

# Optimierung der hydrographischen Positions- und Lagebestimmung

*Volker Böder*

HafenCity Universität Hamburg, Germany

## 1 Einleitung

Ende der 1990'er Jahren hat sich der Autor am Institut für Erdmessung, Universität Hannover, unter der Leitung von Professor Dr.-Ing. Günter Seeber mit der Konzeptionierung und Erstellung eines Systems zur Optimierung der hydrographischen Positions- und Lagewinkelbestimmung befasst. Im Wesentlichen basiert das Echtzeitsystem auf der Nutzung präziser GNSS-Messungen und auf der Integration mit den Messdaten weiterer Sensoren. Durch die Reduzierung entfernungs- und stationsabhängiger Anteile des GPS-Fehlerhaushalts, durch Vernetzung und Kalibrierung von Referenzstationen werden nahezu alle Anforderungen an die Positions- und Lagebestimmung beispielsweise an den deutschen Küsten erfüllt. Die Erstellung und Untersuchung des Systems wurde in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, und der Firma Geo++ GmbH in Garbsen vorgenommen.

Das Systemkonzept wird seit 2004 am Fachbereich Geomatik der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (seit 1.1.2006 HafenCity Universität Hamburg) in der Hydrographie auf dem Vermessungsboot Level-A für Forschung und Lehre umgesetzt. Dem Verfasser ist es vergönnt, als neu berufener Professor für Praktische Geodäsie und Hydrographie seit September 2005 die Realisierung mit Nutzen und hier beschreiben zu können. Ein Beispiel, das die Umsetzung von Entwicklungen an der Universität für den Einsatz in der Praxis aufzeigt, insbesondere am Institut für Erdmessung unter der Projektleitung von Professor Dr.-Ing. Günter Seeber.

## 2 Motivation

Die in den meisten Anwendungen genauigkeitsbestimmende Zielgröße in der Hydrographie ist die beschickte Tiefe. Die maßgeblichen Mindeststandards der *International Hydrographic Organization (IHO)* sehen eine Genauigkeit von 0,25 m zuzüglich eines tiefenabhängigen Anteils für beschickte Tiefen in kritischen Anfahrten wie zum Beispiel Hafengebieten vor (IHO-S44). Der Fehlereinfluss der Höhenbestimmung einer GPS-Antenne an Bord eines Messschiffes sollte aus Überlegungen zum Gesamtfehlerbudget unter 10 cm bleiben.

Der Deutsche Funknavigationsplan von 1999 weist für Ortungsaufgaben im Hafen Genauigkeitsanforderungen von 0,1 m aus, ebenso für maritime Offshore-Anwendungen und in der Forschung und Entwicklung. Für die Gewässervermessung wird ebenfalls eine Höhen-genauigkeit von besser als 10 cm angegeben. Bereits vor 10 Jahren wurden in einer Nutzerumfrage des Instituts für Erdmessung bei hydrographischen Anwendern Werte von 3 cm genannt. Vergleichbare Anforderungen sind für das flugzeuggetragene Laserscanning im Küstenbereich zu nennen.

Für die Beschickung von Peilmessungen wird in der Praxis vielfach noch das indirekte Verfahren über einen oder mehrere Wasserpegel verwendet. Bei hochpräzisen GPS-Lösungen werden immer noch fehlerhafte Mehrdeutigkeitsfestsetzungen nachgewiesen, die Sprünge in

den Positionen hervorrufen. Aus wirtschaftlicher Sicht sind direkte Verfahren vorzuziehen. Abbildung 1 zeigt eine Prinzipskizze zur direkten Beschickung mit GPS-Verfahren.

