



Hochschule Neubrandenburg  
University of Applied Sciences

# Möglichkeiten zur Nutzung von Bewegungs- sensoren in kleinen Vermessungsbooten

**Bachelorarbeit**

vorgelegt von: Sabrina Kranz

zur Erlangung des akademischen Grades

**„Bachelor of Engineering“ (B. Eng.)**

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Karl Foppe

Zweitprüfer: Dr.-Ing. Wilfried Ellmer

URN: urn:nbn:de:gbv:519-thesis2011-0538-9

Neubrandenburg, September 2011

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Bachelorarbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Neubrandenburg, den \_\_\_\_\_

Ort, Datum

\_\_\_\_\_

Unterschrift

## **Vorwort**

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Karl Foppe und Dr.-Ing. Wilfried Ellmer für die Betreuung meiner Bachelorarbeit und die fachliche Unterstützung während der Erstellung dieser Arbeit. Weiterhin danke ich der Besatzung des Vermessungsschiffes Komet für die tatkräftige Unterstützung bei den Messfahrten.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie und meinem Freund für moralische und finanzielle Unterstützung während des gesamten Studiums und besonders während der Erstellung dieser Bachelorarbeit.

## **Kurzfassung**

In der Hydrographie werden die, durch Seegang verursachten Schiffsbewegungen überwiegend mit Hilfe von Bewegungssensoren bestimmt. Auf großen Schiffen erfolgt der Einsatz dieser Sensoren weitestgehend problemlos. Auf den kleinen Vermessungsbooten führen die hohen Bewegungsfrequenzen oft zu unbrauchbaren Korrekturen. Die Korrekturen der Schiffsbewegungen werden jedoch benötigt, um die von der „International Hydrographic Organization“ festgelegten Mindeststandards einhalten zu können.

Die Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie erstellt. Auf den Booten des VS Komet wurden neue Bewegungssensoren installiert. Im Rahmen dieser Arbeit soll festgestellt werden, mit welcher Genauigkeit die Korrekturen bestimmt werden und wie diese Sensoren in der Seevermessung eingesetzt werden können.

## **Abstract**

In hydrography ship movements will determined by motion sensors. On large ships the motion sensor works without problems. Because of the high movement frequencies on the small survey boats the sensors do not work correctly. The corrections of the ship movements are required to keep the minimum standards of the “International Hydrographic Organization”.

This work was created in cooperation with the “Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie”. On the boats of the VS Komet were new motion sensors installed. In this thesis should be noted, with which accuracy determined the corrections and how these sensors can be used in hydrographic surveying.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Eidesstattliche Erklärung</b> .....	<b>2</b>
<b>Vorwort</b> .....	<b>3</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>4</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>4</b>
<b>Aufgabenstellung</b> .....	<b>7</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>8</b>
<b>2. Grundlagen</b> .....	<b>9</b>
2.1 Echolotmessung .....	9
2.1.1 Vertikalecholot (Single-Beam-Echolot).....	9
2.1.2 Mehrfachschwingersysteme .....	9
2.2 Wasserschall .....	10
2.3 Bezugshorizont.....	11
2.4 Schiffsbewegungen .....	11
<b>3. Positionierung</b> .....	<b>13</b>
3.1 GNSS.....	13
3.2 Differentielles GNSS .....	13
3.3 SAPOS® .....	14
<b>4. Beschickungsverfahren</b> .....	<b>15</b>
<b>5. Systeme zur Bestimmung von Schiffslageänderungen</b> .....	<b>17</b>
5.1. GNSS.....	17
5.2. Inertiale Navigationssysteme.....	17
5.2.1 Aufbau inertialer Messsysteme .....	18
5.2.2 Beschleunigungsmesser .....	20
5.2.3 Drehratensensoren .....	21
<b>6. Vermessungsschiff Komet</b> .....	<b>24</b>
<b>7. Verwendete Geräte</b> .....	<b>25</b>
7.1 Leica GNS-System 1200.....	25
7.2 Octans III .....	25
7.3 Trimble SPS361 .....	26

7.4 TCM2 .....	27
<b>8. Durchführung der Messungen auf See und im Labor .....</b>	<b>29</b>
8.1 Messungen auf See .....	29
8.1.1 Versuchsaufbau für die Messfahrten .....	29
8.1.2 Durchführung.....	31
8.1.3 Zeitsynchronisation.....	33
8.2 Messungen im Labor.....	35
<b>9. Auswertung der Laboruntersuchungen .....</b>	<b>38</b>
9.1 Langzeitmessung.....	38
9.2 Kursstabilität .....	39
9.3 Wiederholungsmessungen .....	41
9.4 Hysterese .....	42
<b>10. Auswertung der Messfahrten auf See .....</b>	<b>43</b>
10.1 Vergleich der Messfahrten „starker Seegang“ und „Dünung“ .....	44
10.1.1 Hub.....	44
10.1.2 Rollwinkel.....	47
10.1.3 Stampfwinkel .....	51
10.1.4 Kurs .....	52
10.2 Weitere Messfahrten.....	53
10.2.1 Spirale .....	53
10.2.2 Nikolaushaus.....	55
10.2.3 Geschwindigkeitswechsel .....	57
10.2.4 Dünung – Fahrt mit der Welle .....	59
<b>11. Zusammenfassung .....</b>	<b>61</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>64</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>66</b>

## Aufgabenstellung

Wie alle geodätischen Messungen müssen auch Tiefenmessungen der Seevermessung um ihre systematischen Fehler korrigiert werden. Dazu gehören alle Fehler, die durch die Seegangsbewegungen des jeweiligen Fahrzeuges entstehen. Seegangsfehler wirken sich entweder unmittelbar als Hubfehler in der Tiefenmessung aus, oder in zweiter Ordnung in einem Hubanteil, der durch Rollen oder Stampfen verursacht wird. Zur Erfassung dieser Bewegungen werden Bewegungssensoren eingebaut, die auf den großen Schiffen ohne wesentliche Probleme eingesetzt werden können. Auf den kleinen Vermessungsbooten des VS Komet führten sie jedoch in der Vergangenheit immer wieder zu unbrauchbaren Korrekturen. Ursache dafür sind die hohen Bewegungsfrequenzen und die Unregelmäßigkeit der Bewegungen.

Es ist anhand praktischer Messungen vor Ort zu testen, ob die Daten der neu in den Booten der KOMET eingebauten Sensoren besser als bisher genutzt werden können.

Als Möglichkeit der Nutzung kommen infrage:

- dass die Daten zur Reduktion der Roll- und Stampfbewegungen genutzt werden, wenn die Höhenänderungen mit PDGNSS gemessen oder
- dass bei hinreichend genau gemessenen Hubbewegungen, die Gezeitenbeschickung mit Hilfe von Wasserstandsmessungen durchgeführt wird, wenn keine GNSS-Signale zur Verfügung stehen.

Zur Erfüllung dieser Aufgabe sollen in Absprache mit der Besatzung geeignete Testgebiete ausgewählt werden und Messungen unter verschiedenen Seegangbedingungen ausgeführt werden. Die Daten dieser Messungen sollen so ausgewertet werden, dass festgestellt werden kann, in welcher Qualität die Seegangseinflüsse korrigiert werden können, und aus den Ergebnissen konkrete Vorschläge für die Nutzung der Sensoren abgeleitet werden, ggf. auch für die Einstellung von Parametern. Wenn es möglich ist, sollen zusätzlich Low-Cost-Sensoren für die Roll- und Stampfbewegungen eingesetzt und mit den eingebauten Sensoren verglichen werden.

