Dynamiken auf einem Beiboot („Deneb 2“) mit den Ergebnissen des TSS POS/MV zu vergleichen. Hier gelang die Stützung aufgrund eines fehlenden PPS-Signals aber nur fehlerbehaftet.

Exemplarisch seien hier die Ergebnisse der Messung auf dem Schiff dargestellt. In Abbildung 6.13

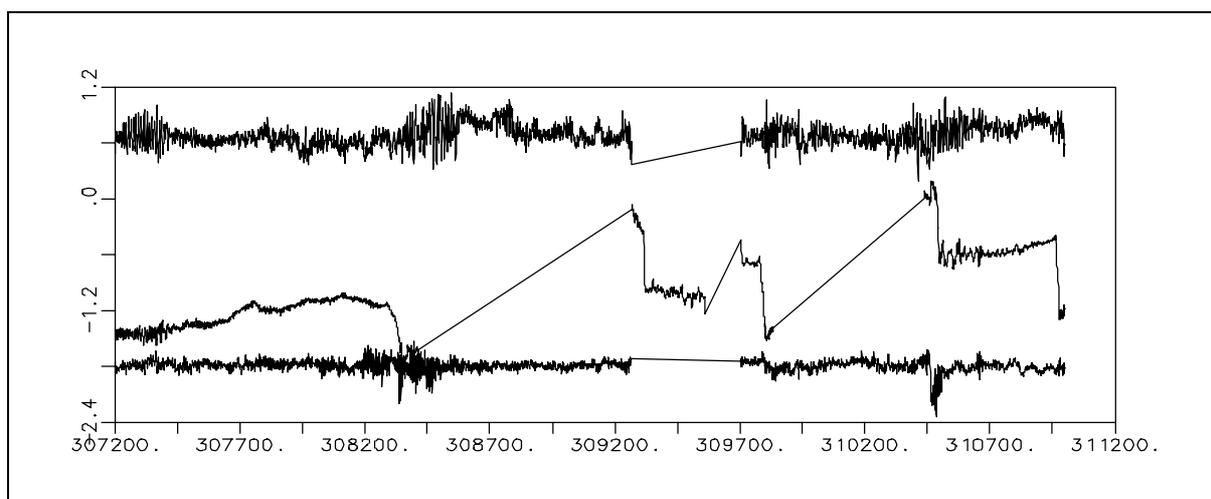


Abbildung 6.13: Lagewinkel Rollen (oben) und Stampfen (unten) in $[\circ]$ mit Kurs (Mitte), VWFS „Deneb“, 20. August 1997

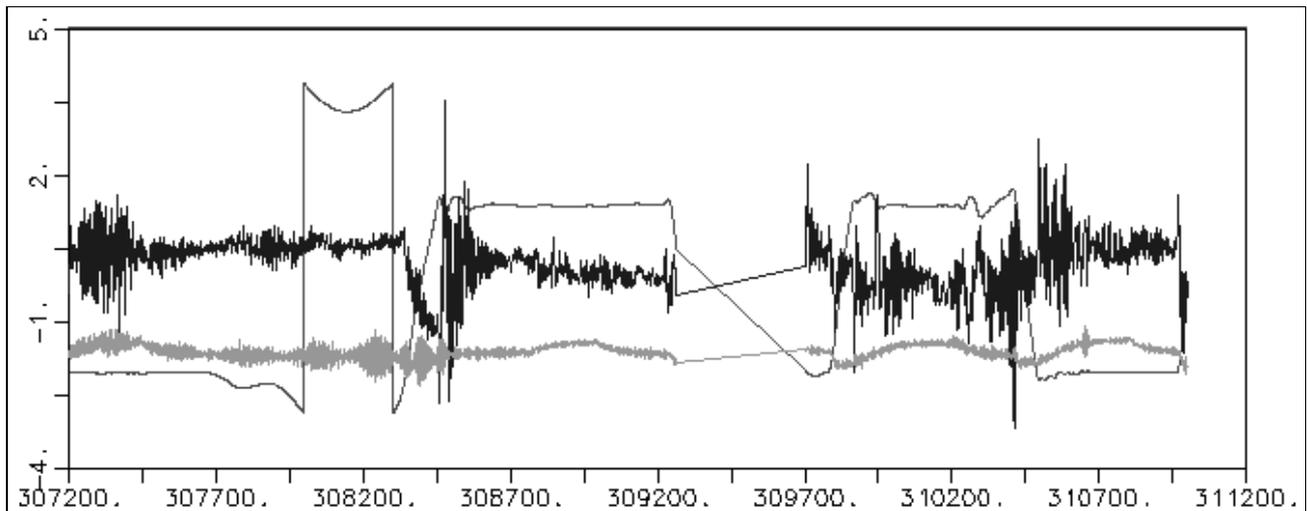


Abbildung 6.14: Abweichungen der Lagewinkel Rollen, Kurs, Stampfen (von oben nach unten) in $^{\circ}$, VWFS „Deneb“, 20. August 1997

sind die gemessenen Lagewinkel dargestellt. Die obere Kurve zeigt das Rollen, das Amplituden zwischen $-2,5^{\circ}$ und $+2^{\circ}$ erreichte, während das Stampfen in der unteren Kurve lediglich zwischen $-2,5^{\circ}$ und -1° variierte. Die mittlere Kurve mit dem Kurs ist nicht in die rechtsseitige Werteskala einzuordnen. Aufgrund von diversen Profil- und Kurvenfahrten in unterschiedlichen Richtungen variierte der Wert über den gesamten Vollkreis von 360° .

Die Abweichungen zwischen COMPASS und dem LCR-88 werden in Abbildung 6.14 wiedergegeben. Erkennbar sind unterschiedlichen Niveaus der Abweichungen. Sie sind auf die nicht erfolgte Abstimmung der Systeme zueinander zurückzuführen, die Systemachsen sind nur näherungsweise parallel zueinander ausgerichtet.

Ebenfalls erkennbar ist die unterschiedliche Streuung der Differenzen. Die ungenauesten Werte erhielt man aus dem Kurs des Inertialsystems. Die Werte des COMPASS Systems sind hier wesentlich plausibler, da der Kurswinkel sehr genau aus dem GPS-Array abzuleiten ist. Die Variationen von $\pm 0,6^{\circ}$ gehen somit zum großen Teil auf die Messung des LCR-88 zurück.

Die Differenzen des Rollwinkels erreichten Werte zwischen $0,5^{\circ}$ und $1,1^{\circ}$, die Differenzen des Stampfwinkels $-1,7^{\circ}$ bis $-2,2^{\circ}$. Die Maximalwerte erschienen jeweils bei der größten Dynamik des Schiffs. Das ist unter anderem auf Synchronisationsprobleme zurückzuführen. Um die Werte miteinander vergleichen zu können, müssen die Lagewinkel aus INS- und GPS-Messung zu einem gemeinsamen Zeitpunkt bestimmt werden. Der Zeitpunkt der Messung war laut Angaben der INS-Synchronisation jedoch um ca. $1/15$ sec verschoben. Bei Lagewinkeländerungen von mehr als $1^{\circ}/s$ ergibt sich so ein Fehler von $0,1^{\circ}$.

Die Ergebnisse der Untersuchungen auf dem Beiboot ergaben Standardabweichungen der Differenzen zwischen POS/MV und LCR-88 Messungen von $0,51^{\circ}$ für eine „normale“ Fahrt.

Weitere Details hierzu sind in Diplomarbeiten (*Brandenburg, 1997*) und (*Eichhorn; 1998*) nachgewiesen.

6.3 Folgerungen zur Lagewinkelbestimmung

Ein wesentlicher Schwerpunkt der Arbeiten war die Integration von Schiffslagewinkeln in das System zur Zentrierung der GPS-Antennenposition. Es wurden Untersuchungen mit Lagesensoren auf GPS-Basis und auf Basis inertialer Systeme vorgenommen. Dabei zeigte sich, daß die Lagewinkel Rollen und Stampfen bei normalen Meßfahrten Größenordnungen von 1° bis 3° erreichen.

Die Lagewinkelbestimmung mit der GPS-Software COMPASS kann als zusätzliches Modul in das System integriert werden. Einzelne Komponenten des Systems sind auch für den Betrieb von COMPASS erforderlich, so zum Beispiel die Empfängermodule. Bestimmt werden die Größen Kurs, Rollen und Stampfen. Die Genauigkeit des COMPASS-Systems ist im besonderen Maße abhängig von der Länge der Basislinien, die sich aus dem Aufbau des Antennenarrays ergeben. Eine Genauigkeit von $0,1^\circ$ ist mit Zwischenantennenstrecken mit ca. 2 m Länge möglich, die im Rahmen des Vorhabens beste Genauigkeit ist mit einer Basislänge von 10 m mit ca. $0,03^\circ$ erreicht worden.

Die Genauigkeit inertialer Meßsysteme ist im wesentlichen abhängig von der Qualität der verwendeten Beschleunigungsmesser und Kreisel. Das Preis-/Leistungsverhältnis der Systeme ist auf Basis einer Marktanalyse in Kapitel 6.2 dargestellt. Üblicherweise werden bei Geräten mit Genauigkeiten von $0,1^\circ$ und schlechter nur die Lagewinkel Rollen und Stampfen und für hydrographische Auswertungen auch der Hub bestimmt (z.B. TSS 335B). Eine Kursbestimmung kann mit diesen Systemen nur mit wesentlich schlechteren Genauigkeiten (einige $^\circ$) oder überhaupt nicht erfolgen. Sensoren mit einer besseren Genauigkeit sind im allgemeinen recht teuer. Als Vorteile inertialer Meßsysteme sind die hohe Datenrate (50 Hz und mehr) und die hohe Verfügbarkeit der Meßwerte zu nennen.

Es wurden verschiedene Sensoren der mittleren Leistungsklassen auf ihre Verwendung im System untersucht. Die angegebenen Genauigkeiten von $0,1^\circ$ und besser konnten in den Anwendungen besonders bei höherer Dynamik teilweise nicht bestätigt werden. Sehr gute Ergebnisse wurden mit dem neu entwickelten System TSS POS/MV 320 erreicht. Das POS/MV 320 integriert GPS-Messungen besonders zur Kurswinkelbestimmung und kann so viele Schwächen inertialer Meßeinheiten kompensieren. Die Genauigkeiten der Lagewinkel wurden mit Genauigkeiten besser als $0,1^\circ$ gemessen.

Die Notwendigkeit der Lagebestimmung muß für jede Anwendung überprüft werden. Bei geringen Abständen zwischen Antenne und zu positionierender Einheit (z.B. Schwinger), besonders in den horizontalen Komponenten, und bei geringen Bewegungsraten kann unter Umständen auf die Bestimmung verzichtet werden. Für hochpräzise Anwendungen jedoch ist die Lagebestimmung ratsam und wird durch Schnittstellenanpassungen für verschiedene Sensoren im entwickelten Produkt unterstützt. Weitere Sensoren können über weit verbreitete NMEA-Formate über serielle Schnittstellen hinzugeschaltet werden.

7 Weitere Verfahren zur Positionsbestimmung

Bei der Positionsbestimmung mit Präzisem Differential GPS (PDGPS) ergeben sich systembedingt für navigatorische Anwendungen mehrere Nachteile. Die wesentlichen Nachteile sind:

- die Abhängigkeit von der Satellitenverfügbarkeit (Störeinflüsse durch Abschattungen in Häfen und durch Schiffsaufbauten),
- das für navigatorische Anwendungen hohe Datenalter von bis zu 3 sec und
- die geringe Datenrate (5-10 Hz möglich, üblicherweise aber 1 Hz).

Für die beiden letztgenannten Punkte sind auch GPS-seitig verschiedene Lösungsansätze denkbar, die jedoch noch nicht realisiert werden konnten. Verluste der Satellitensignale durch Abschattungen können jedoch kaum vermieden werden. Das im BMBF-Vorhaben entwickelte Meß- und Auswertesystem erlaubt es, weitere Positionssensoren zur Überbrückung von GPS-Datenlücken zu integrieren, sofern die notwendigen Informationen in einem definierten Format an einer RS-232 Schnittstelle bereitgestellt werden. Als mögliche unterstützende Positionierungssysteme kommen vorhandene Funknavigationssysteme in Betracht, sowie inertielle Navigationssysteme, die in der Lage sind zusätzlich zu den Orientierungsparametern (Rollen, Stampfen und Kurswinkel) Informationen über Position und Geschwindigkeit bereitzustellen.

Einige der in der Seefahrt gebräuchlichen Navigationssysteme, sollen kurz auf ihre Tauglichkeit hinsichtlich der Nutzung in diesem Vorhaben angesprochen werden.

Das TRANSIT GNSS basiert auf der Messung von Dopplersignalen von Satelliten. Es gilt als Vorgängersystem des GPS. Das Satelliten-Navigationssystem TRANSIT wurde am 31. Dezember 1996 abgeschaltet.

Weiterhin nicht mehr betrieben werden die Funknavigationssystem SYLEDIS und OMEGA. Die DECCA-Ketten werden in naher Zukunft eingestellt werden oder sind schon eingestellt. Sie werden vielfach durch LORAN-C ersetzt. Auch die Funkfeuer werden zur Jahrtausendwende keine Rolle mehr spielen. Auf eine Beschreibung soll hier verzichtet werden.

Somit bleiben für eine nähere Betrachtung das von der Russischen Föderation betriebene GLONASS-Satellitenpositionierungssystem und das Funknavigationssystem LORAN-C übrig.

Die Untersuchung der Nutzung von inertialen Navigationssystemen ist ein Bestandteil des Vorhabens und in Kapitel 6.2 eingehend behandelt worden.

7.1 Weitere Möglichkeiten der Positionsbestimmung

Die im folgenden beschriebenen Verfahren sind nicht im Rahmen des Vorhabens untersucht worden. Eine Einbindung in das System ist jedoch über definierte NMEA-Schnittstellen möglich, soweit sie von den Sensoren geliefert werden.

GLONASS

Das GLONASS-System (englische Übersetzung: GLObal NAVigation Satellite System) wird von den Russischen Weltraum-Streitkräften (russische Abkürzung: VKS) als Systemoperator für die Regierung der Russischen Föderation betrieben. Bei vollem Ausbau besteht das Raumsegment aus 24 Satelliten (21 ständig operabel, 3 Reserve). Das Konzept ähnelt dem des amerikanischen GPS, jedoch beziehen sich die Messungen räumlich und zeitlich auf unterschiedliche Systeme. So beziehen sich die GPS-Messungen auf das WGS84 und als Zeitreferenz wird die GPS-Systemzeit verwendet. GLONASS hingegen greift auf das System PZ-90 und die Moskauer UTC-Zeit zurück. Transformationsansätze zwischen den Systemen sind in der Entwicklung. Bei der Signalstruktur ist als wesentlicher Unterschied die je nach GLONASS-Satellit differierenden Meßfrequenzen zu nennen. Die Genauigkeiten im Stand-Alone-Betrieb sind besser als die des GPS, da die Signale des GPS üblicherweise systembedingt künstlich verschlechtert werden (Selective Availability, Anti-Spoofing). Derartige Systemsicherungsmaßnahmen werden beim GLONASS System nicht durchgeführt. Die Sichtbarkeit der Satelliten ist aufgrund der höheren Inklination der Satellitenbahnen für Bereiche nördlich des 50. Breitenkreises generell günstiger als die des GPS. Hierzu zählen insbesondere die deutschen Küstenregionen.

Das GLONASS-System lief laut Untersuchungen der DLR (*Zarraoa et. al. 1997*) in den Jahren 1995-1997 stabil. In einer Mitteilung des russischen Verkehrsministerium aus dem Jahre 1996 (*Tsakh 1996*) wurde sowohl der freie Gebrauch für zivile Nutzer als auch der Betrieb des Systems mindestens bis zum Jahr 2010 garantiert (ähnlich wie bei dem GPS-System).

Derzeit besteht das Problem, daß das bereits als operationell erklärte System nicht mehr 24 Satelliten, sondern zum Stand am Anfang Juni 1998 nur 12 bis 13 Satelliten operabel verfügbar hat. Weitere Starts von Satelliten sind seit längerem geplant, scheitern jedoch an fehlenden finanziellen Mitteln seitens der russischen Betreiber. Bei einem Neustart werden gleichzeitig immer 3 Satelliten in die Umlaufbahnen befördert. Mit der Weiterentwicklung des Raumsegments ist zu rechnen. Diverse Empfängerentwicklungen in der jüngsten Zeit kombinieren GPS und GLONASS (z.B. Ashtech GG24-Empfänger).

Somit kann die Nutzung des GLONASS unter bestimmten Voraussetzungen die Leistung der Positionierung mit Satelliten verbessern. Das Gesamtsystem wäre aber weiterhin von der Sichtbarkeit der Satelliten und dem Empfang von RTCM-Korrekturdaten abhängig, und Datenlücken, die z.B. beim Durchfahren von Brücken auftreten, wären zwar kleiner aber nicht gänzlich zu vermeiden.