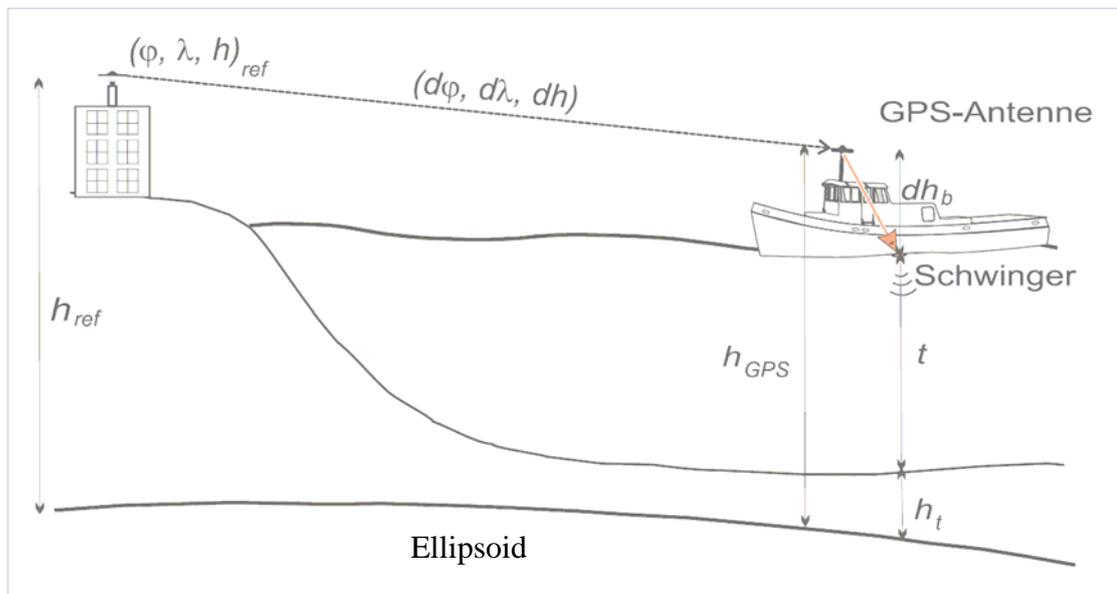


Abbildung 1: Prinzipskizze zur direkten Beschickung mit GPS (Böder 2002).

Die Position der GPS-Antenne wird auf den hydrographischen Sensor transformiert. Im einfachsten Fall ist die Antenne über dem Schwinger auf kurzer Entfernung an Heck, Bug oder Seite montiert, so dass zur Transformation die Reduktion der GPS-Antennenhöhe um die Höhendifferenz  $dh_b$  reicht. Liegt der Schwinger unter dem Kiel oder ist die Antenne nicht über dem Schwinger zu montieren, so muss die Antennenposition beispielsweise über drei Rotationen (Rollen, Stampfen, Gieren) des Antenne-Schwinger-Vektors auf den Schwinger transformiert werden. Die Messung der Schiffsbewegungsparameter geschieht über inertielle Messsysteme oder GPS.

Unter anderem die Messung mit Fächerecholoten (multi beam echo sounder MBES) setzt die Bestimmung der Schiffslagewinkel, insbesondere des Rollens um die Schiffslängsachse, mit hoher Genauigkeit voraus. Inertielle Messsysteme höchster Qualität leisten dies, sind aber teuer und bezüglich ihrer Genauigkeit von der Dynamik der Messplattform abhängig. Aufgabe ist es, das GPS-Fehlerbudget (siehe Tabelle 1) zu reduzieren, GPS-Lagewinkelbestimmung bereit zu stellen und zusätzliche Sensorik einzubinden.

Tabelle 1: Wesentliche GPS-Fehlerquellen und ihre Auswirkungen auf die Strecken der Trägerphasenmessung

Fehlerquelle Einfluss	Satellitenbahnen	Satellitenuhren	Ionosphäre	Troposphäre	Empfänger-multipath	Empfänger-Antenne
absolut	5-50 m	5-100 m	0.5-<100 m	0.01-0.5 m	mm-cm	mm-cm
relativ	0-2 ppm	0	1-<50 ppm	<3 ppm	mm-cm	mm-cm

### 3 Reduzierung entfernungsabhängiger Fehleranteile

Der GPS-Fehlerhaushalt wird nach entfernungsabhängigen und stationsabhängigen Wirkungen unterteilt. Unter anderem sind die GPS Messgrößen durch atmosphärische Ausbreitungsverzögerungen und Bahnfehler mit Fehleranteilen behaftet. Bei relativen DGPS Positionsbestimmungen sind die Auswirkungen dieser Fehler mit der Entfernung zu den Referenzstationen korreliert: je größer die Entfernung, desto größer die Auswirkung auf die

Positionsbestimmung des Rovers. Besonders in marinen Anwendungsbereichen ist eine Vernachlässigung dieser Fehler problematisch, da die Zahl der Referenzstationen im Meeresbereich nicht beliebig erhöht werden kann. Die Stationen werden üblicherweise auf dem Festland und auf Inseln installiert. Im Meeresbereich mangelt es für hohe Genauigkeitsansprüche an bewegungsinvarianten Montierungsmöglichkeiten.

Für Anwendungen in sicherheitsrelevanten küstennahen Bereichen gelingt die Reduzierung entfernungsabhängiger Fehleranteile durch die Vernetzung vorhandener Referenzstationen. An der deutschen Nord- und Ostseeküste ist die Überdeckung mit Referenzstationen recht gut, so dass eine Vernetzung in den maßgeblichen Bereichen möglich ist.