## 1. Einleitung

Diese Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit der Hochschule Neubrandenburg und dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) erstellt. Das BSH hat Dienstsitze in Hamburg und Rostock und gehört zum Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Das Arbeitsgebiet für die Seevermessung des BSH umfasst eine Fläche von etwa 57.000 km<sup>2</sup> (entspricht ca. 1/6 der Fläche Deutschlands). Es beinhaltet das Küstenmeer, sowie die Ausschließliche Wirtschaftszone Deutschlands. [2] Die Seevermessung als Teilgebiet der Hydrographie hat die Aufgabe den unter Wasser liegenden, nicht einsehbaren Teil der Erdoberfläche zu erfassen und darzustellen. In der Seevermessung werden parallel zu den gemessenen Wassertiefen die Positionen über Satellitenortung bestimmt, sowie die dazugehörige Zeit registriert. [24]

Von der IHO (International Hydrographic Organization) wurden international geltende Mindeststandards für hydrographische Vermessungen eingeführt. Danach werden Bereiche mit unterschiedlichen Genauigkeitsstufen in Sondergebiete und in die Ordnungen 1a, 1b und 2 eingeteilt. In den Sondergebieten, z.B. Häfen, sieht die IHO eine Tiefengenauigkeit von 0,25m (bei 95%iger Sicherheitswahrscheinlichkeit) vor. Das BSH orientiert sich an die Ordnungen 1a und 1b, welche eine Tiefengenauigkeit von 0,5 m (1a) und 1 m (1b) bei 95%iger Sicherheitswahrscheinlichkeit, haben.

Die Genauigkeit der Tiefenmessungen hängt von vielen Faktoren ab. Dazu zählen u.a. die Beschickungsverfahren, die Wahl des Messverfahrens, die Bestimmung der Wasserschallgeschwindigkeit sowie die Bestimmung der Seegangsbewegungen. Jeder Einflussfaktor bringt seine eigenen Fehleranteile mit. Die Seegangsbewegungen werden traditionell mit Hilfe von Inertialsystemen erfasst (Kapitel 5.2). Da ein Schiff durch den Seegang immer in Bewegung ist, werden sowohl die Echolotmessungen als auch die GNSS-Messungen dadurch beeinflusst. Um die entsprechenden Genauigkeiten der Tiefenmessung einzuhalten, müssen die Seegangsbewegungen unbedingt bestimmt und als Korrekturen angebracht werden.

In dieser Arbeit soll festgestellt werden, inwieweit die durch Bewegungssensoren bestimmten Korrekturwerte für die Hub-, Roll- und Stampfbewegungen eines Bootes genutzt werden können. Die Schiffsbewegungen werden an Bord des Vermessungsschiffes Komet, sowie auf den Tochterbooten Komet 1-4 mit dem „Motion Sensor Octans III“ der Firma IXSEA erfasst (Kapitel 7.2).



## 2. Grundlagen

### 2.1 Echolotmessung

Bei ausreichender Wassertiefe werden vor allem Echolotungen vom Schiff aus eingesetzt. Echolotsysteme basieren auf dem Prinzip der Laufzeitmessung eines Schallsignals. Vom Schwinger des Echolotes wird ein Ultraschallimpuls in Richtung des Untergrundes ausgestrahlt. Dieser wird an der Gewässersohle reflektiert und vom Schwinger wieder empfangen. Bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls im Wasser (Kapitel 2.2) und aus der Laufzeit des reflektierten Strahls kann die Entfernung zum Meeresboden ermittelt werden. Es wird zwischen Single-Beam- und Multi-Beam-Echolotung unterschieden.

#### 2.1.1 Vertikalecholot (Single-Beam-Echolot)

Bei der Single-Beam-Echolotung wird der Meeresboden mit einem Strahl abgetastet, der lotrecht unter dem Schiff ausgesendet wird. Vor Beginn jeder Messung muss die Wasserschallgeschwindigkeit ermittelt werden, da die gemessenen Wassertiefen davon abhängig sind.

Die Beschaffenheit des Meeresbodens kann durch die Messung mit zwei Frequenzen besser bestimmt werden. Die höhere Echolotfrequenz wird an Schichten geringerer Dichte reflektiert als die tiefer eindringende niedrigere Frequenz. Bei nicht eindeutig definiertem Untergrund, wie z.B. Schlick, ergibt die hohe Frequenz dementsprechend geringere Tiefen als die niedrigere Frequenz. In der Regel werden bei Single-Beam-Messungen vorgegebene Längs- und/oder Querprofile gefahren. Der Profilabstand wird je nach Aufgabenstellung gewählt. [2, 24]

#### 2.1.2 Mehrfachschwingersysteme

Bei Mehrfachschwingersystemen wird zwischen Auslegersystemen (Abb. 1) und Fächerecholoten (Abb. 2) unterschieden. Auslegersysteme haben an Back- und Steuerbordseite jeweils einen Auslegearm. An jedem Arm befinden sich mehrere Vertikallote, die in Nadirrichtung peilen. So können mit nur einer Fahrt eine Vielzahl von Profilen gemessen werden. Die Auslegerarme schränken das Peilschiff jedoch sehr in der Manövrierfähigkeit ein. Auslegersysteme können im Gegensatz zu Fächerecholoten auch in flachen Gewässern voll genutzt werden. Beim Fächerecholot verringert sich, durch die geringe Tiefe, die Aufnahmefläche des Fächerecholots. Auslegersysteme werden im BSH nicht verwendet.

Bei Fächerecholot-Messungen senden die Schwingköpfe fächerartig mehrere Messstrahlen (Beams) gleichzeitig quer zur Bewegungsrichtung des Schiffs aus. Ein Fächerecholot besitzt in der Regel ein bis zwei Schwingköpfe. Die Breite des

abgedeckten Streifens ist abhängig vom Öffnungswinkel des Echolotes und von der Wassertiefe. Je größer die Wassertiefen, desto größer ist die Aufnahme­fläche. Der Linienabstand ist abhängig von der Fächerbreite sowie von der notwendigen Überlappung benachbarter Profile. [24]

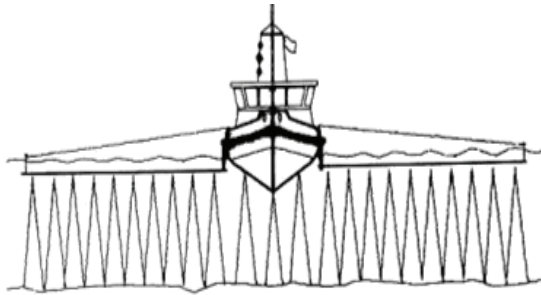


Abb. 1: Auslegersystem [24-WSV]

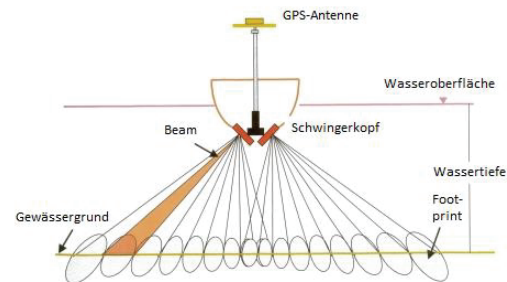


Abb. 2: Fächerecholot [24-WSV]

Um lotrechte Tiefen zu erhalten, müssen alle Schiffsbewegungen erfasst werden. Daher werden Bewegungssensoren und Kreisel­systeme in die verschiedenen Messsysteme integriert, welche die Hub-, Roll- und Stampfbewegungen (Heave, Roll, Pitch) sowie die Orientierung des Schiffes ermitteln. [24]