Eine GPS/GLONASS-Integration ist von der Firma Geo++ GmbH auf Basis der im System integrierten Kernmodule entwickelt worden, aber diese Entwicklung war nicht Bestandteil des Vorhabens. Seitens der SAPOS-Referenzstationenbetreiber liegt noch kein einheitliches Konzept zur Einbindung von GLONASS vor.

LORAN-C

LORAN-C (LONg Range Navigation) ist ein gepulstes Radionavigationssystem für horizontale Koordinatenkomponenten. Das System wurde vom US-Verteidigungsministerium entwickelt und ist nach 20 Jahren rein militärischer Nutzung seit 1974 für zivile Anwendungen verfügbar (nach *ODIN*

1996). Nachdem die militärische Nutzung aufgegeben wurde, wurden die außeramerikanisch betriebenen Stationen den jeweiligen Staaten zur Verfügung gestellt, in denen die Sender stehen.

In Nordeuropa führte dies zur Bildung einer nationalen Arbeitsgruppe unter norwegischer Leitung, die 1985 die Empfehlung aussprach, das LORAN-System unter multinationaler Regie auszubauen (BSH 1997). Zur Abdeckung der nordeuropäischen Meere sollen nunmehr vier Ketten aus Sendestationen ausgebaut werden. Für eine zusätzliche Abdeckung der Ostsee wird auch ein Nebensender der russischen CHAYKA-Kette 8000 verwendet. CHAYKA ist ähnlich aufgebaut wie das LORAN-System. Die Zusammenfassung der LORAN-C Ketten in Nordwest-Europa trägt die Bezeichnung NELS (*Northwest European Loran-C System*).

Folgerungen

Der Einsatz von hybriden GPS/GLONASS-Empfängern ist nur sinnvoll, wenn durch die höhere Anzahl nutzbarer Satelliten die Zeit der Mehrdeutigkeitslösung entscheidend verkürzt werden könnte. Dazu wären aber in erster Linie Zwei-Frequenz-GLONASS-Empfänger in der Lage. Solche Empfänger werden aber zur Zeit nur in geringen Stückzahlen gebaut und stehen damit nicht jedem Nutzer zur Verfügung. Auch mit GPS/GLONASS-Empfängern treten Datenlücken auf, die mit anderen, nicht-satellitengestützten Verfahren zu überbrücken wären. Eine Integration von GPS und GLONASS ist in das im Vorhaben entwickelte System mit einer entsprechend erweiterten Version des Kernmoduls möglich.

LORAN-C kann für die Seeschifffahrt als Ergänzung oder Ersatz von GPS dienen. Es werden Positionsgenauigkeiten von etwa 15 m erreicht. Diese Genauigkeit reicht für die im Vorhaben gestellten Anforderungen nicht aus. Es gibt aber Ansätze, das LORAN-C Funksignal als Träger für GPS-Korrekturdaten zu nutzen, so daß die eingeschränkte Nutzung von SAPOS-Referenzstationen an der Küste zum Teil ausgeglichen werden könnte.

7.2 Untersuchung der Genauigkeit der Positionsbestimmung mit inertialen Sensoren

Durch die Einbindung von Positionsinformationen von inertialen Meßsystemen in das Meß- und Auswertesystem sollen eventuelle Positionslücken, die durch die Abschattung des Satellitensignals oder des RTCM-Korrekturdatensignals entstehen, gefüllt werden. Dieses ist nicht explizit in der Vorhabenbeschreibung gefordert, aber aufgrund sinkender Preise bei steigender Performance der inertialen Meßsysteme ist eine nähere Betrachtung auch im Rahmen des Vorhabens angebracht.

Inertiale Navigationssysteme haben zumeist den Nachteil, daß die Genauigkeit der Positionsbestimmung aufgrund von Kreiseldrift und Beschleunigungsmesserbias schon nach wenigen Sekunden in die Größenordnung von mehreren Dezimetern und bis hin zu mehreren Zehnermetern steigen kann. Bei den Betrachtungen im Rahmen des Vorhabens wurde vorgesehen, die hohe GPS-Positionsgenauigkeit zur Stützung eines INS heranzuziehen. Die Entwicklung eines solchen INS war aber nicht Ziel des Vorhabens. Vielmehr soll die hohe GPS-Genauigkeit den inertialen Meßsystemen zur Stützung zur Verfügung gestellt werden, die wiederum eine INS-Position an das System zurückliefern können.

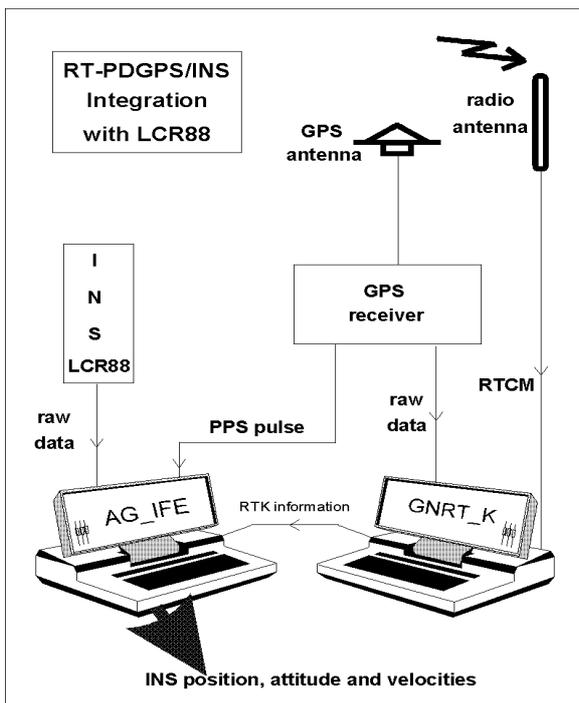


Abbildung 7.1: Aufbau der PDGPS/INS-Integration mit dem AHRS LCR-88 und dem Programm AG_IFE von Prof. M. Bäumker, FH Bochum

Die geringere Drift- und Biasraten aufgrund von anderen Bauelementen (Ringlaserkreisel und Servo-Beschleunigungsmesser) haben, sind in der Preislage um 250.000,-DM zu finden. Es gibt auch neuere Entwicklungen mit günstigeren Modulen, aber schlechteren Eigenschaften.

Das LCR-88 ist ein Kurs-Lage-Referenzsystem (engl. Attitude-Heading-Reference-System AHRS). Ein solches AHRS kann sich üblicherweise nicht autonom nach Norden ausrichten. Hierzu ist eine Initialisierungsphase von 2 min nötig, in der sich das Instrument nahezu in Ruhe befindet, und die genutzt wird, um durch die Schätzung der Erddrehrate eine Kursausrichtung zu erreichen.

Das System besteht aus

- 2 dynamisch trocken gedämpften Kreiseln, jeder mit 2 Freiheitsgraden (K-273)
- 3 Pendel-Beschleunigungsmesser (B-280).

Die Kenndaten des AHRS sind in der Tabelle 7.1 zusammengefasst. Die Genauigkeiten des Rollen und Stampfens werden mit $0,05^\circ$ angegeben, die Genauigkeit der Initialisierung des Kurswinkels mit ca. 3° .

Zur ersten Erprobung wurde am IfE ein Schiffsantennenbewegungssimulator verwendet, ein ca. 2,5 m hoher motorbetriebener Mast, der mit verschiedenen Geschwindigkeiten unterschiedlich stark ausgelenkt werden konnte. Die maximale Auslenkung betrug 25° . Die Geschwindigkeiten erreichten 1 m/s. In hydrographischen Anwendungen ist üblicherweise eine größere Geschwindigkeit zu erwarten. Für Testzwecke war der Aufbau jedoch ausreichend.

7.2.1 Versuche mit dem Litel LCR-88

Es wurden verschiedene Tests mit dem Inertialsystem LCR-88 von Litel vorgenommen. Das INS konnte von der FH Bochum ausgeliehen werden. Professor M. Bäumker von der FH Bochum hat in Absprache mit dem IfE und der Geo++ zu diesem System eine Softwareschnittstelle, das Programm AG_IFE, entwickelt, das eine Stützung des INS durch die GPS-Position erlaubt und die dadurch gestützte INS-Position über eine definierte Schnittstelle ausgibt. Weiterhin gibt das Programm die Lagewinkel aus.

Die Abbildung 7.1 zeigt den Aufbau des GPS-gestützten inertialen Meßsystems, das zur Erprobung herangezogen wird. Die INS-Messungen werden durch den PPS-Impuls eines GPS-Empfängers synchronisiert. Die Rohdaten werden mit Hilfe einer ARINC-Karte (Datenschnittstelle im Format der Aeronautical Radio Inc.) auf einem handelsüblichen PC 486DX33 eingelesen. Der Preis für ein solches System ist, nach Auskunft der FH Bochum, mit 60.000,-DM anzusetzen. Höherwertige INS, die

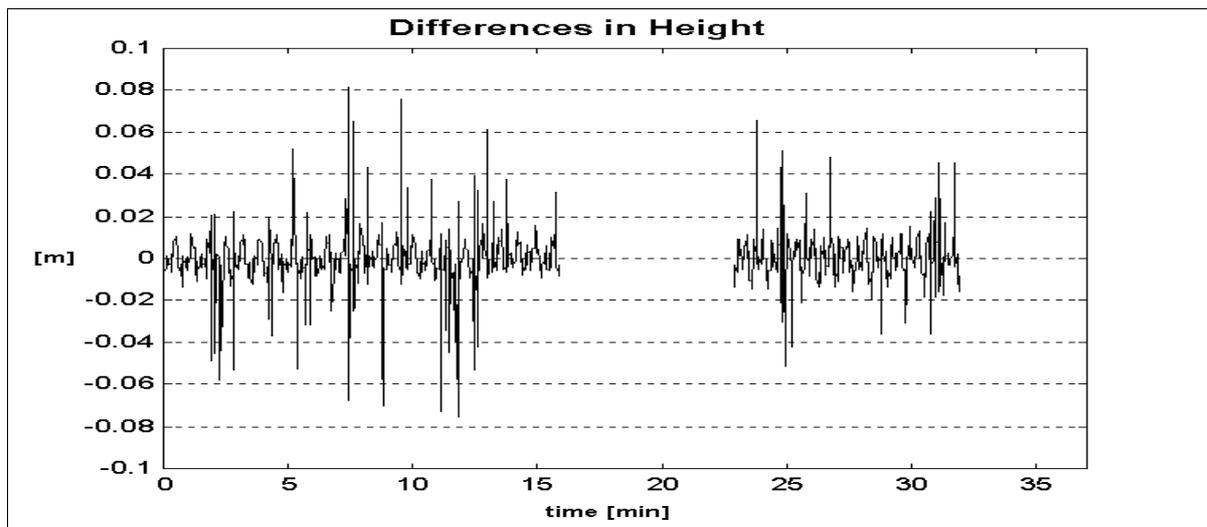


Abbildung 7.2: Differenzen zwischen INS (AG_IFE) und PDGPS (GNRT-K) in der Höhenkomponente; Testmessungen auf Simulator; IfE; 10. Februar 1997

	Kreisel	B-messer
drift/bias	0,3°/h	500 µg
Skalenfaktor	1000 ppm	1000 ppm
Rauschen	0,05°/√h	10 µg
<u>Meßgenauigkeit: (2σ):</u>		
Azimuth	0.5° - 2°	
Rollen und Stampfen	0.2° - 1°	
Drehrate	0.1°/s	
Beschleunigung		0.03 g

Tabelle 7.1: Kenndaten des AHRS LCR-88 von Litef (*Bäumker, 1995*)

Die ersten Ergebnisse der Untersuchungen werden in den Abbildungen 7.2 und 7.3 dargestellt. Es zeigte sich, daß die Abweichungen zwischen den INS- und den PDGPS-Höhen bei geringen Geschwindigkeiten innerhalb weniger Zentimeter lagen. Ein Versuch, die Konstanz der Position nach Abschalten der GPS-Stützung zu ermitteln, zeigte, daß bei diesen Geschwindigkeiten die Unterbrechung der GPS-Stützung die Positionsbestimmung des INS für ca. 10 sec mit ca. 10 cm Genauigkeit hielt.

Die Untersuchungen wurden auf die Positionsbestimmung an Bord eines Vermessungsschiffes ausgeweitet. Dabei kam es in Echtzeit doch zu erheblichen Schwierigkeiten, die mit der Handhabung des INS zusammenhängen. Wie in Abbildung 7.1 zu erkennen ist, ist zur Synchronisation des INS mit der GPS-Zeit ein PPS-Puls notwendig, der vom GPS-Empfänger ausgesendet wird. Der PPS-Puls wurde in über 10 Prozent der Aussendungen nicht im INS-System berücksichtigt. Die Gründe sind wahrscheinlich in der Hardware des genutzten DOS-Rechners zu finden. Das Ausbleiben der Pulse führte dazu, daß das INS nicht gestützt wurde. Derartige Störungen haben für die Bestimmung der Lagewinkel kaum Auswirkungen, jedoch für die Positionsbestimmung. Das Datenalter der INS-Position beträgt nur ein Bruchteil einer Sekunde, während das Datenalter der GPS-Position ca. 3 Se-

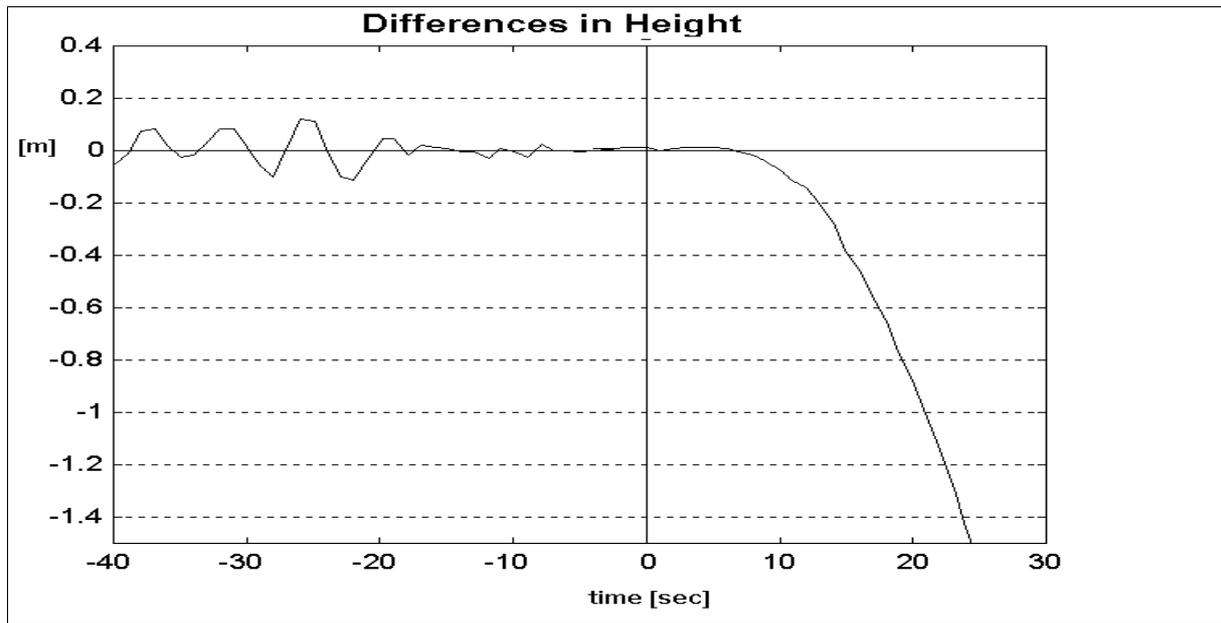


Abbildung 7.3: Differenzen zwischen INS (AG_IFE) und PDGPS (GNRT-K) in der Höhenkomponente; Überbrückungstest auf Simulator; IfE; 10. Februar 1997

kunden beträgt. Demzufolge kann die INS-Position in Echtzeit nur von den 3 Sekunden älteren GPS-Daten gestützt werden (siehe Abbildung 7.4).

In den Abbildungen 7.5 und 7.6 (vergrößerter Ausschnitt von Abbildung 7.5) sind Ergebnisse einer Vermessungsfahrt mit dem VS „Greif“ des WSA Cuxhaven dargestellt. Die Abbildungen zeigen Differenzen zwischen den in Echtzeit mit gestörtem Datenmaterial ermittelten INS-Positionen und einer im Postprocessing mit GEONAP unter Berücksichtigung der mit COMPASS ermittelten Lagewinkel gerechneten Lösung. Die Zwischenantennenstrecke im COMPASS-Aufbau betrug in etwa 2 m, so daß nach den Ergebnissen, die in Kapitel 6 dargestellt sind, bestenfalls eine Genauigkeit von 0.1° erreichbar war. Die INS-Positionen mußten zusätzlich mit den INS-Geschwindigkeiten und den abgespeicherten Datenalter zum PPS-Puls auf die jeweilige volle GPS-Sekunde prädiert werden, um die Werte vergleichen zu können. Die Geschwindigkeit des Schiffes betrug ca. 5 bis 6 m/s. Die INS-Werte wurden lediglich mit einer Datenrate von 1 Hz bestimmt.