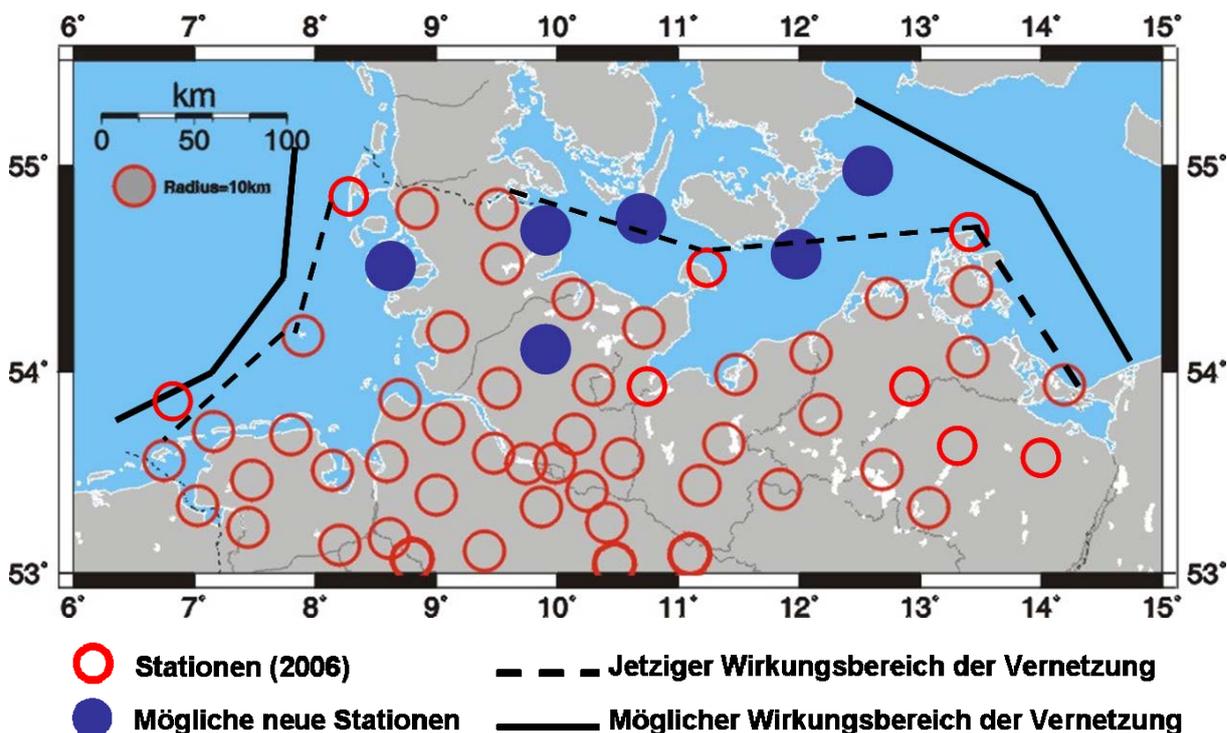


Abbildung 2: Referenzstationsvernetzung an der deutschen Nord- und Ostseeküste

Abbildung 2 zeigt eine SAPOS-Stationsübersicht (Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung). Der Basis für den Entwurf eines möglichen Wirkungsbereiches der Vernetzung ist Böder (2002) entnommen und basiert auf einer Simulation eines Referenzstationsnetzes mit Hilfe von realen Daten verschiedener Messepochen. Das Ergebnis der Simulation ergab, dass die Vernetzung von Referenzstationen die Verfügbarkeit hochpräziser Positionen deutlich erhöht. Innerhalb eines Referenzstationsnetzes, deren Stationen etwa 40 km bis 60 km auseinander liegen, wurden die Mehrdeutigkeiten im Mittel in 1 min erfolgreich gelöst. In weniger als 1% der Fälle kam es dabei zu falschen Mehrdeutigkeitsfestsetzungen. Die dreidimensionale Genauigkeit der Positionsbestimmung liegt bei 2 cm bis 3 cm innerhalb und zum Teil auch außerhalb des von den vernetzten Referenzstationen umschlossenen Gebietes.

Um eine Erweiterung des Wirkungsbereiches der Vernetzung zu erreichen, wurde 45 km nördlich von Borkum eine Referenzstation auf der Forschungsplattform Fino1 installiert. Die Bewegungen der dortigen Antenne werden frei modelliert. Des Weiteren werden inzwischen testweise zwei Referenzstationsdatenströme aus dem Trimble-Netz in Dänemark in die Vernetzung Schleswig-Holstein integriert.

#### **4 Reduzierung stationsabhängiger Fehleranteile (Kalibrierung)**

Zu den stationsabhängigen Fehleranteilen zählen insbesondere die Variationen der Phasenzentren der Empfängerantennen und die Mehrwegeeffekte. Phasenzentrumsvariationen der Empfängerantennen beeinträchtigen die Genauigkeit der Positionsbestimmung sowohl auf statischen Punkten (Referenzstationen, Pegelpunkte) als auch auf mobilen Roverstationen. Die Auswirkungen der PCV lassen sich nicht in jedem Falle durch die Verwendung baugleicher Antennen eliminieren. Abweichungen in der Bauweise und in der Orientierung der Antennen führen zu Modellierungsungenauigkeiten.

In Referenzstationsnetzen oder auf quasi statischen Punkten (z.B. stationäre Pegel, Fest- und Kontrollpunkte), die hochgenau mit GPS bestimmt werden sollen, wird eine absolute Kalibrierung der Antennen empfohlen. Dies gilt besonders für Höhenbestimmungen. Für den Einsatz im Felde ist eine Kalibrierung der GPS-Antennen für Genauigkeitsanforderungen von besser als 3 cm ratsam. Bei dem typischen Einsatz auf Messschiffen in marinen Anwendungen wird eine Kalibrierung der PCV nicht zwingend erforderlich sein.