## 2.2 Wasserschall

Die Wasserschallgeschwindigkeit ist zum größten Teil von Wassertemperatur und Salzgehalt abhängig und liegt im Bereich zwischen 1400 m/s und 1600 m/s. Die Wasserschallgeschwindigkeit kann direkt oder indirekt bestimmt werden. Bei der direkten Messung wird die Wasserschallgeschwindigkeit über Laufzeitmessung einer bekannten Strecke ermittelt. Die indirekte Messung erfolgt über sogenannte CTD-Sensoren. Bei der CTD-Messung werden die Leitfähigkeit, die Temperatur und der vorherrschende Druck bestimmt. Aus den ermittelten Werten der CTD-Sonde können Wasserschallprofile sowie eine mittlere Wasserschallgeschwindigkeit entlang der Wassersäule abgeleitet werden. Auf dem Vermessungsschiff Komet wird die Wasserschallgeschwindigkeit durch CTD-Messung bestimmt und in den kleinen Vermessungsbooten am Echolot eingestellt. Sie muss vor jeder Vermessung ermittelt werden. Änderungen der Schallgeschwindigkeit entstehen im Wesentlichen durch Temperaturänderungen oder Sprungschichten im Salzgehalt. [24]

### 2.3 Bezugshorizont

Die gemessenen Wassertiefen sind abhängig vom aktuellen Wasserstand und müssen deswegen auf einen Bezugshorizont, wie z.B. Seekartennull (SKN), reduziert werden. Die Höhenbezugsfläche NN ist für die Nordsee ungeeignet, da sie regelmäßig vom Niedrigwasser unterschritten wird. Bis Ende 2004 wurde in der Nordsee das mittlere Springniedrigwasser (MSpNW) als Seekartennull verwendet. Seit 2005 wird das MSpNW durch das Niveau des niedrigsten Gezeitenwasserstandes (Lowest Astronomical Tide - LAT) ersetzt. Die LAT liegt im Bereich der deutschen Nordseeküste ca. 50 cm unter dem MSpNW. [4]

### 2.4 Schiffsbewegungen

Das Seeverhalten eines Schiffes spielt eine sehr wichtige Rolle bei der Bestimmung der Tiefen. Die Bewegungen des Schiffes (Abb. 3 und Abb. 4) wirken sich direkt auf die Tiefenmessungen aus. Schiffsbewegungen treten in sechs möglichen Bewegungsrichtungen auf. Um die genaue Lage der GNSS-Antenne zu bestimmen, müssen die Bewegungen zu jeder Zeit bekannt sein. Zur Erfassung dieser Bewegungen haben sich Inertial- und GNS-Systeme durchgesetzt.

Die Bewegungen des Schiffes sind besonders vom Seegang und von den Eigenschaften des Schiffes abhängig. Es wird zwischen translativen und rotativen Bewegungen unterschieden. [14]

#### Translative Bewegungen

- Surge            Längsbewegung parallel zur Längsachse
- Drift/Sway      Querbewegung parallel zur Querachse
- Hub/Heave      Tauchbewegung parallel zur Hochachse

#### Rotative Bewegungen

- Pitch            Stampfen um die Querachse
- Roll             Rollen um die Längsachse
- Yawing          Gieren um die Hochachse

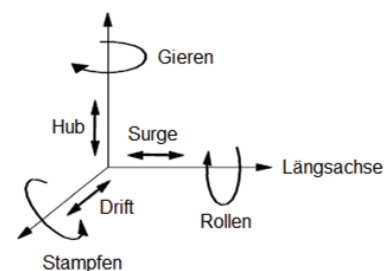


Abb. 3: Schiffsbewegungen

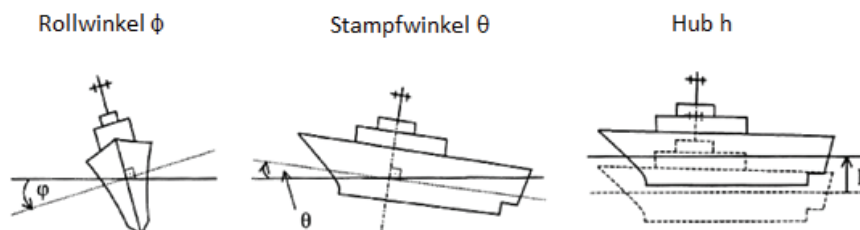


Abb. 4: Schiffsbewegungen [16-Wolf, Liebsch et.al]

Des Weiteren tritt durch die Fahrtgeschwindigkeit und die Art des Antriebes ein Squat-Effekt auf. Der Abstand zwischen dem Kiel eines Schiffes und dem Meeresboden ändert sich bei Fahrt durch das Wasser und sinkt gegenüber der Ruhelage tiefer unter dem Wasserspiegel. Kleinere Boote kommen, bedingt durch die Form der Boote, bei hoher Fahrt schnell ins Gleiten. Beim Gleiten kommt das Boot höher aus dem Wasser. Je nach Geschwindigkeit vergrößert oder verkleinert sich der Abstand zum Meeresboden und das Boot vertrimmt zusätzlich. Die Trimmung bezeichnet die unterschiedlichen Tiefgänge zwischen Bug und Heck (geschwindigkeitsabhängig). Die Summe aus diesen beiden Effekten wird als Squat bezeichnet. [25]

### **3. Positionierung**

#### **3.1 GNSS**

GNSS steht für „Global Navigation Satellite System“ und besteht zurzeit aus den verschiedenen Systemen GPS, GLONASS und das noch im Aufbau befindliche GALILEO.

#### **Grundprinzip der Satellitennavigation am Bsp. des GPS**

Das NAVSTAR-GPS (Navigation System with Time And Ranging – Global Positioning System) ist ein vom amerikanischen Verteidigungsministerium (Department of Defense = DoD) entwickeltes, realisiertes und betriebenes System. Es besteht heute aus circa 30 aktiven Satelliten, die die Erde in einer Höhe von rund 20.200 km umkreisen. GPS basiert auf dem Prinzip der Entfernungsbestimmung durch Laufzeitmessung der Satellitensignale. Diese ermöglichen die genaue Ortsbestimmung eines GPS Empfängers. Die Bestimmung der Position kann weltweit zu jeder beliebigen Tageszeit, in einem einheitlichen Bezugssystem und in Echtzeit erfolgen. Die Satellitenbahnen sind so angelegt, das an jedem Ort auf der Welt, zu jeder Zeit mindestens vier Satelliten genutzt werden können. [19]

#### **3.2 Differentielles GNSS**

Die durch GNSS erreichte Genauigkeit kann mit Hilfe von Korrekturverfahren verbessert werden. Für das differentielle GNSS (DGNSS) werden zwei Empfänger benötigt. Ein Empfänger steht auf einem bekannten Punkt (Referenzstation). Der zweite Empfänger bleibt mobil. Da beide Empfänger dieselben Satelliten empfangen, wird beim DGNSS Verfahren davon ausgegangen, dass die Fehlereinflüsse der GNSS Messung auf benachbarte Empfänger denselben Effekt haben. Die Signale durchlaufen annähernd dieselben Schichten der Atmosphäre und haben demzufolge auch nahezu die gleichen Fehler. Durch geeignete Auswerteverfahren wie Differenzbildung können diese Einflüsse eliminiert werden. Die bekannte Position der Referenzstation wird kontinuierlich mit der Position aus den Satellitendaten verglichen. Daraus wird ein Korrekturwert ermittelt und über Funk an den DGNSS-fähigen Empfänger gesendet. [21]

### 3.3 SAPOS®

Der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessungen basiert auf der Technik des Global Navigation Satellite System. Um die Ergebnisse der Satellitensignale noch genauer zu machen unterhält SAPOS® ein Netz von GNSS-Referenzstationen. Für differentielle GNSS-Messungen wird nur noch ein Empfänger benötigt. Der zweite Empfänger wird durch die SAPOS®-Referenzstationen ersetzt.