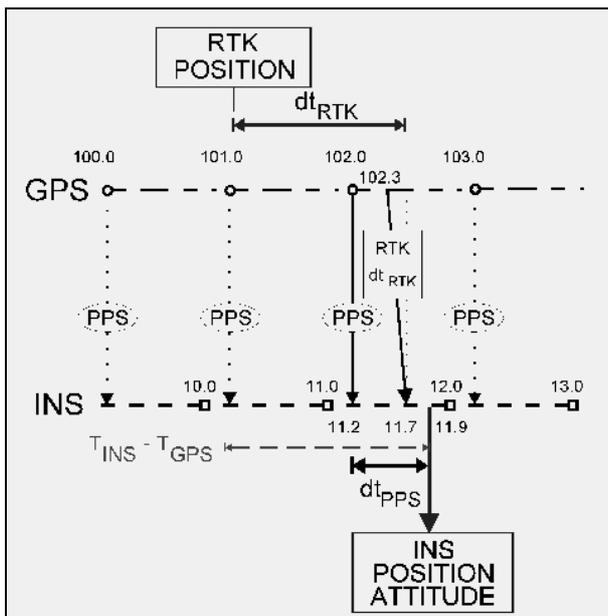


Abbildung 7.4: Zeitsynchronisation zwischen GPS- und INS-Daten

Für die Höhenkomponente ergeben sich größtenteils Abweichungen unterhalb 10 cm. In Fahrtrichtung (untere Komponente: delta-LAT) ergibt sich für den gesamten Bereich eine sich verändernde Drift. Abweichungen in den Komponenten in Fahrtrichtung sind zum großen Teil auf Geschwindigkeitsfehler des INS zurückzuführen, können aber

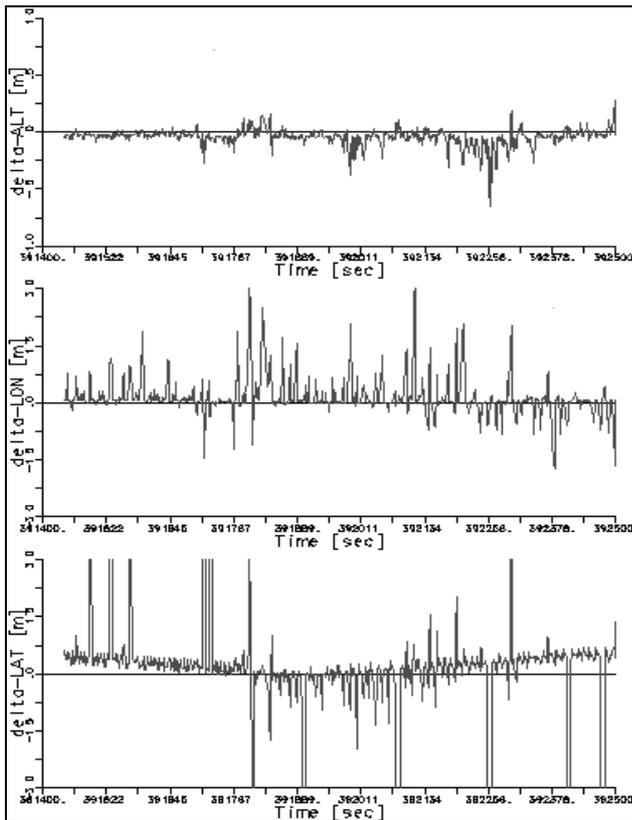


Abbildung 7.5: Differenzen zwischen INS (Echtzeit) und GPS/COMPASS (Postprocessing) Position in [m]; Fahrt mit dem VS „Greif“, 26. März 1998

zen zu können, wurde der oben beschriebene Vergleich mit postprozessierten INS-Daten wiederholt. Die PPS-Puls-Information wurde in den abgespeicherten Rohdaten bestmöglich ergänzt. Mit der von Prof. Bäumker zur Verfügung gestellten Software war es jedoch nicht möglich, ein Datenalter der GPS-Daten von etwa 3 Sekunden zu simulieren, so daß eine Auswertung mit ungestörten Daten lediglich die Ermittlung der Genauigkeit eines in der Sekunde zuvor gestützten INS mit Prädiktion auf die volle GPS-Sekunde zuläßt. Die Differenzen zwischen den beschriebenen Lösungen sind in der Abbildung 7.7 dargestellt. Sie betragen in allen Komponenten weniger als 5 cm.

Um die Leistungsfähigkeit zur Überbrückung von Positionsdatenlücken zu untersuchen, wurde in mehreren Versuchen unterschiedlich lange Datenlücken simuliert. In der Abbildung 7.8, beziehungsweise als Teilausschnitt in der Abbildung 7.9, sind beispielhaft die Abweichungen des INS mit

auch auf eine unzureichende Zeitzuordnung hinweisen. Die Variationen abzüglich der Drift betragen ebenfalls ca. 10 cm für weniger gestörte Daten, können jedoch auch mehrere Meter für stark gestörte Daten betragen. Quer zur Fahrtrichtung (mittlere Grafik in den Abbildungen 7.5 und 7.6) werden zum Zeitpunkt der Störungen Abweichungen etwa 1 bis 3 m sichtbar, in nahezu ungestörten Bereichen werden auch hier die 10 cm Genauigkeit erreicht.

Die Störungen und die geringe Datenrate sind in weniger experimentellen Aufbauten in operationellen, fest installierten Systemen sicherlich zu vermeiden. Um die Möglichkeiten der Positionsbestimmung mit dem INS realistischer abschät-

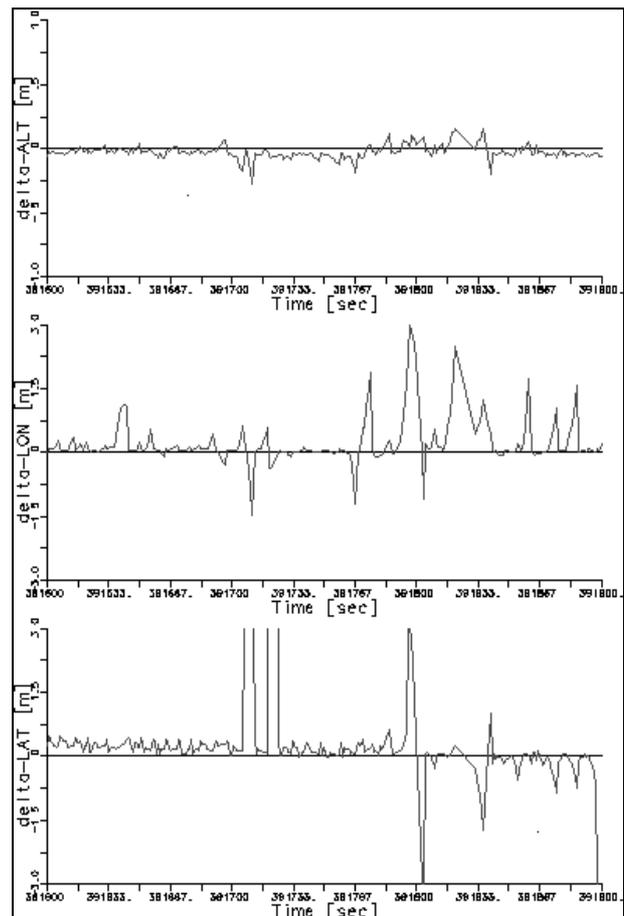


Abbildung 7.6: Differenzen zwischen INS (Echtzeit) und GPS/COMPASS (Postprocessing) Position in [m]; Fahrt mit dem VS „Greif“, 26. März 1998; vergrößerter Ausschnitt von Abbildung 7.5

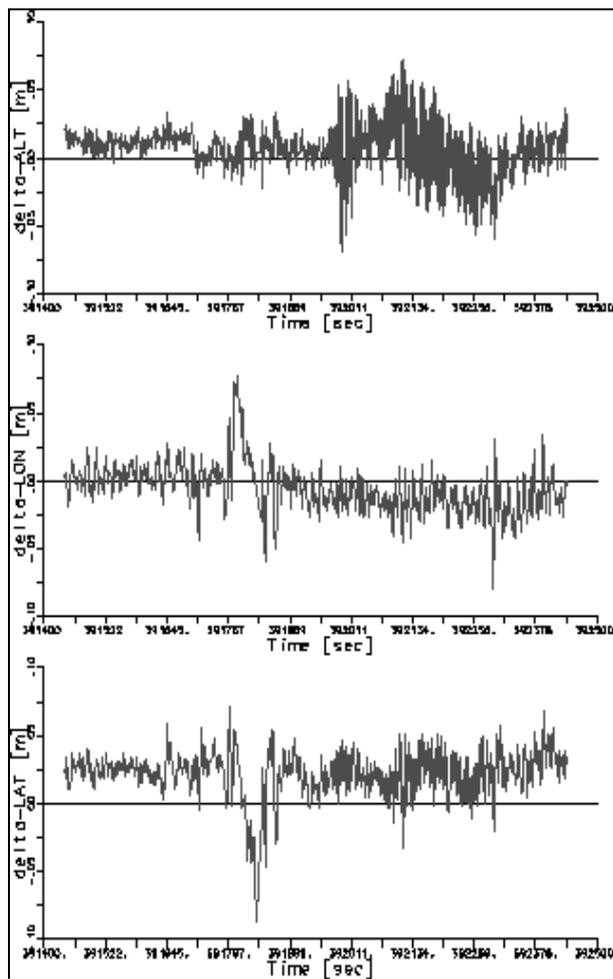


Abbildung 7.7: Differenzen zwischen INS- und GPS/COMPASS-Position in [m]; Postprocessing ohne Simulation von GPS-Datenlücken; Fahrt mit dem VS „Greif“, 26. März 1998

System nur mit einer Rate von 1 Hz erfassbar waren und somit nur wenig zur Bestimmung des Biases des entsprechenden Beschleunigungsmessers beitragen konnten.

Die Ergebnisse der Datenlückenuntersuchung für einen Teilbereich der Fahrt auf der VS „Greif“ mit dem Litef LCR-88 und dem Programm AG_IFE von Prof. Bäumker im Postprocessing sind in der Tabelle 7.2 kurz zusammengefaßt. Die Tabelle zeigt die mittleren Abweichungen, die in Fahrtrichtung um eine Konstante von 2 cm bereinigt wurden. Diese konstante Abweichung resultierte aus der ungenauen Einmessung der Sensoren im Schiffskoordinatensystem.

künstlich geschaffenen GPS-Datenlücken von 10 Sekunden Länge dargestellt. Im wesentlichen erreichen die Abweichungen nach 10 Sekunden ungestützter INS-Beobachtungen im Mittel 18 cm für die Höhenkomponente (obere Grafik), 41 cm quer zur Fahrtrichtung (mittlere Grafik) und 9 cm in Fahrtrichtung (untere Grafik). Die quer zur Fahrtrichtung ermittelten großen Abweichungen lassen sich auf den während der Fahrt unzureichend bestimmten Bias des Beschleunigungsmessers in dieser Richtung zurückführen. Durch die gleichmäßige Ausrichtung der Profile kam es nur durch die Rollbewegungen zu Querbeschleunigungen, die mit dem GPS-

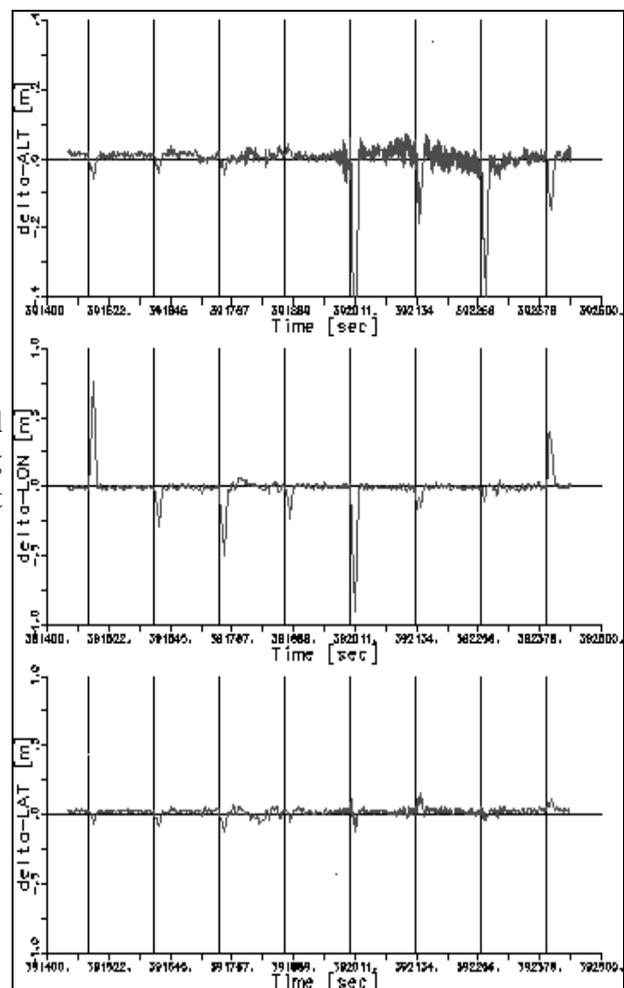


Abbildung 7.8: Differenzen zwischen INS- und GPS/COMPASS-Position in [m]; Postprocessing mit Simulation von GPS-Datenlücken; Fahrt mit dem VS „Greif“, 26. März 1998

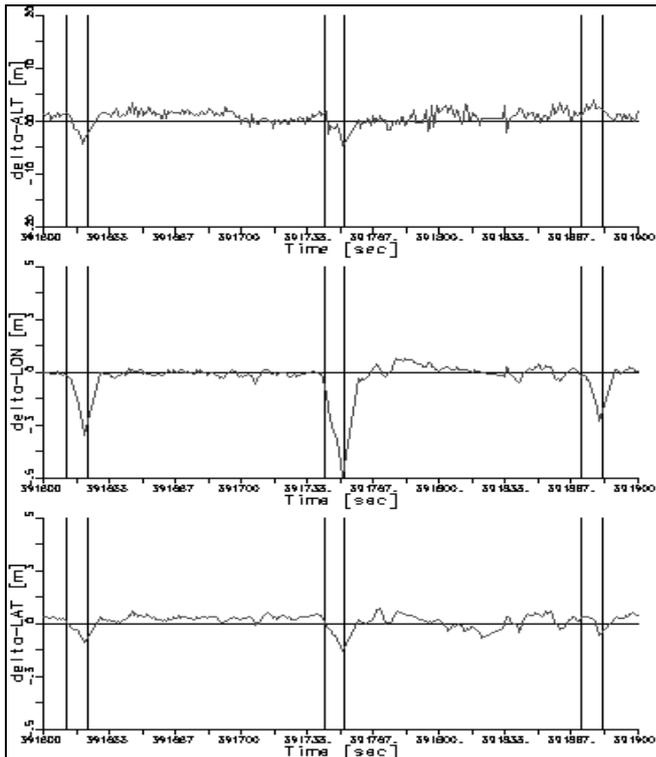


Abbildung 7.9: Differenzen zwischen INS- und GPS/COMPASS-Position in [m]; Postprocessing mit Simulation von GPS-Datenlücken (10 sec); Fahrt mit dem VS „Greif“, 26. März 1998; vergrößerter Ausschnitt von Abbildung 7.8

Aus den stichprobenartig angelegten Untersuchungen können näherungsweise die Möglichkeiten des Litef LCR-88 bei dem ungestörten Einsatz in Echtzeit abgeschätzt werden. Wie bereits oben beschrieben, beträgt das Datenalter der GPS-Beobachtungen im allgemeinen etwa 3 Sekunden. Die mit einem nur geringen Datenalter von weitaus weniger als 1 Sekunde zur Verfügung stehende INS-Position ist nach den obigen Stichproben (Tabelle 7.2 bei 3 sec) in der Höhe und in Fahrtrichtung mit einer Genauigkeit von besser als 10 cm verfügbar. Sollte die GPS-Position dann für 2 Sekunden ausfallen, so kann in der Höhe und in Fahrtrichtung die Position noch mit Dezimetergenauigkeit gehalten werden. Dies ändert sich für die Höhe auch nicht bei 10 Sekunden Datenausfall, in Fahrtrichtung hat sich die Genauigkeit jedoch bereits auf etwa 2 Dezimeter verschlechtert.