Die Verwendung von absoluten Antennenkalibrierungen ist im Hinblick auf Genauigkeit, Funktionalität und Modellierung der Fehleranteile am Besten geeignet. Für die Nutzung in hochpräzisen kinematischen Anwendungen mit geneigten und gegenüber der Nordrichtung gedrehten Antennen müssen die Lagewinkel der Antenne zur Reduktion berücksichtigt werden. Für hochpräzise Anwendungen muss daher zumeist ein Lage-Messsystem verfügbar sein, so dass die PCV in vollem Umfang angebracht werden können.

#### **5 Lagewinkelbestimmung**

Für Navigationszwecke lässt sich der Kurs über Grund (Trackwinkel) eines Messschiffes über die Trajektorie einer einzelnen GPS-Antenne bestimmen. Dieser beschreibt jedoch nicht die Nordausrichtung der Plattform, sondern ist durch äußere Einflüsse wie Wind und Strom um den Gierwinkel verschieden. Zur Korrektur und Transformation der Werte an Bord können inertielle und GPS-Lagemesssysteme verwendet werden.

Die Differenzen bei der Bestimmung der Rollbewegung zwischen verschiedenen Lagemesssystemen sind beispielhaft in Abbildung 3 nachgewiesen. Auf dem Vermessungs-, Wracksuch- und Forschungsschiff (VWFS) Deneb des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) wurde eine Testfahrt mit dem operationell an Bord eingesetzten rein inertialen Messsystem TSS 335B, dem GPS-gestützten inertialen System TSS POS/MV 320 und dem reinem GPS-Lagemesssystem COMPASS der Firma Geo++ durchgeführt. Die Schiffsbewegung erreichte Größenordnungen von  $\pm 3^\circ$  für die beschleunigten Fahrten und zur Zeit der Kurskorrekturen. Während des Aufstoppens sind nur geringe Rollbewegungen von ca.  $\pm 0,5^\circ$  zu erkennen. Die Standardabweichung der Abweichungen zwischen POS/MV und COMPASS errechnen sich zu  $0,11^\circ$ , die der Abweichungen zum TSS 335B zu  $0,32^\circ$ . Es zeigt 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 integrierenden System voll genutzt werden.

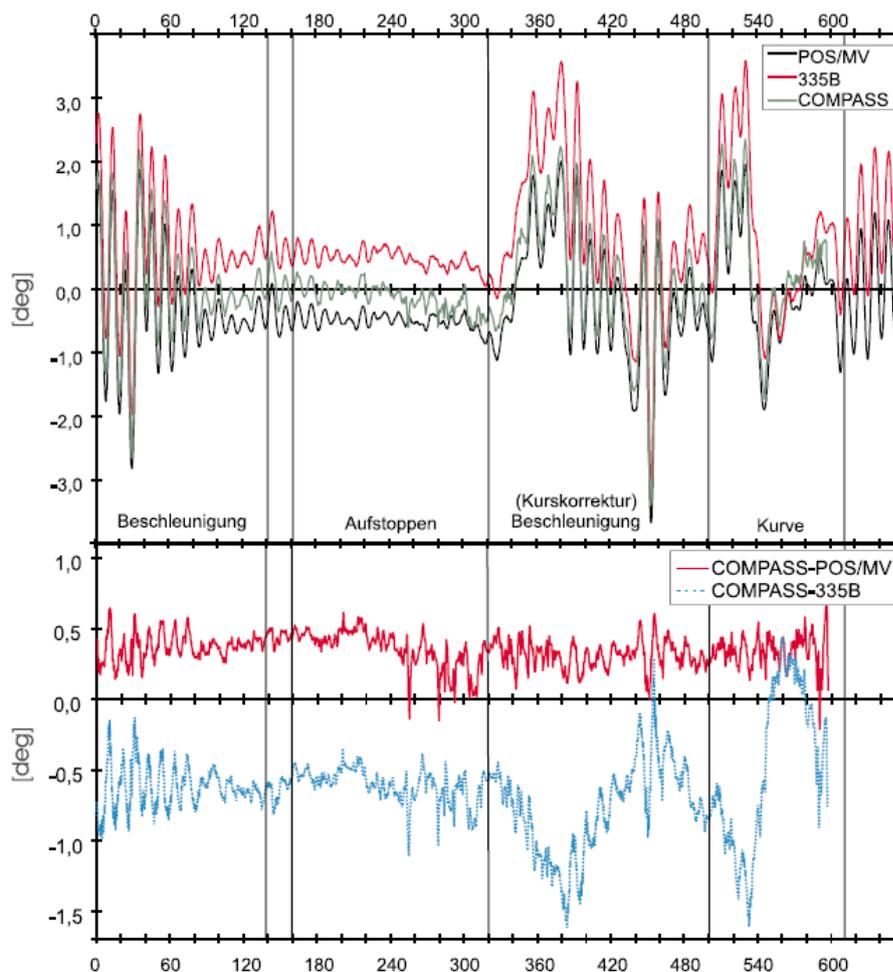


Abbildung 3: Rollbewegung und Differenzen bei einer „normalen“ Messfahrt zwischen den Lagemesssystemen TSS POS/MV 320, TSS 335B und COMPASS. Fahrt mit dem VWFS Deneb des BSH (Böder 2002).