Es stehen verschiedene Dienste mit unterschiedlichen Genauigkeiten zur Verfügung. Bei den Echtzeitpositionierungsdiensten des SAPOS wird zwischen EPS und HEPS unterschieden. Im „Echtzeit-Positionierungs-Service“ (EPS) werden mit Codemessungen bzw. den sogenannten trägergeglätteten Codemessungen Genauigkeiten von 0,5 – 3m erreicht. Bei dem „Hochpräzisen Echtzeit-Positionierungs-Service“ (HEPS) werden zusätzlich die Trägerphasen an den Nutzer übermittelt. HEPS dient zur Realisierung des PDGPS/PDGNSS (Präzises Differentielles GNSS). Für die Bearbeitung im Postprocessing dient der „Geodätische Präzise Postprocessing-Service“ (GPPS). [20]

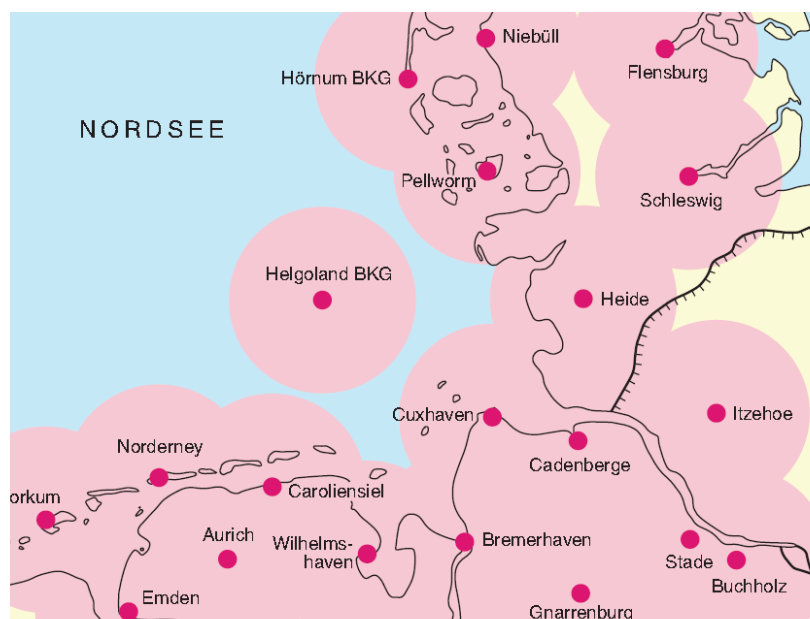


Abb. 5: Reichweite der SAPOS®-Stationen im Küstenbereich der Nordsee [2-Sapos]

Die Reichweite der SAPOS Referenzstationen ist auf ca. 30-40 km begrenzt (Abb. 5). Diese ist zum größten Teil abhängig von der Datenübertragung und vom Lösen der Mehrdeutigkeiten. In Gebieten in denen kein SAPOS-Empfang besteht kann auf Postprocessing oder auf kommerzielle Dienste wie OmniSTAR zurück gegriffen werden.

## 4. Beschickungsverfahren

Ziel der Beschickung ist es, die gemessenen Wassertiefen auf einen gemeinsamen Bezugshorizont zu reduzieren. Für die Beschickung stehen die folgenden Verfahren zur Verfügung.

### Beschickung über Pegel

Im Gezeitenbereich der Nordsee ist der Bezugshorizont für die Beschickung das SKN. Um die gemessenen Wassertiefen auf das SKN zu beziehen, wird der aktuelle Wasserstand über Pegel abgelesen. Der Wasserstand ist von Zeit und Ort abhängig. Die beschickte Tiefe ergibt sich nach Abzug des Stau- und Gezeitenanteils von der geloteten Tiefe, unter Berücksichtigung der Eintauchtiefe des Schwingers (Abb. 6). Für Seevermessungen, die weit entfernt vom Pegelort stattfinden, erfolgt die Beschickung mit Hilfe von Wasserstandserrechnungskarten (WEK). Da durch die Entfernung vom Pegel zum Lotungsort unterschiedliche Wasserstände herrschen wird die Beschickungskorrektur interpoliert. Des Weiteren werden z.B. Tidekurven durch verschiedene Witterungseinflüsse (Windstau, etc.) verformt und verfälschen die Beschickung zusätzlich. Wenn von zwei verschiedenen Pegeln aus interpoliert wird, kommt es vor, dass am eigentlichen Lotungsort unterschiedlich beschickte Tiefen entstehen. [4, 11]

In den WEK kann für jeden Ort abgelesen werden, wie lange es dauert, bis die Hochwasserwelle vom Pegel- zum Lotungsort gelangt und wie sich die Differenz des Springtidenhubs zwischen Pegel- und Lotungsort auswirkt. [2, 24]

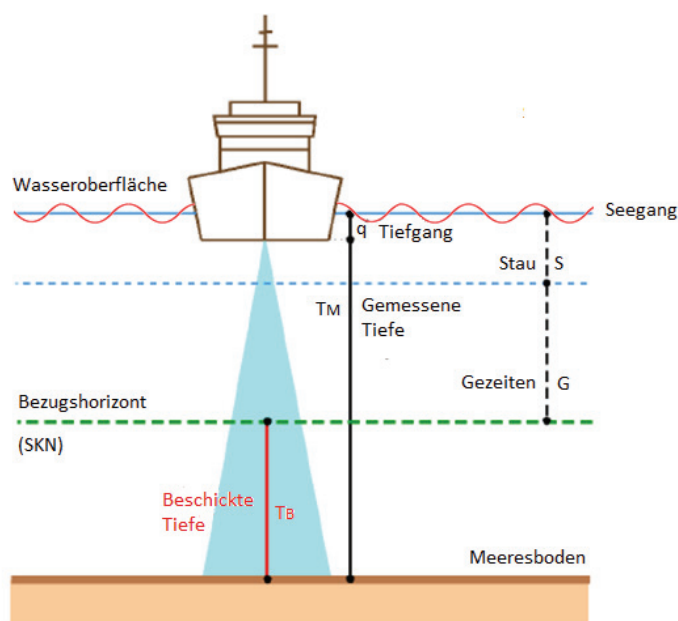


Abb. 6: Beschickung über WEK [11-Goffinet]

## Beschickung mit Hilfe von GNSS

Eine Beschickung über Satelliten ermöglicht eine Messung der Tiefen in Echtzeit und bringt somit auch eine höhere Genauigkeit mit sich. Die Beschickung mit Hilfe von Satelliten gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil werden die Komponenten  $H$ ,  $T_M$  und  $h$  bestimmt.  $H$  gibt die Höhe der Antenne über dem Ellipsoid an und wird über GPS bestimmt.  $T_M$  ist die vom Echolot gemessene Wassertiefe und  $h$  ist der bekannte Abstand von der GPS-Antenne zum Schwinger (Abb. 7). An diesen Abstand werden für die richtige Position zusätzlich Roll- und Stampfkorrekturen angebracht. Die beschickte Tiefe ergibt sich aus der Differenz des Seekartennull-Modells und des Abstandes  $T_E$  (Ellipsoid – Meeresboden). [11]

Die Genauigkeit muss durch die Nutzung eines Korrekturdatendienstes, wie z.B. SAPOS® verbessert werden. Der Einsatz dieses Verfahrens ist dadurch auf Gebiete beschränkt, in denen die Abdeckung mit Korrektursignalen sichergestellt ist.