Länge der Datenlücke	Höhe	quer zur Fahrtrichtung	in Fahrtrichtung	radial
0 sec	2 cm	1,5 cm	1 cm	2,5 cm
3 sec	6,5 cm	14,6 cm	5,8 cm	18,9 cm
5 sec	9,5 cm	11,7 cm	9,7 cm	20,7 cm
10 sec	9,4 cm	40,8 cm	17,6 cm	49,2 cm

Tabelle 7.2: Auswirkung von GPS-Datenlücken; Simulation im Postprocessing; Fahrt mit dem VS „Greif“, 26. März 1998

7.2.2 Untersuchungen mit dem iMAR-TGAC-RQ

Das hochwertigste Produkt der Firma iMAR GmbH ist ein Triaxial Gyro and Accelerometer Cube (TGAC), der mit Ringlaserkreiseln und Servo-Beschleunigungsmessern ausgestattet ist. Die Stützung kann über DGPS oder Wegmesser, sogenannte Odometer, geschehen. Der Preis für ein solches System liegt bei ca. 250.000,- DM.

Das TGAC-RQ besteht aus

- 3 Ringlaserkreiseln (Honeywell GG1320)
- 3 Servo-Beschleunigungsmesser (Allied Signal QA2000/3000).

Die Kenndaten des TGAC-RQ sind in der Tabelle 7.3 zusammengefasst.

	Kreisel	B-messer
drift/bias	$<0,003^\circ/\text{h} - 0.03^\circ/\text{h}$	$<100 \mu\text{g}$
Skalenfaktor	$<10 \text{ ppm}$	100 ppm
Rauschen	$0,003^\circ/\sqrt{\text{h}} - 0.03^\circ/\sqrt{\text{h}}$	$<90 \mu\text{g}$
<u>Meßgenauigkeit: (2σ):</u>		
Azimuth	$0.05^\circ - 0.3^\circ$	
Rollen und Stampfen	0.05°	
Drehrate	$0.02^\circ/\text{s}$	
Beschleunigung		0.01 g

Tabelle 7.3: Kenndaten des TGAC-RQ von iMAR (*Produktdatenblatt TGAC-RQ, 1998*)

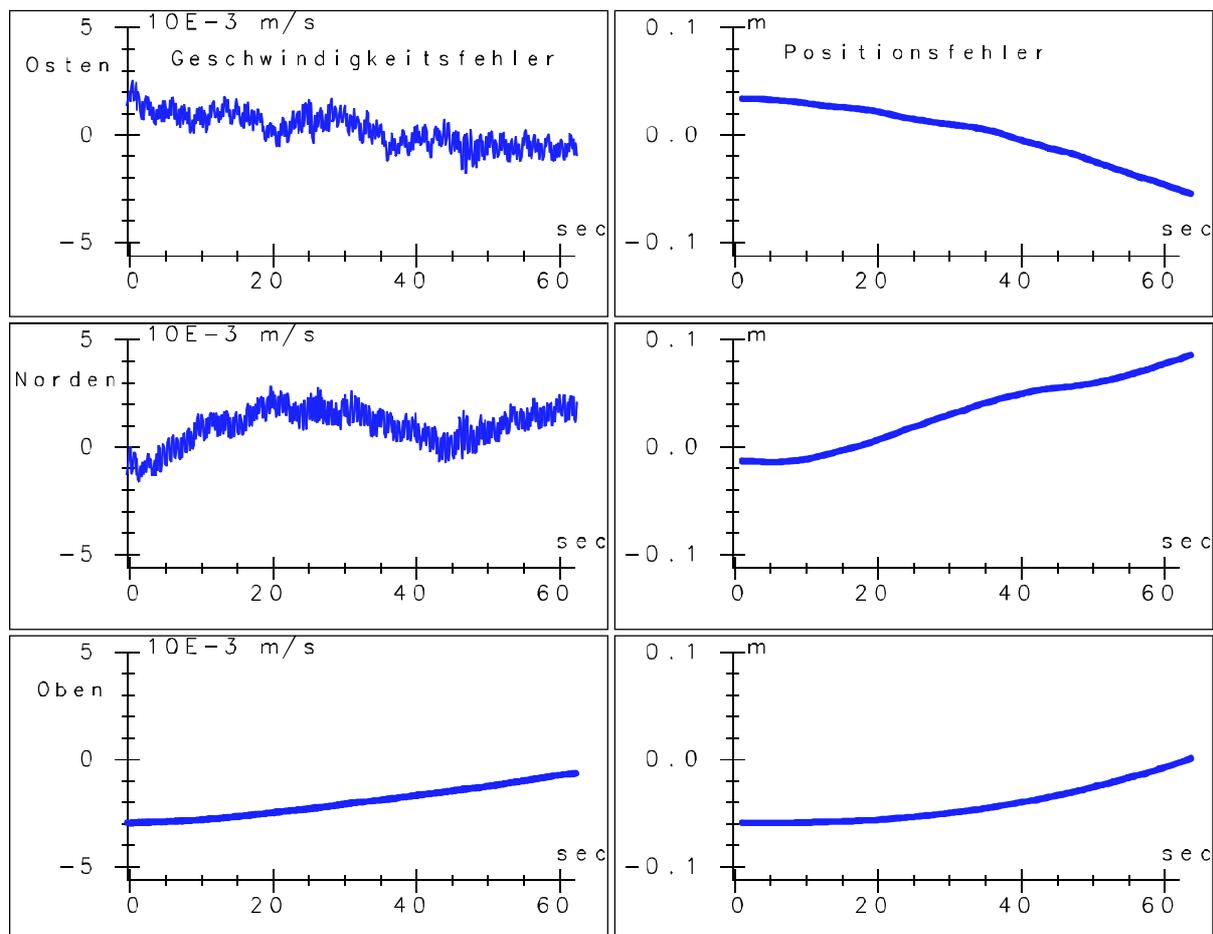


Abbildung 7.10: Simulation von GPS-Datenlücken, Test mit dem TGAC-RQ, iMAR GmbH, 01. Mai 1998

Bei einem Versuch mit dem TGAC-RQ, den die iMAR GmbH durchführte, wurde das Verhalten nach Abschaltung der GPS-Stützung simuliert. Allerdings befand sich das INS dabei nicht in Bewegung, so daß die Ergebnisse nur bedingt repräsentativ sind.

Man kann in Abbildung 7.10 jedoch erkennen, daß die Genauigkeit in allen drei Positionskomponenten innerhalb von 60 Sekunden noch besser als 1 dm war. Die Höhe war sogar noch besser als 6 cm. Dieses Verhalten gibt Grund zu der Annahme, daß mit leistungsfähigen INS durchaus eine Überbrückung von Positionsdatenlücken im Bereich von 1 bis 2 Minuten möglich ist.

7.3 Folgerungen zur Positionsbestimmung mit INS

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die Positionsbestimmung mit INS im erheblichen Maße von der Qualität der eingesetzten Sensoren abhängt. Low-Cost-Systeme werden bei GPS-Datenausfall allenfalls für die Dauer von wenigen Sekunden nach der GPS-Stützung eine hochpräzise Position bereitstellen können.

Mit dem verwendeten Litef LCR-88 ist zu erwarten, daß Datenlücken von 5 Sekunden mit einer Genauigkeit von 10 cm überbrückt werden können. Das LCR-88 mit der Steuerungssoftware AG_IFE kann somit hinsichtlich der Positionsbestimmung gut zur Reduktion des Datenalters zur Navigation und zur Erhöhung der Meßfrequenz bei verminderter Genauigkeit eingesetzt werden.

Mit wesentlich teureren Systemen scheinen längere Überbrückungen möglich zu sein.

8 Einbindung des Systems in hydrographische Anwendungen

Als hydrographische Anwendungen sind alle Tätigkeiten und Programme auf Gewässern zu bezeichnen, die den Einsatz eines hochpräzisen Ortungssystems mit der dreidimensionalen Orientierung benötigen. So werden zum Beispiel alle Ortungsverfahren mit PDGPS die Zentrierung der Antennenposition auf beliebige Punkte (z.B. Schwinger des Echolotes, Hebelarm eines Kranes, etc.) der bewegten Plattform benötigen. Lotungsverfahren mit Fächerecholoten benötigen Informationen von inertialen Meßsystemen zur Bestimmung der Meßrichtung des Echolotsignals (Abbildung 8.1).

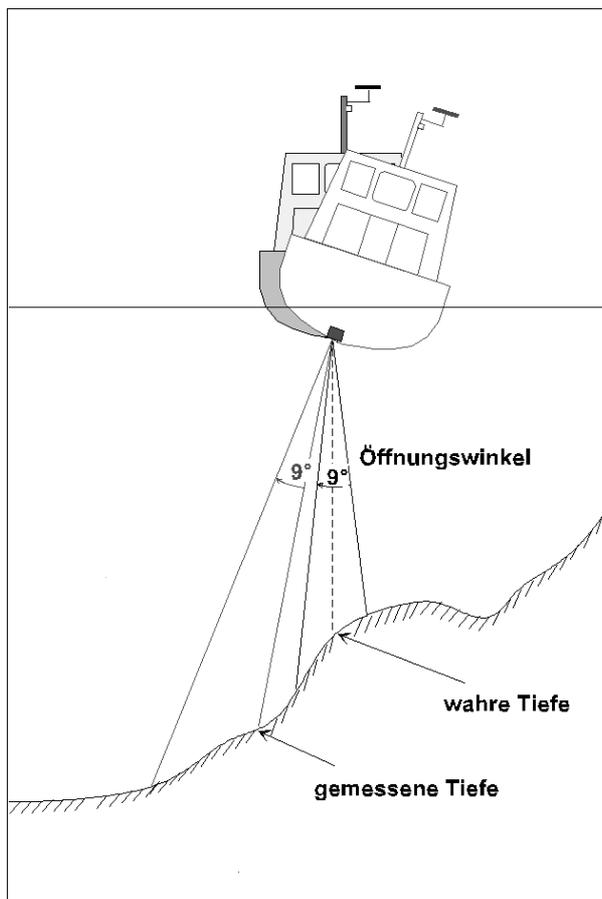


Abbildung 8.1: Einfluß der Schiffsneigung auf die Tiefenmessung

8.1 Einbindung von Sensoren in das System

Die Konzeption des Meß- und Auswertesystems ist so ausgelegt, daß über geeignete Schnittstellen die Anbindung verschiedenster Sensoren zur Positionierung und zur Lagebestimmung möglich ist.

8.1.1 Positionssensoren

Als Hauptsensoren können GPS-Empfänger unterschiedlicher Hersteller und Leistungsklassen genutzt werden. Für die höchste Genauigkeit sollten jedoch geodätische Zweifrequenzempfänger eingesetzt werden. In Tabelle 8.1 sind die Empfängertypen aufgeführt, für die das System in GNRT eine Eingabeschnittstelle realisiert hat. Bei vorhandenem Rohdatenprotokoll können jedoch auch weitere Empfänger eingebunden werden. Kombinierte GPS/GLONASS-Empfänger der Firma Ashtech Inc., Sunnyvale, USA, können ebenfalls genutzt werden.

Hersteller	Empfängertyp
Ashtech Inc., Sunnyvale, USA	Z12 und kompatible, GG24
Spectra Precision AB, Dandyrd, Schweden	Geotracer 2200/2200 RTK
Leica Geosystems Inc., Heerbrugg, Schweiz	SR299, SR399 und kompatible
Navstar Systems Inc., Merrybrook, USA	XR5M und kompatible
Trimble Navigation Limited, Sunnyvale, USA	4000SSi, 7400MSi und kompatible
Carl Zeiss, Jena, Deutschland	RS12, RD12

Tabelle 8.1: Einbindbare GPS-Empfänger

Werden geeignete inertielle Meßsysteme zur Positionierung verwendet (z.B. zur Überbrückung von GPS-Positionsdatenlücken), so können deren Positionsinformationen genutzt werden, wenn sie in einem NMEA-ähnlichen Format, welches im Vorhaben in Absprache mit Prof. M. Bäumker, FH Bochum, entwickelt wurde, über eine serielle Schnittstelle an das System übergeben werden. Dieses Format ist in Tabelle 8.2 beschrieben.

Beschreibung:	Kennung, INS-Zeit in [s], Datenalter zum letzten PPS-Puls in [s], geographische Breite in [°] (dezimal), geographische Länge in [°] (dezimal), ellipsoidische Höhe in [m], Standardabweichung in Nord in [m], Standardabweichung in Ost in [m], Standardabweichung der Höhe in [m], Geschwindigkeit in Nord in [m/s], Geschwindigkeit in Ost in [m/s], Geschwindigkeit in Vertikal in [m/s], Standardabweichung der Geschwindigkeit in Nord in [m/s], Standardabweichung der Geschwindigkeit in Ost in [m/s], Standardabweichung der Geschwindigkeit in Vertikal in [m/s], Prüfsumme
Beispiel:	\$PMBLVS,10.3220,0.960,50.77000000,7.03000001,109.996,22.535,9.443,21.209,-0.00,0.002,-0.003,0.072,0.072,0.062*21

Tabelle 8.2: Formatbeschreibung \$PMBLVS

8.1.2 Lagemeßsensoren

Zur Messung der Orientierungswinkel der bewegten Plattform zum erdfesten Nutzerkoordinatensystem wurden im Vorhaben inertielle Meßsysteme und GPS-Mehrantennensysteme eingesetzt (siehe Kapitel 6). Für einige Anwendungen ist es auch denkbar, nur die Orientierung in der horizontalen Komponente über einen elektronischen Kompaß zu realisieren.

Zu einigen inertialen Meßsystemen (Seatex und TSS) wurden spezielle Anpassungen von der Firma Geo++ durchgeführt. Andere Systeme (iMAR und Litef) wurden vom Hersteller bzw. Eigentümer mit entsprechenden Schnittstellen ausgestattet. Alle im Vorhaben integrierte Geräte sind in Tabelle 6.2 bereits genannt.

Für die Stützung der Seatex- und TSS-Systeme mit GPS, bzw. mit DGPS, stehen Standardformate der National Marine Electronics Association (NMEA) zur Verfügung. Das Litef LCR-88 wurde von Prof. M. Bäumker von der FH Bochum mit einer Steuerungssoftware ausgestattet, die sowohl die Datenausgabe von Kurs- und Lagewinkeln und Positionen und Geschwindigkeiten, sowie die Eingabe von GPS-Informationen zuläßt. Im Auftrag der BfG wurde diese Datenschnittstelle auch bei Geräten der Firma iMAR GmbH implementiert. Das Format für die GPS-Stützung ist in Tabelle 8.3 beschrieben.

Ein elektronischer Kompaß gibt die Kursdaten in den NMEA-Formaten NMEA-HDT, NMEA-VTG und/oder NMEA-VHW aus. Diese Formate können vom System weiterverarbeitet werden. Die Ausgabe der inertialen Meßsysteme erfolgt in firmenspezifischen binären Datenformaten oder ASCII-Zeichenfolgen. Für die Seatex und TSS-Geräte wurde von Geo++ ein Datenschnittstelle zum System geschaffen. Die Ausgabe des Litef LCR-88 der FH Bochum erfolgt in einem NMEA-ähnlichen Datenformat, das auch für die Geräte der Firma iMAR GmbH genutzt wurde. Das Format ist in Tabelle 8.4 beschrieben.

Beschreibung:	Kennung, GPS-Zeit in [s], Datenalter in [s], geographische Breite in [°] (dezimal), geographische Länge in [°] (dezimal), ellipsoidische Höhe in [m], Standardabweichung in Nord in [m], Standardabweichung in Ost in [m], Standardabweichung der Höhe in [m], Geschwindigkeit in Nord in [m/s], Geschwindigkeit in Ost in [m/s], Geschwindigkeit in Vertikal in [m/s], Standardabweichung der Geschwindigkeit in Nord in [m/s], Standardabweichung der Geschwindigkeit in Ost in [m/s], Standardabweichung der Geschwindigkeit in Vertikal in [m/s], Prüfsumme
Beispiel:	\$PGPPLVS,289462.991,2.44,52.3860409,9.7130237,112.36,0.16,0.31,0.19,-0.06,0.02,0.06,0.06,0.01,0.06, *5C

Tabelle 8.3: Formatbeschreibung \$PGPPLVS

Beschreibung:	Kennung, INS-Zeit in [s], Rollwinkel in [°], Stampfwinkel in [°], Kurswinkel in [°], Standardabweichung des Rollens in [°], Standardabweichung des Stampfens in [°], Standardabweichung des Kurses in [°], GPS-Zeit zum Zeitpunkt des PPS-Signals in Wochensekunden [s], Prüfsumme
Beispiel:	\$PMBRPH,10.3220,0.523,-0.666,0.157,0.239,0.239,0.057,304860, *1E

Tabelle 8.4: Formatbeschreibung \$PMBRPH

8.2 Einbindung des Systems in hydrographische Programme

In der Gewässervermessung werden die Daten der separaten Ortungs- und des Lotungsverfahrens von einer hydrographischen Software weiterverarbeitet, die die Messungen der zu unterschiedlichen Zeitpunkten messenden Sensoren integriert und die Schnittstelle zum Benutzer darstellt (*Wirth, 1998*). Verschiedene Anbieter solcher Software (u.a. Navitronic GmbH, Wilhelmshaven; STN Atlas Marine Electronics GmbH, Hamburg; Eiva a/s, Hasselager, DK; QPS B.V. HA Soest, NL). Die Funktionsweise eines hydrographischen Programms wird im folgenden am Beispiel der BfG-eigenen Entwicklung HYMAS erläutert..