## 6 Stützung eines hydrographischen Messsystems mit inertialen Messdaten

Ausgehend von einer auf GPS basierenden Positionsbestimmung für hydrographische Auswertesysteme kann die zusätzliche INS-Positionsbestimmung die folgenden vier Einsatzmöglichkeiten bieten:

- Positionsbestimmung mit einer höheren Datenrate als die des GPS-Messsystems. INS liefern üblicherweise Daten mit einer Rate von 50 Hz bis 200 Hz, GPS mit 1 Hz bis 10 Hz.
- Genauere Navigationslösung. Das Datenalter der GPS-Lösung kann bei präzisen RTK-Lösungen mehrere Sekunden betragen, bei INS-Systemen liegt es üblicherweise unter 1 s. Für eine präzise Navigationslösung (dm-Genauigkeit) in Echtzeit muss eine GPS-Lösung prädiert werden, während eine INS-Messung direkt verfügbar ist. Derartige hohe Genauigkeiten sind mit INS- Systemen nur mit Stützung durch externe Sensoren möglich.
- Überbrücken von GPS-Datenlücken bei Total-Messausfall der GPS-Bordanlage oder Abschattungen an den Bordantennen, gegebenenfalls auch bedingt durch den Ausfall des Korrekturdatensignals der Referenzstation.
- Stützung bei der Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten bei auftretendem Verlust der Phasenbeziehungen (cycle slips) durch Verringerung des Mehrdeutigkeits-Suchraumes. Zur direkten Ableitung der Mehrdeutigkeiten aus der INS-Positionsinformation sollte die Position mit besser als die Hälfte der GPS-L1-Trägerphasenwellenlänge, also mit ca. 10 cm für mindestens 5 s bekannt sein.

Tabelle 2: Kenndaten des AHRS LCR-88 von Litef.

	Kreisel	Beschleunigungsmesser
drift/bias	0.3°/h	500 $\mu$ g
Skalenfaktor	1000 ppm	1000 ppm
Rauschen	0.05°/ $\sqrt{h}$	10 $\mu$ g
Genauigkeit ( $2\cdot\sigma$ )		
Azimut	0.5° - 2°	
Rollen, Stampfen	0.2° - 1°	
Drehrate	0.1°/s	
Beschleunigung		0.03 g

Tabelle 3 zeigt Ergebnisse einer Simulation mit Messdaten eines inertialen Lagemesssystems LCR-88 von Litef (Kenndaten siehe Tabelle 2) in Kombination und im Vergleich mit einer präzisen GPS-Lösung. Die Messdaten wurden auf einer der letzten Fahrten mit dem Vermessungsschiff (VS) Greif des Wasser- und Schifffahrtsamtes (WSA) Cuxhaven generiert. In einem ersten Simulationsschritt wurden die inertialen Messdaten mit der zugehörigen zentrierten präzisen GPS-Lösung gestützt. Die gewonnene Lösung des inertialen Systems wurde auf die GPS-Zeit interpoliert und mit der GPS-Lösung verglichen. Danach wurden künstlich Datenlücken in die GPS-Lösung eingefügt und der Auswertegang wiederholt. Die inertialen Messdaten wurden mit der Auswertesoftware AG\_IFE von Professor Bäumker (FH Bochum) ausgewertet, der auch das LCR-88 zur Verfügung stellte.

Tabelle 3: Auswirkung von GPS-Datenlücken auf die INS-Positionsbestimmung; Simulation im Postprocessing mit dem Programm AG\_IFE\_P; Fahrt mit dem VS Greif der WSA Cuxhaven.

Länge der Datenlücke	Höhe	quer zur Fahrtrichtung	in Fahrtrichtung	radial
0 s	2 cm	1.5 cm	1 cm	2.5 cm
3 s	6.5 cm	14.6 cm	5.8 cm	18.9 cm
5 s	9.5 cm	11.7 cm	9.7 cm	20.7 cm
10 s	9.4 cm	40.8 cm	17.6 cm	49.2 cm

Ausgehend von diesen Ergebnissen mit einem nicht optimal auf hydrographische Anwendungen abgestimmten System lässt sich ableiten, dass mit geringen Genauigkeitseinbußen von 2 cm die GPS-Position auf 50 Hz bis 100 Hz verdichtet werden kann. Datenlücken von wenigen Sekunden Länge lassen sich überbrücken. Das für RTK-Positionen typische Datenalter von maximal 3 s kann für die Navigation mit einer Genauigkeit von besser als 2 dm auf den für inertielle Messsysteme üblichen Bruchteil einer Sekunde verringert werden. Zur Stützung der Mehrdeutigkeitslösung ist eine Positionsbestimmung mit einer Genauigkeit von besser als 10 cm gefordert. Diese Genauigkeit kann nur für 1 s bis 2 s angenommen werden. Für eine effektive Anwendung sollte sie jedoch mindestens 5 s gehalten werden können.