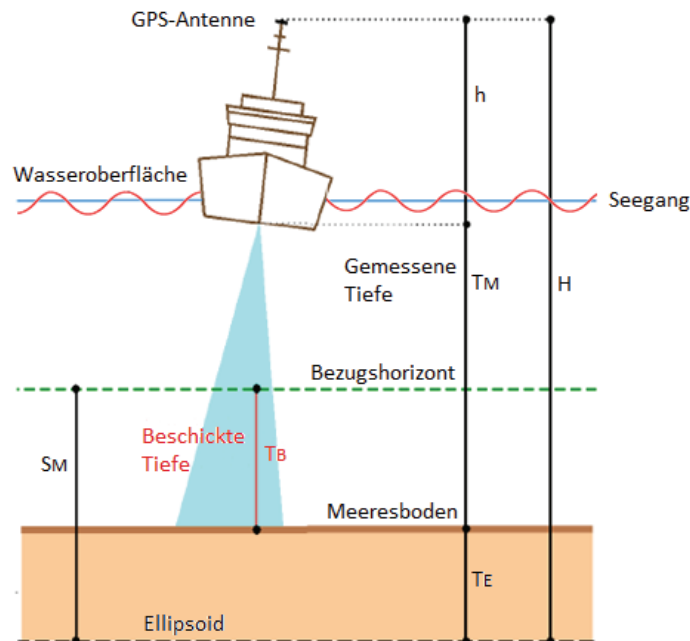


Abb. 7: Beschickung über GNSS [11-Goffinet]



## 5. Systeme zur Bestimmung von Schiffslageänderungen

Schiffslageänderungen bezeichnen nicht nur horizontale Änderungen eines Schiffes, sondern auch die Auf- und Abwärtsbewegungen, sowie das Rollen und Stampfen eines Schiffes (siehe Kapitel 2.4). Diese Bewegungen beeinflussen u.a. die Echolotmessungen systematisch. Die entstehenden Fehler müssen erfasst und als Korrekturen an die Messungen angebracht werden. Die Bestimmung der Schiffslageänderungen kann z.B. mit den in 5.1 und 5.2 vorgestellten Systemen erfolgen. Darüber hinaus gibt es weitere Systeme mit niedriger Genauigkeit.

### 5.1. GNSS

Zur Lagebestimmung von Schiffen werden sogenannte „GNSS-Mehrantennensysteme“ genutzt. Diese bestehen i.d.R. aus zwei oder mehr GNSS-Antennen. Werden z.B. zwei Antennen entlang der Schiffslängsachse ausgerichtet, so dienen sie der Ermittlung der Kurs- und Stampfwinkel. Mit einer Antennenausrichtung entlang der Schiffsquerachse werden die Kurs- und Rollwinkel bestimmt. Bei einem Zweiantennensystem kann, abgesehen vom Kurs, immer nur ein Winkel (entweder Roll- oder Stampfwinkel) bestimmt werden. Diese Systeme werden üblicherweise in der Querachse des Schiffes ausgerichtet. Die Bestimmung der Rollwinkel hat für die Hydrographie eine größere Bedeutung, da diese i.d.R. größer sind als die Stampfwinkel. Die Genauigkeit der Lagewinkelbestimmung mit GNSS ist im Wesentlichen abhängig vom Abstand zwischen den Antennen sowie von der Qualität der Satellitenmessungen. Nachteilig bei solchen Systemen sind z.B. Abschattungen und die niedrigen Taktraten. [1, 16]

### 5.2. Inertiale Navigationssysteme

In der Hydrographie erfolgt die Bestimmung der Schiffsbewegungen überwiegend mit inertialen Navigationssystemen (INS). Diese Systeme können im Gegensatz zu GNSS leicht hohe Taktraten realisieren, welche aufgrund der hohen Bewegungsfrequenzen benötigt werden. Abhängig von der Schiffsgröße geben sie deren Dynamik aber nicht immer richtig wieder. Zudem weisen viele Systeme ein Driftverhalten auf, weshalb sie mit GNSS gestützt werden müssen. Die Gezeiten werden z.B. durch die langsame Änderung des Meeresspiegels von INS nicht wahrgenommen. [1, 16] Inertiale Navigationssysteme werden in analytische Systeme (Strapdown-Systeme) und halbanalytische Systeme unterteilt. In der Genauigkeit sind die halbanalytischen Systeme zwar den analytischen Systemen überlegen, jedoch Aufgrund der aufwendigeren Bauweise und demzufolge höheren Preise sind sie für die Navigation nicht vorteilhaft. Hier werden vorwiegend Strapdown-Systeme angewendet.

In der Inertialnavigation werden gleichzeitig die Drehbewegungen eines Fahrzeuges um die x-, y- und z-Achse sowie die Beschleunigungen entlang dieser Achsen gemessen. [6] Der Aufbau inertialer Messsysteme, sowie die in der Hydrographie verwendeten optischen Kreisel, werden nachfolgend beschrieben.

### 5.2.1 Aufbau inertialer Messsysteme

Zur Festlegung der translativen Freiheitsgrade werden im Allgemeinen drei Beschleunigungsmesser und zur Festlegung der rotativen Freiheitsgrade drei Drehratensensoren oder Kreisel benötigt (Abb. 8).

Inertiale Navigationssysteme (INS) beruhen auf dem Prinzip der Massenträgheit und werden daher auch als Trägheitsnavigationssysteme bezeichnet. Mittels einer bekannten Masse werden Änderungen der Objektposition, wie z.B. durch einwirkende Beschleunigungen bestimmt. Durch Integration der ermittelten Beschleunigung wird die Geschwindigkeit und durch zweifache Integration der zurückgelegte Weg berechnet. INS sind autonome Messsysteme, welche kurzfristig hochgenaue Daten im Zentimeterbereich liefern können. Aufgrund auftretender Driften werden sie jedoch schnell ungenau und müssen durch andere Systeme gestützt werden. Nachteilig sind die hohen Anschaffungskosten. [7]

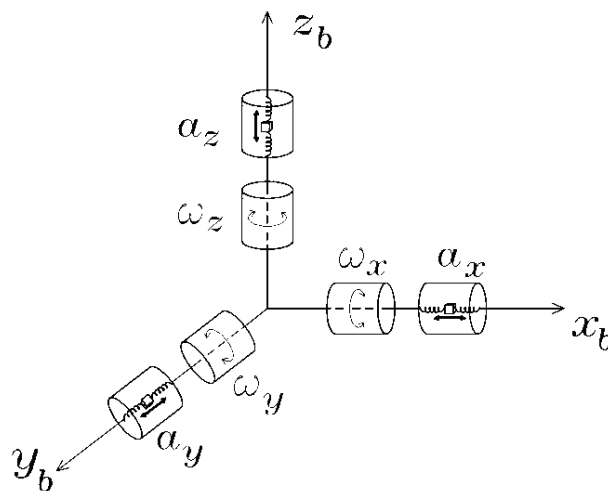


Abb. 8: Aufbau eines Inertialsystems [8-Foppe]

## Analytische Systeme

Analytische Systeme bestehen jeweils aus drei orthogonal angeordneten Kreiseln und Beschleunigungsmesser (Abb. 9). Sie sind fest mit dem Fahrzeug verbunden („angeschnallt“ → Strapdown-System) und machen somit alle Drehbewegungen des Fahrzeuges mit. Aus diesem Grund benötigen sie einen größeren Messbereich als halbanalytische Systeme. In der Regel werden sie so eingebaut, dass sie das fahrzeugfeste Koordinatensystem realisieren. Alle Messwerte beziehen sich zunächst auf das Sensorkoordinatensystem. Die Raumwinkel werden durch Koordinatentransformation der Sensordaten gewonnen. Für die internen Berechnungen werden leistungsfähige Rechner benötigt. [9]

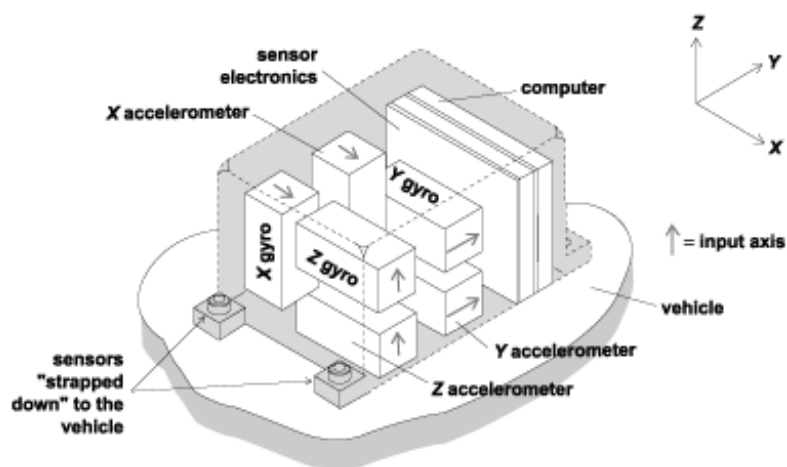


Abb. 9: Strapdown-System [13-GeneSys]