HYMAS

Im Rahmen eines Pilotprojektes wurden von der BfG seit 1994 die Einsatzmöglichkeiten von Differential GPS (DGPS) und Präzisem Differential GPS (PDGPS) als Ortungssystem in der Gewässervermessung untersucht (*Brüggemann, 1995*). Es wurde ein Peilsystem entwickelt, das zur Prüfung der Verkehrssicherheit und der Unterhaltung der Wasserstraßen dient.

Zur Integration der verschiedenen Sensoren zur Ortung (GPS, Tachymeter), Lotung (Echolot, Peilrahmen, etc.) und Orientierung (Kompaß, Inklinometer, inertielle Meßsysteme) wurde das Programmpaket HYMAS (**HY**drographisches **Meß-** und **Auswerte**System) entwickelt. Es kann weiterhin auch gewässerkundliche Daten, wie mittlere Wasserstände, Lage der Fahrrinnen und weitere nautische Informationen vorhalten und verarbeiten. Diese Informationen werden durch die Darstellung einer digitalen Wasserstraßenkarte visualisiert, die der Schiffsführer zugleich als Navigationshilfe nutzen kann.

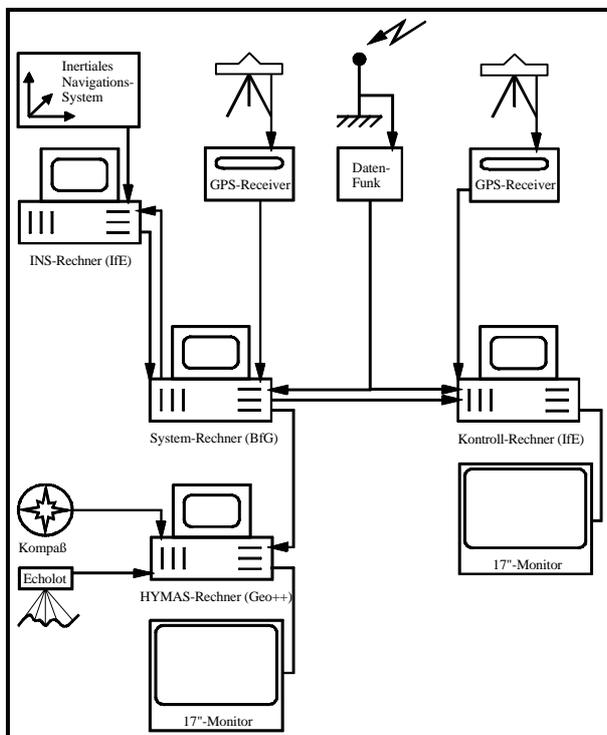
Die Einbindung von Bestandsdaten der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV), wie Regelquerprofile, mittlere Wasserstände, Lage der Fahrrinnen und Streichlinien, ist über die Einheitliche Daten-

schnittstelle (EDS) durch das Schlüsselzahlenformat (SZ-Format) gegeben. Über EDS wird auch der Datenfluß zu den TIMPAN-Archiv Daten bei den Wasser- und Schifffahrtsämtern sichergestellt. Topographische Informationen werden der Digitalen Bundeswasserstraßenkarte (DBWK) entnommen (Wirth, 1995).

Bei der Systementwicklung wurde auf Wirtschaftlichkeit, Vollständigkeit, Meßgenauigkeit und Integrität besonders geachtet. Die Wirtschaftlichkeit hydrographischer Vermessung ließ sich durch die Vereinfachung von Meßverfahrensabläufen realisieren. Zur Vollständigkeit gehört das Erfassen und Plausibilisieren aller Meßdaten vor einer eventuellen Datenreduktion. Die Meßgenauigkeit und Zuverlässigkeit sollte durch Kontrolle aller Meßwerte mit Methoden der Statistik garantiert werden, und die Integrität wurde durch die Erhöhung der Verfügbarkeit durch redundante oder integrierte Sensoren gewährleistet (Wirth, 1998).

Die Qualitätssicherung erfolgt durch eine Reihe von Maßnahmen, die während und nach der Messung ansetzen. Während der Messung wird das Ortungssystem ständig überprüft, im Falle von GPS werden die Parameter Satellitenanzahl, Korrekturdatenempfang und Genauigkeit überwacht. Die Tiefenmessung wird auf die Parameter Mindesttiefe, Echolotfunktion und Plausibilisierung der Beschickung geprüft. Nach der Messung werden Positionen mit zu großer Querabweichung rechnerisch eliminiert. Über die Spurdarstellung besteht die Möglichkeit die Positionen der Meßfahrt nochmal visuell zu prüfen. Ein Geländemodell mit integriertem Hypothesentest ermöglicht die Suche und Elimination von Fehlmessungen des Echolotes.

8.3 Erprobung des Systems in praxisnaher Umgebung



Um die Praxisreife des im Vorhaben entwickelten Systems einer breiten Öffentlichkeit zu präsentieren, hatten die BfG und das IfE am 09. Dezember 1997 zu einer Informationsveranstaltung in Cuxhaven eingeladen (siehe Kapitel 2.3).

Die Vorbereitungen zu dieser Veranstaltung vom 04. und 05. Dezember 1997 bei der Geo++ GmbH und am 08. Dezember 1997 beim WSA Cuxhaven konnten genutzt werden, um reichhaltiges Datenmaterial zu sammeln und die Software intensiv zu testen.

Das System wurde am 08. Dezember 1997 an Bord des VS „Greif“ installiert. Der Aufbau ist in Abbildung 8.3 skizziert, wobei die Hardware nur zu Demonstrationszwecken so konfiguriert war. Alternativ wäre auch eine Konfiguration mit nur einem Rechner möglich.

Abbildung 8.2: Systemaufbau zur Meßfahrt, Cuxhaven, 08. und 09. Dezember 1997

Es wurden zwei ASHTECH-Z12 GPS-Empfänger eingesetzt. Das inertielle Navigationssystem (INS)

war das Litef LCR-88. Die Personal Computer wurden von der BfG, dem IfE und Geo++ bereitgestellt. Die GPS Antennen waren auf der Davidbrücke am Heck des Schiffes montiert, wobei eine Antenne zu dem INS zwangszentriert war und die zweite Antenne im INS Koordinatensystem aufgemessen wurde. Zur PDGPS-Ortung wurde der Korrekturdatenfunk der Station Cuxhaven verwendet, die im Rahmen des Satellitenpositionierungsdienstes der deutschen Landesvermessung (SAPOS) von der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) betrieben wird.

Folgende Software wurde installiert:

- GNNET-RTK Echtzeit GPS-Software zur hochpräzisen Positionsbestimmung (Geo++)
- HRP_IN Datenschnittstelle zum INS (Geo++)
- GNATTI Modul zur Stützung, Prädiktion und Integration von GPS- und INS-Daten (Geo++)
- SOLDIFF Hilfsprogramm zur Darstellung von Positionsdifferenzen in Echtzeit (Geo++)
- GNMAP Hilfsprogramm zur Darstellung der Schiffsposition auf einer digitalisierten Karte (Geo++)
- HYMAS Hydrographisches Meß- und Auswertesystem zur Datenerfassung und Qualitätskontrolle von satellitengestützten Ortungsdaten und Echolotdaten (BfG)

In dem INS-Rechner wurden die ankommenden Daten des Litef LCR-88 verarbeitet und aufgezeichnet. Die Positions-, Geschwindigkeits- und Statistikinformationen wurden mit dem Modul HRP_IN in den Systemrechner gelesen. Dort wurden auch die GPS Daten des ersten Empfängers mit der Software GNNET-RTK verarbeitet und mit dem Programm HYMAS visualisiert. Mit dem Modul GNATTI wurde die integrierte INS/GPS-Lösung auf die zweite GPS-Antenne projiziert. Diese projizierte Lösung wurde an den Kontrollrechner geleitet, dem gleichzeitig die Daten des zweiten GPS-

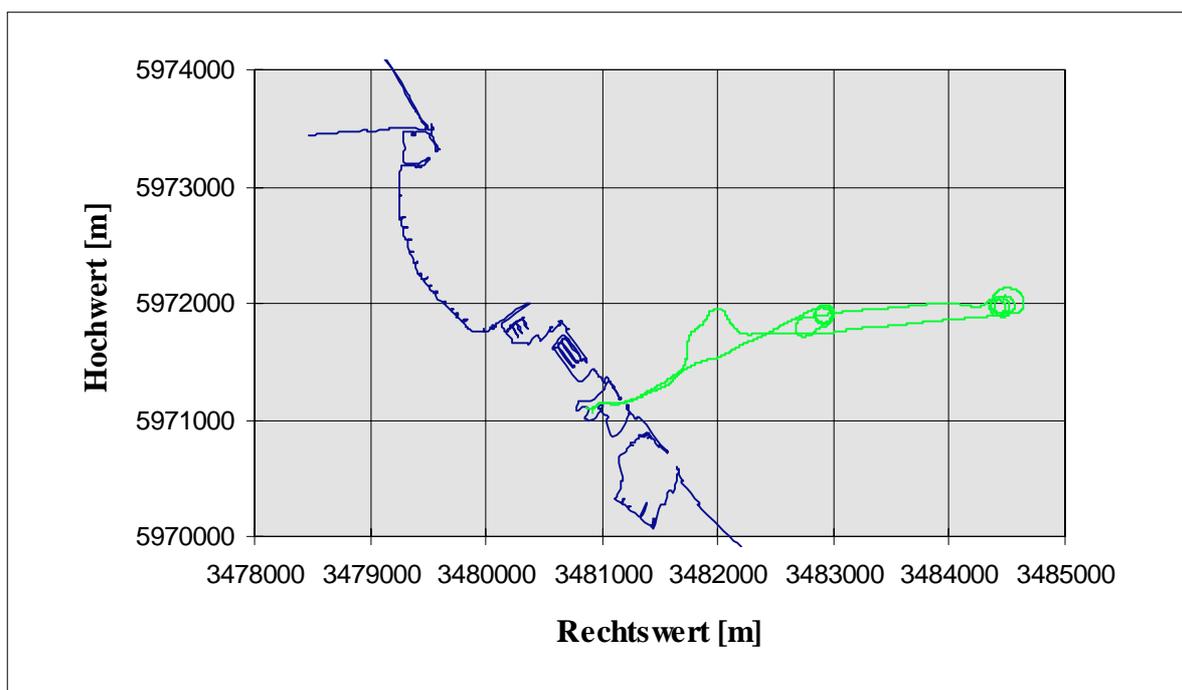


Abbildung 8.3: Testfahrt mit dem VS "Greif" vor Cuxhaven, 08. Dezember 1997

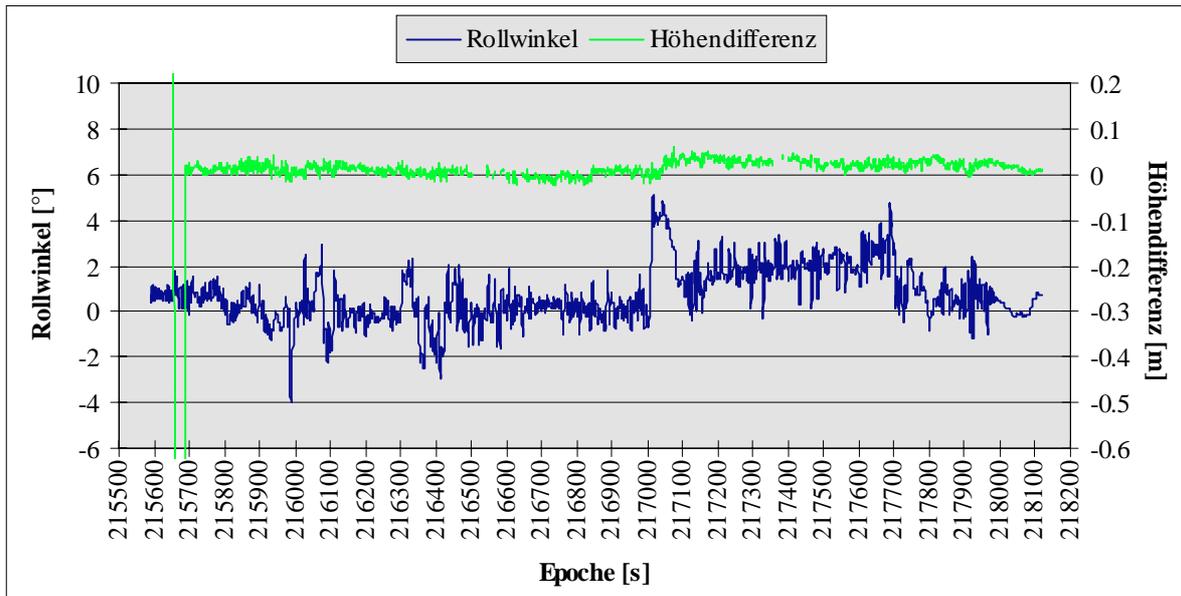


Abbildung 8.4: Höhendifferenz (hell) und Rollwinkel (dunkel), VS „Greif“, Cuxhaven, 08. Dezember 1997

Empfänger zur Verfügung gestellt wurden. Der Kontrollrechner rechnete mit GNNET eine Lösung für die zweite GPS-Antenne und verglich die projizierte Lösung des Systemrechners mit der eigenen Lösung.

Es wurden mehrere Testfahrten am 08. und 09. Dezember 1997 unternommen. Die Fahrten wurden auf der Elbe vor Cuxhaven durchgeführt. Abbildung 8.4 zeigt die erste Testfahrt vom 08. Dezember 1997.

Abbildung 8.5 zeigt die Differenz der projizierten Höhe und der gemessenen Höhe der zweiten GPS-

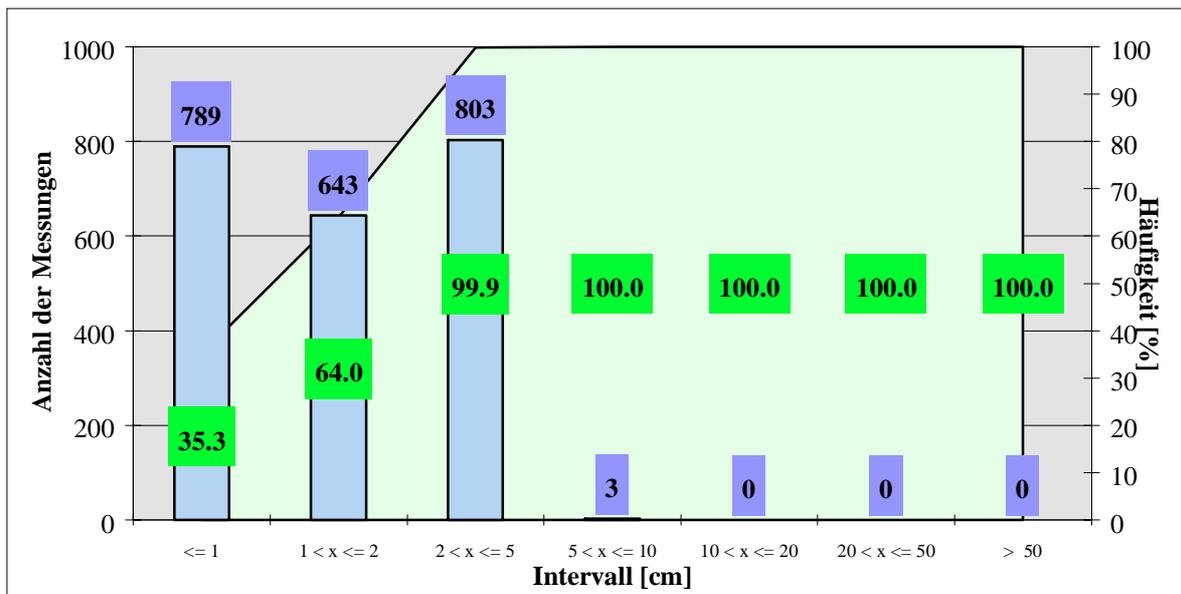


Abbildung 8.5: Verteilung und Häufigkeit der Höhendifferenzen, Cuxhaven, 08. Dezember 1997

Antenne, sowie den Rollwinkel über den Zeitraum der Meßfahrt. Die Differenz der Höhen lag dabei im Bereich weniger Zentimeter. Der Rollwinkel lag, wie bei einem Schiff dieser Größe zu erwarten, zwischen -4° und $+5,5^\circ$, wobei die größten Amplituden durch harte Wendemanöver verursacht sind. Bei ruhiger See und Windstärken < 4 Beaufort rollte das Schiff um ca. 2° .