Das Gesamtkonzept, das in Böder (2002) beschrieben wird, wird in Abbildung 4 dargestellt. Es basiert auf dem echtzeitfähigen System GNNET der Firma Geo++ und wurde in dem Vorhaben „Optimierung der hydrographischen Positions- und Lagebestimmung“ entwickelt (BMBF 1998).

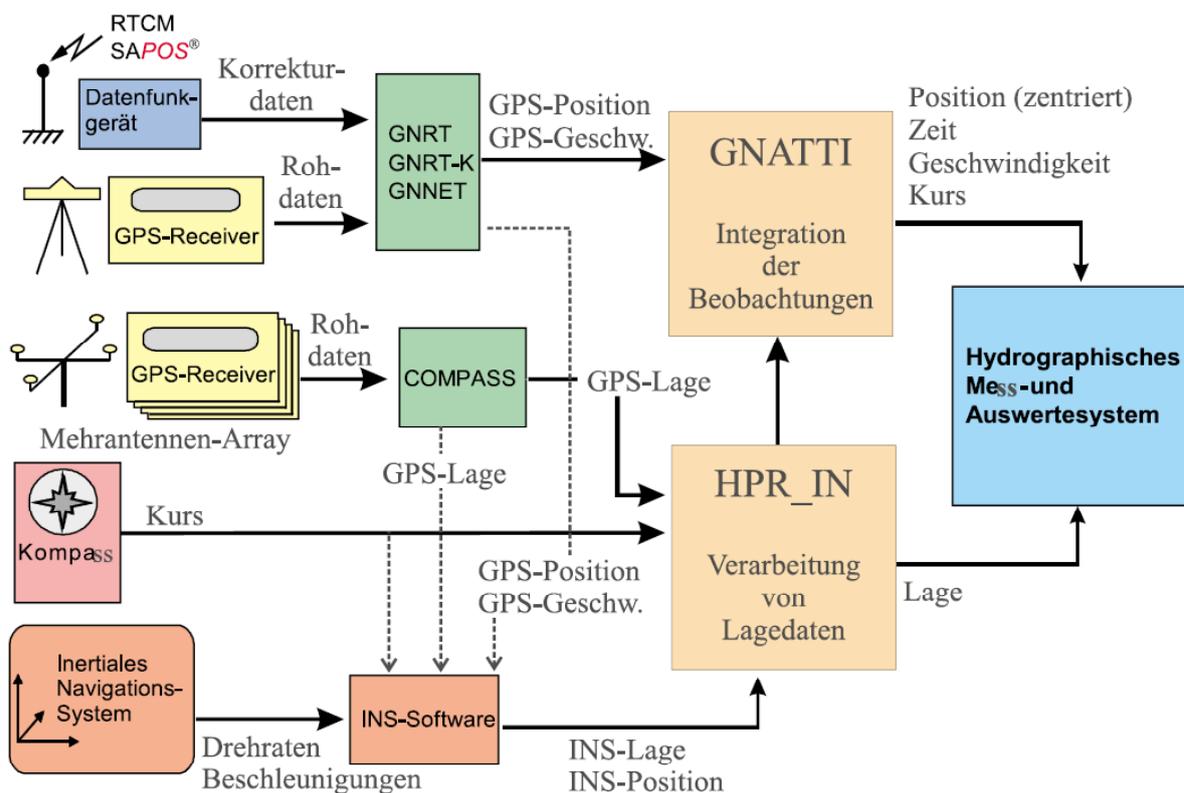


Abbildung 4: Zusammenführung der Positions- und Lagedaten zur Nutzung in einem hydrographischen Messsystem (Böder 2002).

## 7 Systemaufbau an der HCU Hamburg

Die HCU bietet im Department Geomatik einen Masterstudiengang Hydrographie an, der von der International Hydrographic Organisation (IHO) mit der international höchsten Einstufung Level-A zertifiziert wurde. Um den hohen Anspruch gerecht zu werden, muss eine adäquate technologische Grundausstattung verfügbar sein. Daher hat man sich im Arbeits- und Forschungsbereich Hydrographie bemüht, bei Neubeschaffungen auf die Möglichkeit einer multifunktionalen Verwendung im simultanen Betrieb zu achten. Das oben beschriebene Konzept entspricht diesen Anforderungen in besonderer Weise, so dass es an der HCU –ohne Zutun des Autors- realisiert und weiterentwickelt werden konnte. Die Softwarekomponenten und der Datenfluss des installierten Systems ist der Abbildung 6 zu entnehmen. Zur Bestimmung der Lagewinkel werden vier Zweifrequenz GPS/GLONASS Empfänger vom Typ Javad betrieben. In dem modularen Aufbau wird mindestens einer der Empfänger auch zur Positionsbestimmung über eine eigene Referenzstation oder über SAPOS, dem Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung, betrieben. Zusätzlich können weitere Sensoren in das System integriert werden. Der modulare Aufbau des Systems erlaubt auch den Einsatz in anderen Projekten, wie zum Beispiel der Ingenieurgeodäsie.