## Halbanalytische Systeme

Bei halbanalytischen Systemen sind die Beschleunigungsmesser und Kreisel auf einer Plattform montiert. Die Plattform hat eine kardanische Aufhängung und ist somit von den Fahrzeugbewegungen entkoppelt. Auf Grund der weitestgehend raumfesten Lage der Sensoren, müssen sie nur in einem relativ kleinen Messbereich sehr genaue Daten liefern können. Durch die Trägheitsplattform ist bei halbanalytischen Systemen der Rechenaufwand geringer, dafür aber der mechanische Aufwand höher als bei analytischen Systemen. Im Allgemeinen wird bei den Plattformsystemen zwischen einer raumorientierten und einer erdorientierten Version unterschieden. [5, 7]

### 5.2.2 Beschleunigungsmesser

Um die Beschleunigungen in allen drei Richtungen zu erfassen, sind drei Beschleunigungsmesser notwendig. Die Lage der Beschleunigungsmesser muss zu jeder Zeit bekannt sein, damit die ermittelten Beschleunigungen in ein Koordinatensystem eingearbeitet werden können. Beschleunigungen können nicht direkt gemessen werden. Mit Beschleunigungsmessern werden daher die Kräfte gemessen, die aufgrund der Massenträgheit auf einen Körper (Prüfmasse) wirken. Nach dem zweiten Newton'schen Axiom ( $F = m \cdot a$ ) wird durch die Kraft  $F$  eine Beschleunigung  $a$  des Körpers mit der Masse  $m$  bewirkt. Wird die Prüfmasse durch eine Kraft ausgelenkt, so ist dies ein Maß für die Beschleunigung. Die Auslenkung wird je nach System unterschiedlich bestimmt.

Jeder Beschleunigungsmesser besitzt ein sensibles Element, welches durch eine Aufhängung fest mit dem Gehäuse verbunden ist, sowie ein Abgriffsystem. Je nach Anordnung dieser Elemente wird zwischen den folgenden Systemen unterschieden. [7, 8]

#### Pendelsysteme

Durch einwirkende Beschleunigungen wird eine Probemasse, welche über ein Pendel fest mit dem Gehäuse verbunden ist, aus seiner Ruhelage ausgelenkt. Die Auslenkung kann entweder kapazitiv gemessen oder über induktive Weggeber bestimmt werden. Die Auslenkung ist ein Maß für die einwirkende Beschleunigung. [8]

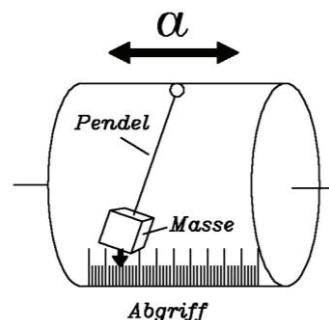


Abb. 10: Prinzip Pendelsystem [8-Foppe]

#### Feder-Masse-Systeme

Die Probemasse wird in Messrichtung zwischen zwei Federn eingespannt. Liegt eine Beschleunigung  $a$  an, so kann mit bekannter Federkonstante die Auslenkung aus der Ruhelage über kapazitive oder induktive Weggeber bestimmt werden. [8]

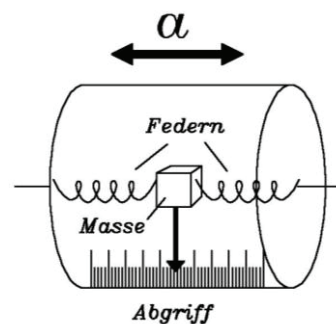


Abb. 11: Prinzip Feder-Masse-Systeme [8-Foppe]

### Servo-Systeme

Die Aufhängung kann aus einem Pendel- oder Feder-Masse-System bestehen. Sie besitzen zusätzlich ein Stellglied (Drehmomentmotor, Elektromagnet), welches die Probemasse in konstantem Abstand zu einem Abstandssensor hält. Das Stellglied kompensiert bei wirkender Beschleunigung eine Auslenkung der Probemasse. Die aufzuwendende Rückstellkraft ist proportional zur wirkenden Beschleunigung. [8]

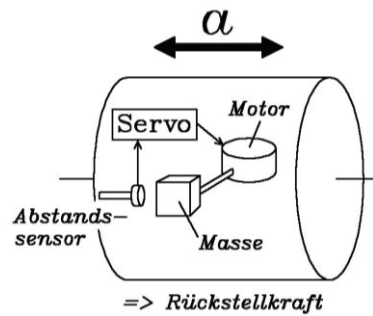


Abb. 12: Prinzip Servo-Systeme [8-Foppe]

### Schwingsaiten-Systeme

Die Probemasse ist durch ein Pendel und eine schwingfähige Stahlsaiten mit dem Gehäuse verbunden. Bei wirkender Beschleunigung ändert sich die mechanische Spannung und demzufolge auch die Eigenfrequenz.

[8]

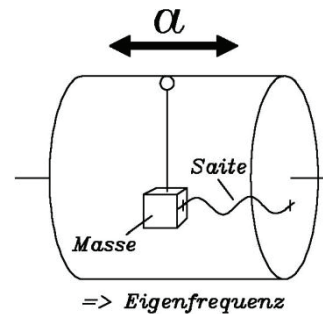


Abb. 13: Prinzip Schwingsaiten-Systeme [8-Foppe]

### 5.2.3 Drehratensensoren

Zur Erfassung von Drehbewegungen werden im Allgemeinen Drehratensensoren, auch Kreisel genannt, eingesetzt. Drehratensensoren messen die Winkelgeschwindigkeit um eine Raumachse. Es gibt eine Vielzahl von Kreiselsystemen für die verschiedensten Anwendungen: Lagekreisel, Wendekreisel, Vibrationskreisel, optische Kreisel, Meridiankreisel, Kurskreisel. Die Kreisel beruhen auf unterschiedlichen Funktions- und Bauweisen. Der mechanische Kreisel beruht z.B. auf dem Drehimpuls, oszillierende Kreisel nutzen wiederum die Coriolisbeschleunigung aus und optische Kreisel machen sich den Sagnac-Effekt (siehe optische Kreisel, S. 22) zu nutze. In den letzten Jahren fanden vor allem die optischen Kreisel Anwendung. Da in dieser Arbeit ebenfalls ein optischer Kreisel zum Einsatz kam, wird dieser Bereich im Folgenden näher betrachtet. [7, 6]

## Optische Kreisel

Optische Kreisel besitzen im Gegensatz zu anderen Kreiseln kein mechanisch bewegtes Bauteil. Vorteile von optischen Kreiseln sind die extrem kurze Reaktionszeit, Robustheit, Unempfindlichkeit gegen Beschleunigungen sowie Vibrationen und die hohe Lebensdauer. Wegen ihrer Beschleunigungsunempfindlichkeit eignen sie sich für den Einsatz in Strapdown-Navigationssystemen.