Es hat sich gezeigt, daß das System selbst bei maximalem Rollen der Spezifikation entsprach, und daß die Unsicherheit in der ungestützten Höhenmessung von ca. ± 10 cm auf weniger als ± 5 cm bei der Nutzung eines integrierten Systems zu reduzieren war. Es waren 99,86% aller Werte der Höhendifferenz kleiner oder gleich 5 cm, und 63,98% waren sogar kleiner oder gleich 2 cm (siehe Abbildung 8.6).

Die Testfahrten haben auch gezeigt, daß die Nutzungsmöglichkeit des SAPOS für die hochpräzise Echtzeitpositionierung mit GPS zum Zeitpunkt der Messungen nur eingeschränkt möglich waren. Zum einen war das Netz der Referenzstationen noch nicht flächendeckend ausgebaut, und zum anderen gab es technische Schwierigkeiten mit der Decoder-Box, die zur Decodierung der übermittelten Korrekturdaten und zur Abrechnung der Nutzungsgebühren benötigt wurde. Die Datenverarbeitung in der Box dauerte teilweise so lange, daß die nachfolgende GPS-Auswertesoftware nicht korrekt mit Korrekturdaten versorgt werden konnte, und somit eine Lösung der Trägerphasenmehrdeutigkeiten dann nicht möglich war.

Mit einer von der LGN zur Verfügung gestellten Decoder-Box neuerer Bauart konnten diese Probleme weitgehend behoben werden. Mittlerweile liefert der Hersteller der Boxen, die Firma Microcom GmbH, die Boxen nur noch mit der neuesten Firmware. Für die Zukunft kann deshalb mit einem wesentlichen Beitrag durch die Nutzung des SAPOS-Dienstes gerechnet werden.

9 Zusammenfassung und Fazit

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), das Institut für Erdmessung der Universität Hannover (IfE) und die Firma Geo++, Garbsen, arbeiteten in einem vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie geförderten Vorhaben gemeinsam an der Entwicklung und Erprobung eines kostengünstigen, operationellen und echtzeitfähigen Meß- und Auswertesystems für die hochpräzise Positions- und Lagebestimmung auf Gewässern.

Zu Beginn des Vorhabens wurde eine Spezifikation für das System erarbeitet und erste Untersuchungen zur Notwendigkeit und Realisierbarkeit eines solchen Systems durchgeführt. Darauf folgte die Entwicklung einer testfähigen Version des Systems, mit der in eingehender Erprobung das Produkt untersucht wurde, um es im Hinblick auf die Verwendbarkeit im Bereich der Küsten- und der Binnengewässer bis zur Praxisreife zu entwickeln.

Nach der Erprobungsphase wurde das System Ende 1997 den potentiellen Nutzern vorgestellt, um das Produkt optimal auf die Anforderungen der Praxis abstimmen zu können.

Untersuchungen am IfE und bei der BfG haben gezeigt, daß die Steigerung der Ortungs- und Beschickungsgenauigkeit mit Präzision Differential GPS und inertialen Meßsystemen möglich ist. Die in das System zu integrierenden Sensoren, GPS und inertielle Meßsysteme, wurden eingehend untersucht. Produkte verschiedener INS-Hersteller (Litef GmbH, iMAR GmbH, TSS Ltd.) wurden auf mehreren Test- und Erprobungsfahrten eingesetzt. Mit dem GPS-Lagemeßsystem COMPASS wurden in Abhängigkeit von der Länge der Zwischenantennenstrecken Genauigkeiten in der Winkelmessung von $0,03^\circ$ bis $0,5^\circ$ erreicht. Inertialsysteme geben üblicherweise Genauigkeiten von besser als $0,1^\circ$ für die Bestimmung des Roll- und Stampfwinkels an. Hier hängt die Erreichbare Genauigkeit im Wesentlichen von der Qualität der Winkelmeßsensoren und der Beschleunigungsaufnehmer ab. Die Stützung inertialer Meßsysteme mit GPS erbrachte sehr gute Ergebnisse für die Lagewinkelbestimmung, insbesondere bei sehr bewegten Meßfahrten (Untersuchung TSS POS/MV 320).

Die im Projekt entwickelte Software ist in der Lage, die Eingangsdaten verschiedener Sensoren zu verarbeiten und sie für den Nutzer so aufzubereiten, daß ein optimaler Datenfluß zu einem hydrographischen Datenerfassungssystem gewährleistet ist.

Die Nutzungsmöglichkeiten des GPS in Echtzeit wurden erweitert. Neue Konzepte zur Vernetzung von Referenzstationen und zur Nutzung mehrerer Antennen auf der bewegten Plattform wurden untersucht. Die Vernetzung von Referenzstationen steigert die Genauigkeit und die Schnelligkeit der Mehrdeutigkeitssuchalgorithmen, insbesondere über große Entfernungen (mehr als 20 km). Im Hinblick auf die derzeit ansteigende Sonnenaktivität und den damit verbundenen stärkeren ionosphärischen Störungen gewinnt die Reduzierung entfernungsabhängiger Fehleranteile zunehmend an Bedeutung.

Die Nutzungsmöglichkeit des im Aufbau befindlichen SAPOS-Dienstes für die hochpräzise Echtzeitpositionierung mit GPS wurden im Rahmen der bisher noch eingeschränkten Datenverfügbarkeit eingehend analysiert. Die grundsätzlichen Vorteile bei der Nutzung des Dienstes konnten nachgewiesen werden. So entfällt zum Beispiel für den Nutzer der Betrieb eigener Referenz- und Monitorstationen oder gegebenenfalls eines Referenzstationsnetzes.

Die Überbrückung von Datenlücken in der GPS-Positionierung durch geeignete inertielle Meßsysteme wurde als Thema aufgegriffen, obwohl es im Vorhaben nicht explizit gefordert wurde. Auswertungen von Testmessungen im Postprocessing haben gezeigt, daß mit kostengünstigen inertialen Navigationssystemen lediglich kurze Datenlücken von wenigen Sekunden mit der im Vorhaben geforderten hohen Genauigkeit überbrückt werden können. Zur Überbrückung längerer Datenlücken wäre der Einsatz von technisch sehr hochwertigen und damit teuren INS erforderlich.

Die Projektziele im Vorhaben wurden erreicht. Mit dem entwickelten Softwarepaket steht potentiellen Nutzern ein optimiertes modulares System für die hydrographische Positions- und Lagebestimmung auf Gewässern zur Verfügung.

Dank

Das Vorhaben wurde vom BMBF unter dem Förderungskennzeichen MTK 0590A (BfG) und MTK 0590B (IfE) gefördert.

Verschiedene potentielle Nutzer aus der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, Hochschulinstituten und privaten Firmen haben im Rahmen von Nutzerbefragungen wertvolle Anregungen eingebracht.

Für die Bereitstellung von inertialen Meßsystemen ist der Fachhochschule Bochum und den Firmen Meerestechnisches Büro Turla (MBT), Kiel, sowie iMAR GmbH, St. Ingbert, zu danken.

Insbesondere die Wasser- und Schifffahrtsämter Köln und Cuxhaven, sowie das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg, haben das Vorhaben mit der Bereitstellung von Schiffen und Meßbooten unterstützt.

Weitere Unterstützung, unter anderem durch die Bereitstellung von Meßdaten, wurde von den Landesvermessungsämtern in Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Hamburg geleistet.

Die für die Projektbegleitung gebildete Beratergruppe des Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) hat das Vorhaben in allen Phasen durch konstruktive Kritik gefördert.

Dafür sei allen Beteiligten herzlich gedankt.

10 Literatur

- 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
- Bagge, A., G. Wübbena (1996):** DGPS-Datenformate. Firmenmitteilung, Geo++ GmbH, Garbsen, 1996
- Bäumker, M. (1995a):** Kinematische GPS-Anwendungen mit inertialen Sensoren. Vortrag im Rahmen einer gemeinsamen Fortbildungsveranstaltung des Fachbereichs Vermessungswesen der FH Bochum und des VDV Landesverbandes Nordrhein-Westfalen, 06.10.1995, Bochum
- Bäumker, M. (1995b):** Basiswissen Inertial- und Sensortechnik, SPN 4/1995
- Bäumker, M. (1995c):** DGPS-gestütztes Fahrzeugnavigationssystem mit faseroptischen Kreisel, SPN 4/1995
- BMBF (1995):** Abschlußbericht für das Projekt „Präzise GPS-gestützte Höhenzuordnung für kontinuierliche Lotungsmessungen auf Gewässern“, Förderungsnummer MTK0551, unveröffentlicht, Universität Hannover, Institut für Erdmessung, Juni 1996
- Böder, V., G. Seeber (1997):** Real-Time PDGPS Positioning, Attitude Determination and INS-Integration for Hydrographic Applications. In: International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation (KIS), Banff, Kanada, 03.-06. Juni, 1997
- Brandenburg, G. (1997):** Hochpräzise kinematische Positions- und Lagebestimmung mit GPS in Echtzeit. Diplomarbeit am Institut für Erdmessung, Universität Hannover, unveröffentlicht
- Brüggemann, T. (1995):** Abschlußbericht zum Pilotprojekt Peilsystem HYMAS mit satellitengestützter Ortung auf dem MB „Hamster“. BfG-Bericht 0943, Koblenz, Dezember 1995
- Brüggemann, T. (1996):** HYdrographisches Meß- und Auswertesystem (HYMAS) für den Binnenbereich der Bundeswasserstraßen, 2. Auflage. BfG-Bericht 1025, Koblenz, Dezember 1996
- BSH (1997):** Stand und Entwicklungstendenzen nautischer Systeme, Anlagen und Geräte an Bord von Seeschiffen - Abschätzung der Auswirkungen auf die Schiffsführung. Berichte des Bundesmattes für Seeschifffahrt und Hydrographie, Nr. 11, Hamburg und Rostock 1997
- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN33417, 1987):** Beschreibung von Ort, Lage und Bewegungsrichtung von Gegenständen. DIN 33417, Berlin, August 1987

- Dünck-Kerst, H.-G. (1996):** Untersuchung verschiedener PDGPS-Gerätesysteme auf Einsatzmöglichkeiten im Peilwesen, BfG-Bericht-Nr. 1042, Koblenz, 1996
- Dybek, J. (1997):** KFKI/BMBF Projekt „Optimierung der hydrographischen Positions- und Lagebestimmung“. Vortrag zum Kolloquium „Anwendungen der Satellitenpositionierung für die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung“ bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Koblenz, 12. August 1997, unveröffentlicht
- Eichhorn, T. (1998a):** Untersuchung des TSS POS/MV Sensors zur hydrographischen Positions- und Lagebestimmung. Diplomarbeit am Institut für Erdmessung, Universität Hannover, unveröffentlicht
- Eichhorn, T. (1998b):** Untersuchung des TSS POS/MV 320 Systems zur hydrographischen Positions- und Lagebestimmung. Beiträge zum 13. Hydrographentag 1998, Papenburg, 08.-10.06.1998
- Farkas-Jandl, T. (1986):** Einführung in die Inertialvermessung, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1986
- Fiedler, R. (1997):** Ergebnis- und Perspektivbericht zur Positionsbestimmung im Projekt INIS. Erschienen in: INIS '97. Einsatz integrierter Navigationssysteme zur hochgenauen Ortsbestimmung, Bahnplanung und Bahnführung in der Seeschifffahrt, Universität Rostock 13.-14.03.1997
- Fiedler, R.; Gluch, M.; Kirchner, J.; Kasties, G. (1994):** SeaNav: A Real Time Navigation System for the Identification of the Dynamic Parameters of Ships using DGPS, GLONASS and Inertial Systems, Paper presented on PLANS '94, Las Vegas, Colorado, 1994
- Goffinet, P. (1996):** A Testbed for Depth Reduction in Bathymetric Survey Using DGPS/OTF in the Elbe Estuary, Preliminary Results. Hydrographische Nachrichten Nr. 041, Deutsche Hydrographische Gesellschaft e.V., Oktober 1996
- Groten, E.; Heinze, O.; Söhne, W. (1996):** Zum Einsatz von Inertialnavigationssystemen in der Geodäsie, AVN 2/1996
- Hankemeier, P. (1995):** The DGPS Service for the FRG -Concept and Status-. In: Beutler u.a. (Hrsg.) GPS Trends in Precise Terrestrial, Airborne and Spaceborn Applications, IAG Symp. 113, 1995
- Hankemeier, P. (1996):** Multifunktionale Referenzstation -Eckpfeiler des DGPS-Dienstes der AdV-. Beiträge zum 11. Hydrographentag 1996, Glücksburg, 03.-05.06.1996
- Hankemeier, P. (1997):** SAPOS - Der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung. Allgemeine Vermessungsnachrichten 7/97, Wichmann Verlag, Heidelberg, 1997
- Hankemeier, P. et al. (1997):** SAPOS-Aktivitäten der einzelnen Mitgliedsverwaltungen der AdV. Allgemeine Vermessungsnachrichten 7/97, Wichmann Verlag, Heidelberg, 1997

- Hankemeier, P., I. Engel, S. Koch (1998):** SAPOS - ein aktives Bezugssystem für multifunktionale Anwendungen. Zeitschrift für Vermessungswesen, S. 149-156, 1998
- Hare, R. (1995):** Depth and Position Error Budgets for Multibeam Echosounding, International Hydrographic Review, Monaco, LXXII(2), September 1995
- 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
- Heinze, O. (1996):** Aufbau eines operablen inertialen Vermessungssystems zur Online-Verarbeitung in der Geodäsie auf Basis eines kommerziellen Strapdown Inertialsystems, DGKC, Heft 459, München, 1996
- Hinüber, E. v. (1996):** Hochgenaue Kreisel und Beschleunigungssensoren, Elektronik, Heft 1/1996
- Hinüber, E. v.; Janocha, H. (1995):** Leistungspotential moderner inertialer Meßsysteme, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Heft1/1995
- Jae One, Lee (1996):** Untersuchung von Verfahren zur kombinierten Aerotriangulation mittels integriertem GPS. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Nr. 220, Hannover
- IHO (1987):** Standards for Hydrographic Surveys. International Hydrographic Organisation, Special Publication No. 44, Monaco
- Keller, D. (1991):** Aufbau eines geodätischen Strapdown Inertialsystems zur Punktbestimmung, DGKC, Heft 367, München, 1991
- Kirchner, J. (1997):** Beschreibung der Bewegungsdynamik von Schiffen unter Berücksichtigung äußerer Einflußgrößen. Erschienen in: INIS'97. Einsatz integrierter Navigationssysteme zur hochgenauen Ortsbestimmung, Bahnplanung und Bahnführung in der Seeschifffahrt, Universität Rostock 13.-14.03.1997
- Kleusberg, A. (1995):** Mathematics of Attitude Determination with GPS, GPS World, September 1995
- Krueger, C., M. Campos, C. Soares, V. Böder, G. Seeber (1997):** Aplicações do GPS Preciso em Tempo Real no Âmbito Marinho. XVIII Congresso Brasileiro de Cartografia, Rio de Janeiro, Brasilien, 03.-09. September, 1997
- Langley, R. B. (1995):** NMEA 0183: A GPS Receiver Interface Standard, GPS World 1995

- LGN (1998):** Präzise ‘near-online’ Bestimmung in der Landesvermessung mit Hilfe eines Netzes permanent messender GPS-Empfänger auf Referenzstationen, Schlußbericht HPPS. Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN), Hannover, 1998
- Libertin, A., J. Kirchner (1997):** Online Filterung der Schiffsposition (OFSP) auf Basis der Systemdynamik. Erschienen in: INIS’97. Einsatz integrierter Navigationssysteme zur hochgenauen Ortsbestimmung, Bahnplanung und Bahnführung in der Seeschifffahrt, Universität Rostock 13.-14.03.1997
- 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
- ODIN (1996):** <http://www.odin.dep.no>. Webpages des Ministry of Fishery, Norwegen. Stand vom 23.09.1997
- Produktdatenblatt TGAC-RQ (1998):** iMAR GmbH, St. Ingbert, Deutschland, 1998
- Rohde, H.-P. (1996):** IHO Standards for Hydrographic Surveys. Beiträge zum 11. Hydrographentag 1996, Glücksburg, 03.-05.06.1996
- RTCM (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
- Scherzinger, B.; Woolven, S.; Field, M. (1997):** An Integrated Position, Attitude and Heading Solution for Seafloor Mapping with Multibeam Sonars, Sea Technology, Heft März 1997
- Schüler, T. (1997):** Untersuchungen zur GPS/INS-Integration für präzise Echtzeitanwendungen. Diplomarbeit am Institut für Erdmessung, Universität Hannover, unveröffentlicht
- Seeber, G. (1996):** Stand und Einsatzmöglichkeiten von GPS in der Hydrographie -ein Überblick. Beiträge zum 11. Hydrographentag 1996, Glücksburg, 03.-05.06.1996
- 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., V. Böder (1997):** New Developments in the Improvement of GPS Kinematic Applications. Scientific Assembly of the International Association of Geodesy (IAG), Rio de Janeiro, Brasilien, 03.-09. September, 1997
- Seeber, G., V. Böder, H. Wirth, J. Dybek, G. Wübbena, A. Bagge (1998):** Hydrographische Positionsbestimmung mit präzisiertem DGPS und INS-Unterstützung in Echtzeit. Beiträge zum 13. Hydrographentag 1998, Papenburg, 08.-10.06.1998