Abbildung 5: Messschiff LEVEL-A des Department Geomatik, HCU (Andree 2005).

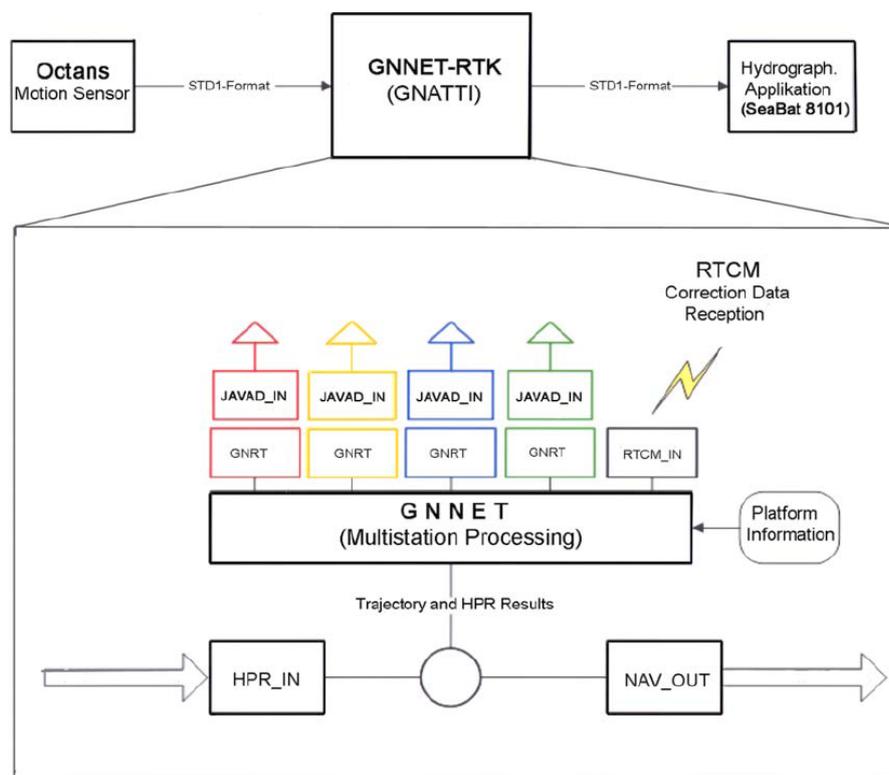


Abbildung 6: Softwarekomponenten und Datenfluss des GNSS-Positions- und Lagemesssystems an der HCU (Andree 2005).

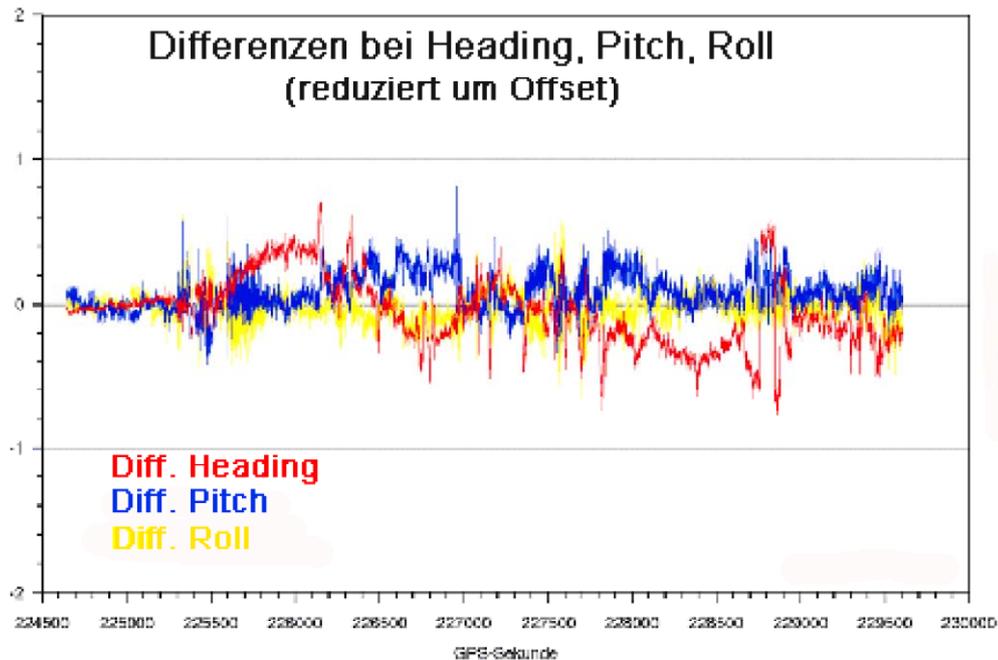


Abbildung 7: Differenz zwischen den Lagewinkelbestimmungen mit GNNET und OCTANS III, reduziert um Offset, Testmessung auf LEVEL-A am 15.04.2005 (Andree 2005).