Die optischen Kreisel basieren auf dem Sagnac-Effekt. Dabei wird ein Lichtstrahl durch einen halbdurchlässigen Spiegel aufgespalten. Die daraus entstehenden Strahlen werden auf einer Kreisbahn jeweils in entgegengesetzte Richtungen geschickt und legen einen bestimmten Weg zurück. Dieser Weg ist je nach Laufrichtung (links oder rechts) kürzer oder länger. Wird das System gedreht, verlängert sich der Weg für den in Drehrichtung laufenden Strahl. Für den Strahl, der in entgegengesetzter Richtung läuft, verkürzt sich der Weg. Durch die unterschiedlichen Laufzeiten der Strahlen entsteht eine Phasenverschiebung, die von einem Interferenzdetektor erkannt wird. [15]

## Faseroptische Kreisel

Bei faseroptischen Kreiseln wird ein mehrere Kilometer langes Glasfaserkabel auf eine Spule gewickelt. Aufgrund der Länge des Kabels und den vielen Windungen wird eine hohe Empfindlichkeit erreicht. Daraus resultiert die hohe Auflösung der Geräte. Mit Hilfe von Strahlteilern wird das Licht einer Laserdiode in zwei Strahlen geteilt und durchläuft die Glasfaser, dabei laufen die Strahlen in entgegengesetzte Richtungen (Abb. 14). Dreht sich die Spule, so verlängert sich der Weg für den einen Lichtstrahl, für den anderen verkürzt er sich (Sagnac-Effekt). Beide Lichtstrahlen benötigen unterschiedliche Zeiten zum Durchlaufen der Spule. Die daraus resultierende Phasenverschiebung ist ein Maß für die Winkelgeschwindigkeit und wird vom Interferenzdetektor erkannt. [10]

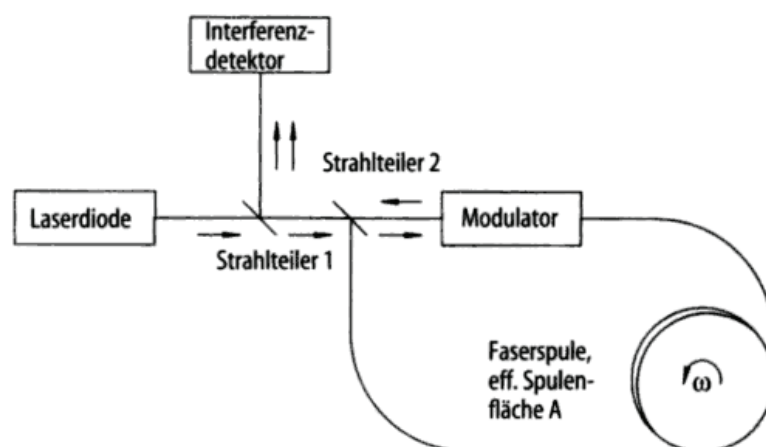


Abb. 14: Aufbau eines faseroptischen Kreisels [10-Gevatter]

## Ringlaserkreisel

Ringlaserkreisel beruhen ebenfalls auf dem Sagnac-Effekt. Zwei Laserstrahlen durchlaufen einen Glasblock jeweils in entgegengesetzten Richtungen. Die Strahlen werden durch die Anordnung der Spiegel in dem Glasblock gehalten. Solange der Glasblock nicht gedreht wird, ist der zurückzulegende Weg für die beiden Laserstrahlen derselbe. Wird der Glasblock gedreht, so verlängert sich der Weg für den in Drehrichtung laufenden Strahl. Dieser kommt mit einer leicht abgesenkten Frequenz an. Der Weg für den Strahl in entgegengesetzter Richtung verkürzt sich, wodurch sich seine Frequenz erhöht. Der Frequenzunterschied lässt sich durch Auswertung der entstehenden Interferenzmuster nachweisen. [7] Die Abb. 15 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Ringlaserkreisels.

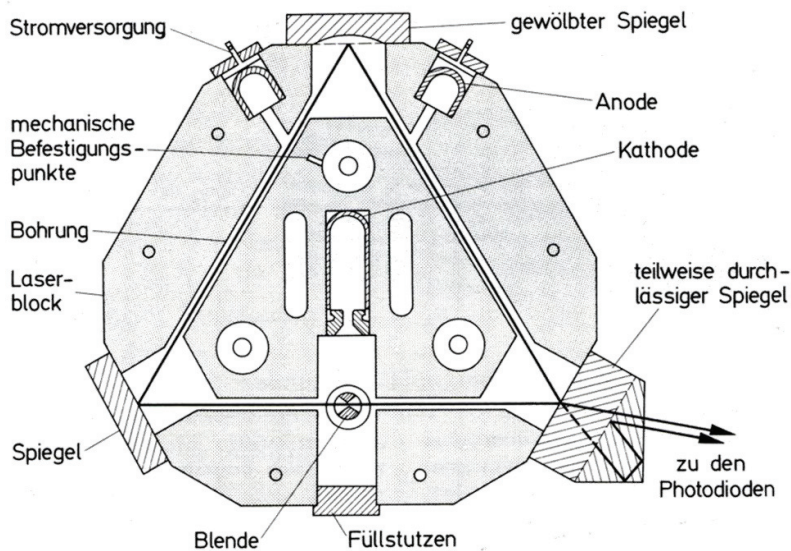


Abb. 15: Aufbau eines Ringlaserkreisels [7-von Fabeck]

## 6. Vermessungsschiff Komet

Das Vermessungsschiff Komet (Abb. 16) wurde 1998 in Dienst gestellt und wird ausschließlich zur Vermessung eingesetzt. Ihre Hauptaufgabe besteht in der Auslotung der deutschen Küstengewässer in Nord- und Ostsee. Die Komet hat eine Stammbesatzung von 18 Mann und bietet zusätzlich Unterkunft für 6 Wissenschaftler/Techniker. Mit 64,20 m Länge und 12,50 m Breite, sowie einem Tiefgang von 3,80 m, ist sie das größte Schiff des BSH. [2] Zur Vermessung stehen neben dem Mutterschiff vier kleine Vermessungsboote zur Verfügung. Auf der Brücke des Mutterschiffs werden Wasserschallgeschwindigkeitsdaten sowie die Wasserstände an den Pegeln der Deutschen Küsten erfasst. Die vier Alu-Boote des VS Komet sind mit Echoloten, Bewegungssensoren und Rechneranlagen ausgerüstet. Die Abb. 17 zeigt das Boot 4, welches zusätzlich über ein Fächerecholot verfügt. Die Vermessung mit den kleinen Booten kann bei Windstärken bis zu 4 Beaufort (Bft) erfolgen. Der Tiefgang der Boote wurde so klein wie möglich gehalten, um auch in flachen Gewässern arbeiten zu können. [3]



Abb. 16: Vermessungsschiff Komet



Abb. 17: Tochterboot



## 7. Verwendete Geräte

### 7.1 Leica GNS-System 1200

Das Leica GNS-System 1200 unterstützt GPS und GLONASS. Die Empfänger sind durch ihre robuste Konstruktion für den Einsatz auf See gut geeignet. Sie sind unempfindlich gegen Vibrationen, Regen, Eis und Schnee. In den Vermessungsbooten Komet 1-4 werden die Schiffspositionen mit dem Leica GNS-System 1200 unter Nutzung des Satellitenpositionierungsdienstes SAPOS® der deutschen Landesvermessung bestimmt. Die Datenübertragung erfolgt z.B. über NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol). Vom Leica GNS-System wird die Höhe der Schiffsantenne im ETRS89-System bestimmt. Anhand dieser Höhe erfolgt die Beschickung wie in Punkt 4.2 beschrieben. Die GNSS-Antenne befindet sich über dem Echolot (Abb. 18). Im Rahmen der Testmessungen diente das Leica GNS-System nicht nur zur Positionierung, sondern auch zum Vergleich der Hubdaten des Octans. Die Berechnung der Hubdaten wird im Kapitel 10 näher erläutert.



Abb. 18: Leica GNSS-Antenne

### 7.2 Octans III

Die Schiffsbewegungen werden auf dem Vermessungsschiff Komet, sowie auf den vier Tochterbooten mit Hilfe des Octans III, der Firma IXSEA, erfasst (Abb. 19). Der Octans ist ein Inertiales Navigationssystem und gehört damit zu den in 5.2 beschriebenen Systeme zur Bestimmung von Schiffslageänderungen.