- 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
- Söhne, W. (1996):** Ein hybrides System in der Geodäsie. Einsatz des NAVSTAR GPS mit dem Strapdown-Inertial-Navigationssystem LASERNAV II für kinematische Punktbestimmung und Orientierung, DGKC, Heft 463, München, 1996
- Spezifikation** für ein Meß- und Auswertesystem für die Präzise Positions- und Lagebestimmung auf Gewässern im Rahmen des KFKI/BMBF Projekts „Optimierung der hydrographischen Positions- und Lagebestimmung“. unveröffentlicht, BfG, Koblenz, April 1997
- Teuber, A. (1996):** Untersuchungen zur Reduzierung entfernungsabhängiger Fehleranteile durch Vernetzung von Referenzstationen für PDGPS-Echtzeitanwendungen. Diplomarbeit am Institut für Erdmessung, Universität Hannover, unveröffentlicht
- Titterton, D. H.; Weston, J. L. (1997):** Strapdown inertial navigation technology. Peter Peregrinus Ltd, Stevenage, Herts., ISBN 0 86341 260 2, 1997
- Tsakh (1996):** Mitteilung des Russischen Verkehrsministers Tsakh an die International Civil Aviation Organization (4. Juni 1996): GIBS-Mitteilungen auf WWW, BKG, 1996
- TSS Systemmanual zum POS/MV:** TSS Ltd., Witney, Oxfordshire, UK
- Wanninger, L. (1993):** Der Einfluß ionosphärischer Störungen auf präzise GPS-Messungen in Mitteleuropa. Zeitschrift für Vermessungswesen, ZfV, 118, Heft 1, 25-36
- Wirth, H. (1995):** Gewässervermessung im Binnenbereich der BWaStr mit DGPS-Ortung. Beitrag zum 37. DVW Seminar „Hydrographische Vermessungen -Heute-“, 28.3.-29.3.1995, Hannover, in: „Hydrographische Vermessungen -Heute-“, Schriftenreihe des DVW Nr. 14, Stuttgart, 1995
- Wirth, H. (1998):** Hydrographisches Vermessungssystem HYMAS. Beitrag zum 44. DVW Seminar „Hybride Vermessungssysteme - Grundlagen und Anwendungen -“, 19.6.-20.6.1997, Neubiberg, in: „Hybride Vermessungssysteme -Grundlagen und Anwendungen-“, Schriftenreihe des DVW Nr. 29, Stuttgart, 1998
- Woolven, S.; Scherzinger, B.; Field, M. (1997):** POS/MV - System Performance with Inertial/RTK GPS Integration, präsentiert auf OCEANS '97, 1997
- 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):** GPS-bezogene Ortungssysteme. Beitrag zum 37. DVW. Seminar "Hydrographische Vermessungen -heute-", 28.3.-29.3.1995, Hannover
- Wübbena, G., A. Bagge, G. Seeber (1995):** Developments in Real-Time Precise DGPS Applications -Concepts and Status-. In: Beutler u.a. (Hrsg.) GPS Trends in Precise Terrestrial, Airborne and Spaceborn Applications, IAG Symp. 113, 1995
- Wübbena, G., F. Menge, M. Schmitz, G. Seeber, C. Völksen (1996a):** A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations. in: Proceedings ION GPS-96, Kansas City, September 1996
- Wübbena, G., A. Bagge, G. Seeber, V. Böder, P. Hankemeier (1996b):** Reducing Distance Dependent Errors for Real-Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks. in: Proceedings ION GPS-96, Kansas City, September 1996
- Zarraoa, Mai, Jungstand:** Long Term Evaluation of GLONASS Performance. AVN 8-9/97

11 Anhang

11.1 Fragebogen der Nutzerumfrage vom 21. Februar 1996

Fragebogen zu den Spezifikationen eines

Meß- und Auswertesystems für die
hochpräzise Positions- und Lagebestimmung auf Gewässern

Name der Institution:

Aufgaben, Meßgebiete

1. Welche Aufgabenbereiche deckt Ihre Institution ab?
2. Werden Ihrer Meinung nach in Zukunft Aufgaben hinzukommen? Wenn ja, welche?
3. In welchen Gewässern werden die Messungen durchgeführt?

Ausstattung, Personal

4. Wieviele Vermessungsschiffe/-boote werden von Ihnen betrieben? Werden auch Beiboote zu Vermessungszwecken eingesetzt?
5. Welche Maße haben die oben genannten Vermessungsschiffe/-boote (Länge, Breite, Tiefgang)?
6. Welche Sensoren zur Positions- und Lagebestimmung und zur Peilung befinden sich an Bord?
7. Welche Rechner mit wieviel Speicherkapazität befinden sich an Bord (PC, 66MHz, 500 MB Festplatte)?
8. Welche Aufnahmesoftware wird verwendet (z.B. NAVISOFT)?
9. Welche Schnittstellenformate liegen vor (NMEA,...)?
10. Welche Qualifikationen besitzen die Bediener an Bord und die Auswerter im Büro?

Meßfahrt

11. Wie groß sind die üblichen und die maximalen Entfernungen der Meßgebiete von Küste und Ufer ?
12. Wird nach einer digitale Kartengrundlage navigiert ? Erscheint es für Sie wünschenswert, nach einer digitale Kartengrundlage zu navigieren ?

Zeitzuordnung

13. Welche an Bord gemessenen Werte müssen miteinander verknüpft werden (z.B. Position mit Lotung, ...)?
14. Wie werden die Werte miteinander verknüpft?
15. Welche Art von Borduhr wird benutzt und wie wird sie gestellt?

Abschätzung der notwendigen Speicherkapazität

16. Wie lang kann die Meßdauer täglich betragen?
17. Wie lang können mehrtägige Meßfahrten dauern?
18. Welche zusätzlichen Informationen werden abgespeichert? Wie groß sind dabei entstehende Dateien?

Punktabstand

19. Welche Profillängen werden gewählt, welche Ausdehnungen hat das Meßgebiet?
20. Wie groß ist üblicherweise der Punktabstand bei den Peilungen?
21. Ist eine größere Punktdichte sinnvoll?

Auswertung

22. Sind in einigen Fällen Nachmessungen aufgrund von Meßfehlern erforderlich? Welchen zeitlichen Umfang können die Nachmessungen erreichen (Stunden, Tage, Wochen, ...)?
23. Ist die Verarbeitung der Daten in Echtzeit gefordert, erwünscht oder nicht notwendig ?
24. Welcher Höhenbezug ist notwendig (NN, SKN, ..)?
25. Welche Arbeitsschritte werden bisher bis zur Fertigstellung des Produktes (Karte, Koordinaten) durchgeführt? Wieviel Zeit wird für diese Schritte gebraucht?

Genauigkeit

26. Welche Genauigkeiten sind für welche Aufgabenbereiche gefordert ?
27. Welche Genauigkeiten werden nach Ihrer Einschätzung in Zukunft für welche Aufgaben gefordert sein?
28. Welche Genauigkeitsanforderungen werden an die Navigation gestellt?
29. Was erwarten Sie von einem operationellen und echtzeitfähigen Meß- und Auswertesystem ?

30. Weitere Anmerkungen

11.2 Spezifikation für ein Meß- und Auswertesystems für die präzise Positions- und Lagebestimmung auf Gewässern im vom 01. April 1997

Spezifikation für ein
**Meß- und Auswertesystem für die präzise
Positions- und Lagebestimmung auf Gewässern**
im Rahmen des KFKI/BMBF Projekts
**Optimierung der hydrographischen Positions-
und Lagebestimmung**

Stand: 01. April 1997

Inhalt

1. Einleitung.....	91
2. Allgemeines.....	91
2.1 Systemaufbau	92
3. Bezugssysteme	93
3.1 Koordinatensystem.....	93
3.2 Zeitbasis.....	93
4. Genauigkeit der Positions- und Lagebestimmung	94
4.1 Dreidimensionale Positionsbestimmung	94
4.1.1 Positionsbestimmung bei GPS-Verfügbarkeit.....	94
4.1.2 Positionsbestimmung bei Ausfall des GPS.....	94
4.2 Dreidimensionale Lagebestimmung	94
4.3 Zentrierung	95
5. Genauigkeit der Zeitzuordnung	95
5.1 Positionsbestimmung	95
5.2 Lagebestimmung	95
5.3 Hydrographische Datenerfassung und andere Anwendungen.....	95
6. Datenschnittstellen	95
6.1 Korrekturdatenformate.....	95
6.2 GPS-Empfänger	96
6.3 INS und andere Sensoren	96
6.3.1 Lagebestimmung	96
6.3.2 Positionsbestimmung	96
6.3.3 Stützung des INS durch GPS-Positionsdaten.....	97
6.3.4 Andere Sensoren	97
6.4 Ausgabeformate	97
7. Datenrate	98
7.1 Dateneingabe.....	98
7.1.1 Korrekturdaten.....	98
7.1.2 GPS-Empfänger	98
7.1.3 INS und andere Sensoren	98
7.2 Datenverarbeitung	98
7.3 Datenausgabe.....	98
8. Datenalter	99
9. Dokumentation	99
10. Nutzeroberfläche.....	99

1. Einleitung

Ziel der Entwicklung ist ein kostengünstiges, operationelles und echtzeitfähiges Meß- und Auswertesystem für die präzise Positions- und Lagebestimmung auf Gewässern.

Das System soll modular aufgebaut sein und Erweiterungsmöglichkeiten besitzen, um auf die Anforderungen verschiedener Nutzer abgestimmt zu werden. Der Einsatz auf handelsüblichen Rechnern (PC) muß ebenso gewährleistet sein, wie die Auf- und Abwärtskompatibilität gegenüber den eingesetzten GPS-Sensoren. Sensoren und Inertiale Meßsysteme (INS) zur dreidimensionalen Lagebestimmung (Kurs-, Roll- und Stampfwinkel) können optional eingebunden werden, soweit Informationen über Datenschnittstellen vorliegen. Der Datenaustausch mit Software zur Erfassung von hydrographischen Daten und anderen Anwendungen ist über standardisierte oder geeignete andere Schnittstellen sicherzustellen.

Zur Navigation soll das System echtzeitfähig sein. Eine definierte Zuordnung einer Zeitinformation zur Positions- und Lagebestimmung muß erfolgen. Einer eventuellen hydrographischen Datenerfassung ist die Zeitinformation zur Verfügung zu stellen.

2. Allgemeines

Das System soll der hochgenauen Positions- und Lagebestimmung dienen. Primäres Ziel ist dabei die hohe Genauigkeit in Echtzeit mit einem geringen Datenalter. Desweiteren soll die Navigation mit eingeschränkter Genauigkeit möglich sein, wobei durch Prädiktion ein Datenalter Null realisiert wird.

Das Kernmodul ist ein umfassendes Softwarepaket zur Auswertung von relativen GPS-Code- und Trägerphasenmessungen (PDGPS) mit “On-the-way” (OTW) Mehrdeutigkeitsalgorithmen für die präzise dreidimensionale Positionsbestimmung und hochgenaue Zeitzuordnung. Die Mehrdeutigkeiten sollen schnell und zuverlässig gelöst werden. Die Möglichkeit zum GPS-Postprocessing durch optionale Rohdatenaufzeichnung und Nutzung einer Postprocessing-Option ist bereitzustellen. Das Kernmodul ist durch die Software GNRT/GNRT-K der Firma Geo++ realisiert.

Die präzise GPS-gestützte Positionierung kann an das Netz von Referenzstationen des Satellitenpositionierungsdienstes der deutschen Landesvermessung (SAPOS) angeschlossen werden, aber auch der Betrieb eigener Referenzstationen ist zu ermöglichen.

Die dreidimensionale Lagebestimmung kann optional durch mehrere GPS-Empfänger und die Software COMPASS der Firma Geo++ geschehen.

Sensoren und Inertiale Meßsysteme (INS) zur dreidimensionalen Lagebestimmung können ebenfalls optional zugeschaltet werden. Diese Sensoren können zur Zentrierung und soweit geeignet, zur Positionsbestimmung dienen. Den Lagedaten und gegebenenfalls den Positionsdaten dieser Sensoren kann die Zeit hochgenau zugeordnet werden, soweit Zeitinformationen von den Sensoren bereitgestellt werden oder aus dem Zeitpunkt der Bereitstellung der Sensordaten abgeleitet werden können.

Qualitätsmerkmale der Positions- und Lagebestimmung sollen dargestellt werden und hinsichtlich der Detailtiefe konfigurierbar sein. Die Möglichkeit zur abgestuften Protokollierung des Systemzustandes ist zu geben. Die zu entwickelnde Software ist umfassend zu dokumentieren.

Das fertige System wird den Trägern öffentlicher Belange und kommerziellen Nutzern zur Verfügung gestellt.

Die im folgenden aufgeführte Spezifikation bezieht sich auf die hochgenaue Positions- und Lagebestimmung, sofern nicht explizit die weniger genauen Anwendungen der Navigation genannt werden.

2.1 Systemaufbau

Die Verbindung von Positions- und Lagedaten geschieht in einem Modul zur Integration, Stützung und Prädiktion. Dieses Modul ermöglicht, im einfachsten Fall, sowohl die horizontale Zentrierung mit Hilfe des Kurses aus GPS oder über einen Kurssensor, als auch, in einer höherwertigen Stufe, die dreidimensionale Zentrierung, die entweder über ein GPS-Lagemesssystem oder ein INS-Lagemesssystem erfolgt. Das Integrationsmodul ermöglicht zusätzlich in der höchsten Ausbaustufe die Überbrückung von GPS-Positionsdatenlücken und die Stützung des INS durch GPS-Daten, soweit geeignete INS eingesetzt werden.

Als Zentrierung ist die Reduktion der GPS-Antennenposition auf einen oder mehrere definierte Meßpunkte bezeichnet.

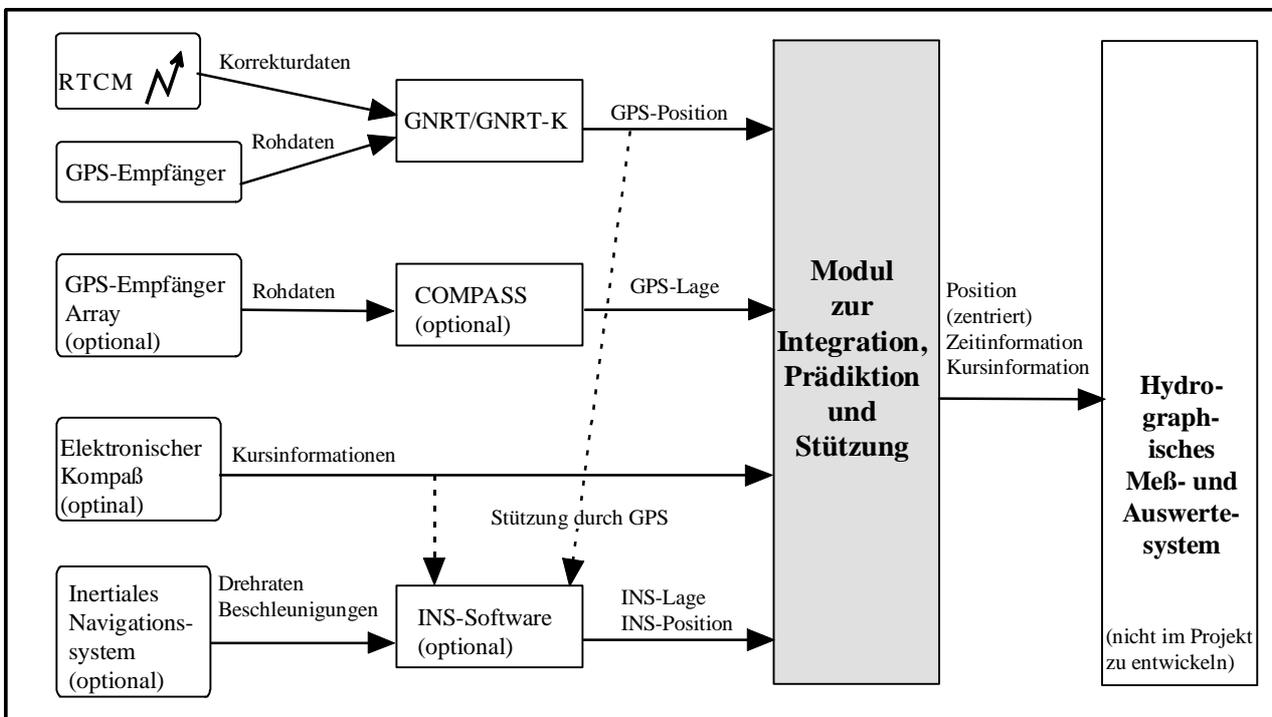


Abbildung 1: Mögliche Konfiguration des Systems

Das zu schaffende Software-Modul, das die Integration von Positions- und Lagedaten vornehmen soll, kann in mehreren Stufen entstehen.