Weiterhin wird an Bord ein inertiales Messsystem der Firma IXSEA vom Typ OCTANS III betrieben. Das Instrument basiert auf faseroptischer Kreiseltechnik und liefert laut Systemspezifikationen die folgenden Genauigkeiten:

- Kurs:  $0,1^\circ$  secant (geographische Breite), in Hamburg entsprechend etwa  $0,17^\circ$ ,
- Rollen und Stampfen:  $0,01^\circ$  und
- Hub: 5 cm oder 5%, jeweils der höhere Wert.

Diese Genauigkeiten werden ohne Stützung durch GPS-Information erreicht. Die Integration in dem Gesamtsystem wird stetig harmonisiert und ist Gegenstand aktueller Untersuchungen. Bei einer Testmessung auf der LEVEL-A wurde die Leistungsfähigkeit des Systems weitgehend bestätigt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt.

Die Sensorik dient insbesondere der Beschickung hydrographischer Vermessungen an Bord des Vermessungsbootes LEVEL-A (siehe Abbildung 5). Abbildung 8 zeigt eine mögliche Systemkonfiguration zum Betrieb der „Multifunktionalen Fächersonar Konfiguration MFK“. Das Fächersonarsystem erfüllt die Anforderungen eines Fächerecholotes, eines Subbottom Profilers und eines Side Scan Sonars und ist somit für eine Vielzahl von hydrographischen Anwendungen geeignet.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem dargestellten System verfügt der Arbeits- und Forschungsbereich Hydrographie an der HCU über ein modular aufgebautes Instrumentarium, dass im besonderen Maße für die Lehre und die Forschung konzipiert ist. Weitergehende Untersuchungen zum Einsatz modernster Technologien werden hiermit ermöglicht.

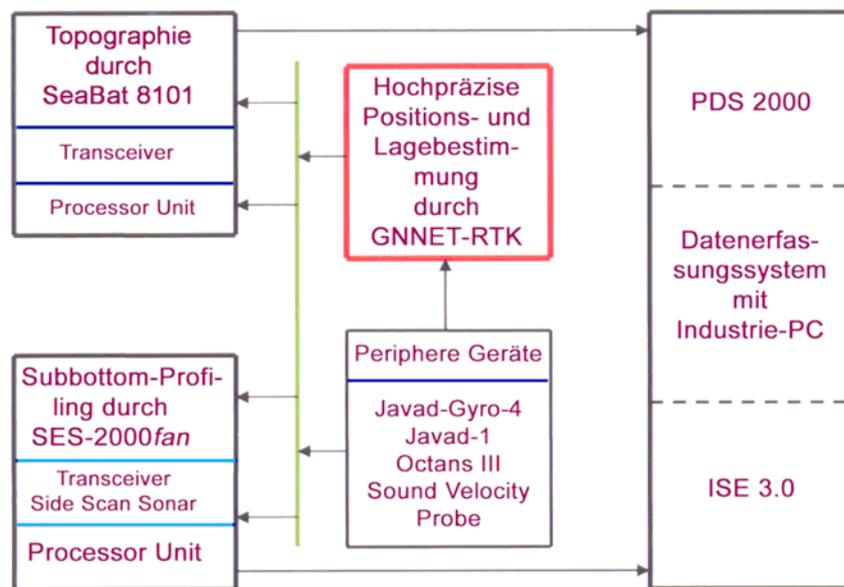


Abbildung 8: Mögliche Systemkonfiguration für Fächerecholotvermessungen an Bord der LEVEL-A (Andree 2005).

Die HCU befindet sich in der Gründungsphase. Auch die seit über 20 Jahren bestehende Präsenz der Hydrographie an den Hochschulen in Hamburg befindet sich im Umbruch und wird aktuell auf zukunftsichere Beine gestellt.

Die ersten Absolventen des Masterstudiengangs Hydrographie in Hamburg werden ihre Prüfung just an dem Tag ablegen, an dem Professor Seeber seinen 65. Geburtstag feiert. In Lehre, Forschung und Praxis werden die Inhalte und Werte, die Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Günter Seeber vermittelt, insbesondere bezüglich der Hydrographie in Hamburg weitergegeben werden.

## Literatur

- Andree (2005). Die Bedeutung der Positions- und Lagebestimmung beim Einsatz multifunktionaler Fächersonare. Festschrift für Prof. Jürgen Zastrau. HAW Hamburg.
- BMBF (1998). Optimierung der hydrographischen Positions- und Lagebestimmung. Abschlussbericht zum BMBF-Vorhaben (FKZ MTK 590A+MTK 590B), Institut für Erdmessung, Universität Hannover, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, August 1998.
- Böder (2002). Zur hochpräzisen GPS-Positions- und Lagebestimmung unter besonderer Berücksichtigung mariner Anwendungen. Schriftenreihe: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 245.