Stufe	Sensoren	Beschreibung
1	<ul style="list-style-type: none"> • GPS-Position 	<ul style="list-style-type: none"> • Hochpräzise Echtzeit-Position der GPS-Antenne
2	<ul style="list-style-type: none"> • GPS-Position • Kurswinkel 	<ul style="list-style-type: none"> • Zentrierung der GPS-Antennenposition in der horizontalen Komponente mit Hilfe des GPS-Kurses oder über einen Kurssensor (z.B. einen elektronischen Kompaß)
3	<ul style="list-style-type: none"> • GPS-Position • INS-Lage oder • GPS-Lage 	<ul style="list-style-type: none"> • Dreidimensionale Zentrierung, die entweder über ein GPS-Lagemesssystem oder ein INS-Lagemesssystem mit elektronischem Kompaß erfolgt.
4	<ul style="list-style-type: none"> • GPS-Position • INS-Position und • INS-Lage 	<ul style="list-style-type: none"> • Überbrückung von GPS-Positionsdatenlücken durch ein INS. • Stützung des INS durch die GPS-Position, soweit geeignete INS vorhanden sind. Die hochpräzise GPS-Position und die GPS-Geschwindigkeitskomponenten, sowie deren Standardabweichungen werden dem INS zur Stützung der Positionsbestimmung zur Verfügung gestellt. • Plausibilitätsabfragen sollen die Zuverlässigkeit der Positionsberechnung überwachen.
5	<ul style="list-style-type: none"> • GPS-Position • INS-Position und • INS-Lage 	<ul style="list-style-type: none"> • Komplette Integration mit beiderseitiger Stützung der Systeme. • Die höhere INS-Datenrate kann zur Positionsinterpolation genutzt werden. • Die Schnelligkeit und Zuverlässigkeit der Mehrdeutigkeitslösung kann durch GPS-gestützte INS-Positionen erhöht werden. • Überwachung (Monitoring) der gegenseitigen Stützungen.

Tabelle 1: Stufenkonzept des Integrationsmoduls

Die fünfte Stufe steht in dem KFKI/BMBF-Projekt nicht im Vordergrund, da zu ihrer Realisierung auf sehr hochwertige und damit kostenintensive Komponenten zugegriffen werden müßte.

3. Bezugssysteme

3.1 Koordinatensystem

Das Bezugssystem der Koordinaten ist das ETRF89 (European Terrestrial Reference Frame von 1989). Es entspricht für die Praxis dem WGS84 (World Geodetic System von 1984). Datumstransformationen in andere, auch vom Nutzer definierte, Koordinatensysteme sind möglich. Es sind verschiedene Projektionen in ebene Systeme möglich.

3.2 Zeitbasis

Gemeinsame Zeitbasis aller Sensordaten ist die GPS-Systemzeit. Dem Nutzer wird UTC (Universal Time Coordinated) zur definierten Zeitzuordnung angeboten.

4. Genauigkeit der Positions- und Lagebestimmung

4.1 Dreidimensionale Positionsbestimmung

4.1.1 Positionsbestimmung bei GPS-Verfügbarkeit

Bei GPS-Verfügbarkeit bezieht sich die Position auf das GPS-Antennenphasenzentrum. Die folgenden Angaben gelten nur innerhalb der Funkreichweite einer Referenzstation.

Unter ca. 20 km Entfernung zur Referenzstation soll die Position in allen Komponenten mit einer Meßunsicherheit besser als 5 cm mit 95% Sicherheitswahrscheinlichkeit zur Verfügung stehen.

Über ca. 20 km Entfernung zur Referenzstation soll die Position in allen Komponenten mit einer Meßunsicherheit besser als 10 cm mit 95% Sicherheitswahrscheinlichkeit zur Verfügung stehen.

Prädizierte dreidimensionale Positionen für Navigationszwecke sind mit einer Meßunsicherheit von 0,5 m mit 95% Sicherheitswahrscheinlichkeit bereitzustellen.

4.1.2 Positionsbestimmung bei Ausfall des GPS

Die Genauigkeit der Positionsbestimmung ohne GPS ist abhängig von der Art und Qualität der zusätzlichen Sensoren. Die folgenden Angaben sind bezogen auf den Ursprung des INS-Koordinatensystems.

Wird ein geeignetes INS zur Überbrückung des Ausfalles von GPS zur Positionsbestimmung eingesetzt, so ist mindestens die zweidimensionale Position für einen Zeitraum von maximal einigen Minuten mit einer Meßunsicherheit von 0,5 m mit 95% Sicherheitswahrscheinlichkeit bereitzustellen.

Es wird angestrebt die unter 4.1.1 beschriebenen Genauigkeiten auch bei der dreidimensionalen Positionsbestimmung weitestgehend einzuhalten.

Die Realisierung dieser Spezifikation ist abhängig von der Art und Qualität des eingesetzten INS. Die Realisierbarkeit kann erst im Laufe der Erprobungsphase des fertigen Systems untersucht werden.

4.2 Dreidimensionale Lagebestimmung

Die Genauigkeit und Verfügbarkeit der Lagebestimmung ohne GPS ist abhängig von der Art und Qualität der Sensoren. Bei GPS-Lagemeißsystemen besteht zusätzlich eine Abhängigkeit der Lage-meßgenauigkeit von der Länge der Basislinien zwischen den GPS-Antennen.

Die Lage soll in allen Komponenten mit einer ausreichenden Genauigkeit ermittelt werden, um bei der Zentrierung möglichst die angestrebte Positionsgenauigkeit zu erhalten.

4.3 Zentrierung

Die GPS-Antennenposition und die optionale Lagebestimmung durch GPS oder zusätzliche Sensoren sind auf einen oder mehrere frei definierbare Meßpunkte zu zentrieren. Die angegebenen Genauigkeiten bleiben im wesentlichen auch nach der Zentrierung erhalten, wobei die Genauigkeit, außer von der Qualität der Lagebestimmung, von der Exzentrizität und deren Bestimmung abhängig ist.

5. Genauigkeit der Zeitzuordnung

Bei voller Systemverfügbarkeit gelten die folgenden Genauigkeiten für die den Meßwerten und Ergebnissen zugeordneten Zeiten, soweit die eingesetzten Sensoren dazu geeignet sind.

5.1 Positionsbestimmung

Für die Zeitzuordnung zu der zentrierten Position beträgt die Unsicherheit 1 μ s mit 95% Sicherheitswahrscheinlichkeit.

5.2 Lagebestimmung

Für die Zeitzuordnung zu der Lagebestimmung beträgt die Unsicherheit 10 ms mit 95% Sicherheitswahrscheinlichkeit.

5.3 Hydrographische Datenerfassung und andere Anwendungen

Für die Zeitzuordnung zur hydrographischen Datenerfassung und zu anderen Anwendungen beträgt die Unsicherheit 10 ms mit 95% Sicherheitswahrscheinlichkeit, sofern die Systeme von demselben Rechner gesteuert werden, auf dem auch das Modul zur Integration, Prädiktion und Stützung betrieben wird.

6. Datenschnittstellen

6.1 Korrekturdatenformate

Die GPS-Komponenten des Systems können mit folgenden Korrekturdatenformaten betrieben werden, deren Grundlage das standardisierte RTCM-Format ist.

Format	Beschreibung
RTCM-SC 104 Ver. 2.1	international standardisiertes-Korrekturdatenformat
RTCM++	RTCM kompatibles Korrekturdatenformat der Firma Geo++

Tabelle 2: RTCM-Korrekturdatenformate

Durch das RTCM-SC 104 Version 2.1 Korrekturdatenformat besteht Kompatibilität zum Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS).

6.2 GPS-Empfänger

Es können die folgenden GPS-Empfängertypen in das System eingebunden werden.

Hersteller	Empfängertyp
Ashtech	Z12 und kompatible
Leica	SR299, SR399 und kompatible
Navstar	XR5M und kompatible
Trimble	4000SSi, 7400MSi und kompatible
Zeiss	RS12, RD12

Tabelle 3: Einbindbare GPS-Empfänger

Weitere GPS-Empfängertypen können bei Verfügbarkeit der Schnittstellendokumentation berücksichtigt werden.

6.3 INS und andere Sensoren

6.3.1 Lagebestimmung

Es können INS zur Lagebestimmung in das System eingebunden werden, wenn sie folgende Informationen ganz oder teilweise zur Verfügung stellen.

Art der Informationen	Erläuterung
Sensor-Zeit	Zeit im System des Sensors und/oder Angaben zum Datenalter
Winkel	Roll-, Stampf- und Kurswinkel
Genauigkeiten	Standardabweichungen für möglichst jeden Winkel und für möglichst jede Meßepoche, ggf. Korrelationen

Tabelle 4: Informationen zur Lagebestimmung mit INS

Lagedaten des GPS-Lagemesssystems COMPASS der Firma Geo++ sind einbindbar.

6.3.2 Positionsbestimmung

Es können INS zur Positions- und Lagebestimmung in das System eingebunden werden, wenn sie zusätzlich zu den Lageinformationen folgende Informationen ganz oder teilweise zur Verfügung stellen.

Art der Informationen	Erläuterung
2-dimensionale Position	Geographische Breite und Länge im System WGS84, oder ebene Koordinaten
Höhe	Ellipsoidische Höhe oder Gebrauchshöhe
Genauigkeiten der Position	Standardabweichungen der zweidimensionalen Position und der Höhe
Geschwindigkeiten	Nord-, Ost- und Vertikalgeschwindigkeit
Genauigkeiten der Geschwindigkeit	Standardabweichung der Nord-, Ost- und Vertikalgeschwindigkeiten

Tabelle 5: Informationen zur Positionsbestimmung mit INS

6.3.3 Stützung des INS durch GPS-Positionsdaten

Geeignete INS können durch das System gestützt werden, indem Kurswinkel, GPS-Positionsdaten oder Geschwindigkeiten zur Verfügung gestellt werden.

Art der Informationen	Erläuterung
Sensor-Zeit	GPS-Systemzeit oder Zeit im System des Sensors und/oder Angaben zum Datenalter
Kurswinkel	Kurswinkel von einem elektronischen Kompass oder GPS
3-dimensionale Position	Geographische Breite, Länge und ellipsoidische Höhe im System WGS84
Genauigkeiten der Position	Standardabweichungen der zweidimensionalen Position und der Höhe
Geschwindigkeiten	Nord-, Ost- und Vertikalgeschwindigkeit aus GPS oder externen Geschwindigkeitsmessern
Genauigkeiten der Geschwindigkeit	Standardabweichung der Nord-, Ost- und Vertikalgeschwindigkeiten

Tabelle 6: Informationen zur Stützung der INS

6.3.4 Andere Sensoren

Elektronische Kompass mit standardisierten NMEA-0183 Schnittstellen werden in das System eingebunden. Folgende Formate stehen zur Verfügung.

Format	Beschreibung
NMEA-VTG	Kurs über Grund, rechtweisender Kurs
NMEA-VHW	Missweisender Kurs, rechtweisender Kurs
NMEA-HDT	Rechtweisender Kurs

Tabelle 7: NMEA-Datenformate für Kompassdaten

6.4 Ausgabeformate

Die Datenausgabe erfolgt in standardisierten NMEA-0183 Formaten. Folgende Formate stehen zur Verfügung.

Format	Beschreibung
NMEA-GGA	Geographische Position und Zeitzuordnung
NMEA-GLL	Geographische Position und Zeitzuordnung
NMEA-GSA	Satelliteninformationen
NMEA-VTG	Kurs und Geschwindigkeit über Grund

Tabelle 8: NMEA-Datenformate der Ausgabedaten

Weitere NMEA-Formate können implementiert werden. Es besteht die Möglichkeit Ausgabedatenformate für die Position, die Lage und die Zeit frei zu definieren. Die Angabe der Standardabweichungen der ausgegebenen Daten ist möglich.

Die GPS-Rohdaten können optional im RINEX 2.0-Format gespeichert werden.

Alle zur Nutzung der Postprocessing-Option notwendigen Daten werden optional aufgezeichnet.

7. Datenrate

7.1 Dateneingabe

7.1.1 Korrekturdaten

Die Datenrate der über Datenfunk empfangenen Korrekturdaten beträgt üblicherweise 1 Hz.

7.1.2 GPS-Empfänger

Die Datenrate der GPS-Rohdaten kann, abhängig vom eingesetzten GPS-Empfängertyp, bis zu 5 Hz betragen.

7.1.3 INS und andere Sensoren

Die Datenrate der INS und der anderen Sensoren ist abhängig von Art und Qualität der Sensoren. Die Daten werden gefiltert und dem System mit einer Datenrate von maximal 5 Hz zur Verfügung gestellt.

7.2 Datenverarbeitung

Die Datenrate bei der Verarbeitung der Daten im Rechner beträgt üblicherweise 1 Hz. Liegen entsprechend höhere Datenraten bei der Dateneingabe an, kann eine Datenrate bis zu 5 Hz bei der Datenverarbeitung realisiert werden.

7.3 Datenausgabe

Die Datenrate bei der Ausgabe der Daten ist üblicherweise gleich der Datenrate bei der Datenverarbeitung. Mit Prädiktionsalgorithmen sind, unter Einschränkung der Genauigkeit, auch bei niedrigen Datenraten bei der Datenverarbeitung, 5 Hz Ausgabedatenrate zu realisieren.

8. Datenalter

Das Datenalter der Positions- und Lagedaten wird vom System bereitgestellt und soll möglichst gering gehalten werden. Es setzt sich aus dem Datenalter der Eingangsdaten, der Rechendauer und der Übertragungszeit der Ausgabedaten zusammen.

Das Datenalter der Eingangsdaten vom GPS-Empfänger kann, abhängig vom Empfängertyp, bis zu 1 Sekunde betragen. Das Datenalter der Korrekturdaten kann, abhängig von der Referenzstation und der Wahl des Übertragungskanals, bis zu 2 Sekunden betragen. Das Datenalter der Positions- und Lagedaten aus INS oder anderen Sensoren ist abhängig von Art und Qualität der Sensoren.

Die Berechnung der Positions- und Lagedaten soll die Rechendauer von 0,5 Sekunden nicht überschreiten. Damit ist die Zeit gemeint, die zwischen der Datenaufnahme von den Sensoren und der Bereitstellung der Korrekturdaten bis zur Ausgabe verstreicht.

Das Datenalter der berechneten Positions- und Lagedaten beträgt damit vor der Ausgabe etwa 1 - 3 Sekunden.

Die Berechnung von prädizierten Positionsdaten für Navigationsanwendungen wird mit einem Datenalter von 0 Sekunden mit verminderter Genauigkeit vorgenommen.

9. Dokumentation

Das System ist mit einer umfassenden Dokumentation zu versehen. Diese enthält eine “On-Line”-Hilfe, die dem Nutzer jederzeit zur Verfügung steht. Ein schriftliches Handbuch mit detaillierten Erklärungen zur Struktur, zu den Optionen und zur Handhabung des Systems ist Bestandteil der Dokumentation.

10. Nutzeroberfläche

Das System enthält eine Nutzeroberfläche, die Positions- und Lagedaten, sowie die Zeit, anzeigt. Die Nutzeroberfläche ermöglicht es Einflußgrößen und Optionen zu ändern und dem Nutzerwunsch anzupassen.

Von der Nutzeroberfläche kann das Ein- und Ausgabeformat und die Datenrate der verfügbaren Sensoren festgelegt werden. Es besteht die Möglichkeit Sensoren dem System zuzuschalten oder vom System zu trennen.

Es werden Systemzustand und Datenqualität permanent angezeigt. Der Status der Korrekturdaten und des GPS-Systems werden angezeigt. Bei kritischen Systemzuständen wird der Nutzer gewarnt. Es besteht die Möglichkeit die Mehrdeutigkeitslösung zu verwerfen und die erneute Festsetzung der Mehrdeutigkeiten zu starten.

Koblenz, den 01. April 1997