Der kombinierte Bewegungssensor und Kreiselkompass ist ein Strapdown-System und erfasst alle rotativen und translativen Bewegungen, aus denen z.B. der Hub sowie der Kurs der Boote bzw. Schiffe abgeleitet wird. Die Messungen des Echolotes werden um diese Werte korrigiert. Die Genauigkeit für die Roll- und Stampfwinkel wird mit  $0,01^\circ$ ,

bei einer Auflösung von  $0,001^\circ$  angegeben. Für den Kurs wird eine Genauigkeit von  $0,1^\circ$  secant (in Abhängigkeit von der geographische Breite) mit einer Auflösung von  $0,01^\circ$  angegeben. Die Hubbestimmung erfolgt mit einer Genauigkeit von 5 cm (oder 5% vom Hub). Der Octans wiegt, bei einer Größe von ca.  $30 \times 14 \times 15$  cm, 4,25 kg. [13]

Die Technologie des Octans beruht hauptsächlich auf dem Strapdown-System, welches aus drei Beschleunigungsmessern, drei faseroptische Kreisel (Driftgenauigkeit  $0,05^\circ/h$ ) und einem digitalen Signalprozessor (DSP) besteht. Der DSP ermöglicht komplexe Berechnungen in Echtzeit. In der Abb. 20 ist die Anordnung der einzelnen Bestandteile dargestellt. Faseroptische Kreisel besitzen gegenüber den mechanischen Kreiseln den Vorteil, dass sie keine bewegten Teile haben und gegenüber Vibration und Beschleunigung weitestgehend unempfindlich sind. Daher sind die Faserkreisel für den Einsatz in der Seevermessung besonders geeignet. [12]

Die Datenaufnahme kann über die mitgelieferte Repeater-Software oder über eine Weboberfläche erfolgen. Das Datenformat kann in einer Protokoll-Bibliothek ausgewählt werden. Die Anschaffungskosten des Octans liegen bei etwa 60.000€.

Der Octans wurde in den Vermessungsbooten der Komet jeweils in der Nähe des Ursprungs des körperfesten Koordinatensystems eingebaut. Der Ursprung befindet sich in der Mitte der Hub-, Roll- und Stampfachse, um die sich das Schiff bewegt.



Abb. 19: Octans III [9 - IXSEA]

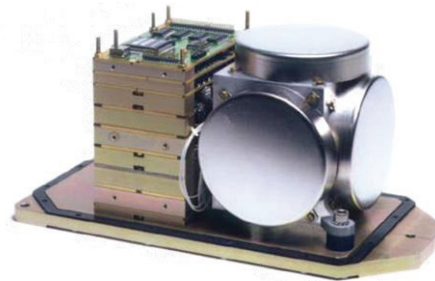


Abb. 20: Innenansicht Octans III [10 - IXSEA]

### 7.3 Trimble SPS361

Der DGPS-fähige „Trimble SPS361 GPS Heading and Positioning Receiver“ besitzt ein duales Antennensystem (Abb. 22). Mit dem Trimble SPS361 ist es möglich den Kurs des Schiffes mit Hilfe von zwei GPS-Antennen zu bestimmen. Je nach Anbau der Antennen (längs oder quer) können zusätzlich die Roll- oder Stampfwinkel des Bootes gemessen werden. Zur Bestimmung des Rollwinkels werden die Antennen quer zur Fahrtrichtung montiert (Abb. 21, Abb. 23). Um das Stampfen des Bootes zu

bestimmen, werden die Antennen längs des Schiffes montiert. Die auf gleicher Höhe montierten Antennen messen die Phasen der empfangenen Satellitensignale. [22]

Die Genauigkeit der Neigungsbestimmung ist abhängig von der Basislänge zwischen den Antennen. Bei einem Antennenabstand von 2m beträgt die Genauigkeit  $0,09^\circ$ . Bei 10m Abstand zwischen den Antennen beträgt sie  $0,05^\circ$ . [23] Der Trimble SPS361 kostet ca. 4.000€ und zählt zu den in 5.1 beschriebenen Systeme.

Auf dem Messboot wurde, zur Bestimmung des Rollwinkels, je eine Antenne auf der Back- und Steuerbordseite angebracht (Abb. 21). Dabei wurde darauf geachtet, dass diese nicht durch Schiffsaufbauten abgeschattet werden.



Abb. 21: Antennenaufbau Vermessungsboot



Abb. 22: Trimble SPS 361 [22-Trimble]

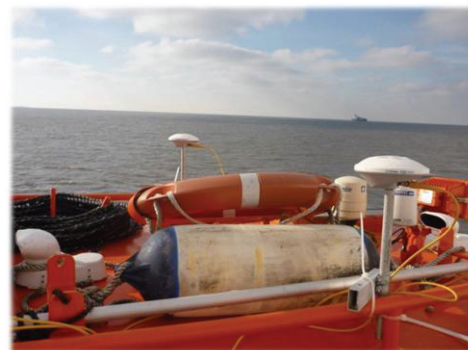


Abb. 23: Antennenaufbau

#### 7.4 TCM2

Der TCM2 der Firma PNI Sensor Corporation (Abb. 24) ist ein elektronischer Kompass und zählt zu den Low-Cost-Sensoren. Er ist sehr klein (ca.  $6 \times 5 \times 3$  cm), leicht und im Gegensatz zu den oben genannten Sensoren auch preiswert. Der TCM2 kombiniert ein Drei-Achsen-Magnetometer und einen mit Flüssigkeit gefüllten, zweiachsigen Neigungsmesser.

Zusätzlich zum Kurs werden mit dem integrierten Neigungsmesser die Roll- und Stampfwinkel des Fahrzeugs bestimmt. Da das Magnetfeld Einfluss auf die Messungen hat, können die Neigungsmessungen korrigiert werden. Die Daten werden über einen Mikroprozessor ausgewertet und können je nach Bedarf im NMEA 0183 Format oder

über eine RS232-Schnittstelle ausgegeben werden. Für die Neigungsbestimmung mit dem TCM wird eine Genauigkeit von  $0,2^\circ$  bei einer Auflösung von  $0,01^\circ$  angegeben. Die Version 2.5 des TCM ist für ca. \$800 erhältlich. [18] Er ist zwar klein und preiswert, kann aber mit der Genauigkeit der oben genannten Systeme nicht mithalten.



Abb. 24: TCM2 [18-PNI]

## **8. Durchführung der Messungen auf See und im Labor**

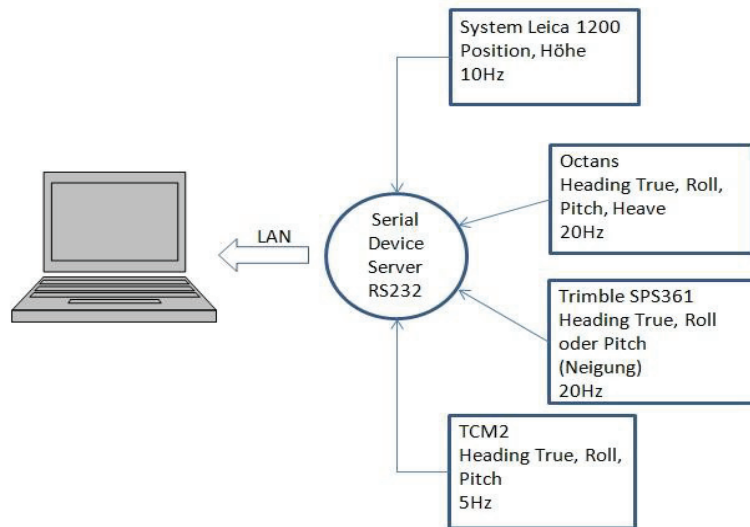
### **8.1 Messungen auf See**

Die Testgebiete wurden in Absprache mit der Besatzung der Komet ausgewählt. Die Testmessungen fanden alle in der Nordsee, abhängig vom Liegeplatz, in unterschiedlichen Gebieten und unterschiedlichen Tiefen statt.

Auf Grund der unregelmäßigen Bewegungen und viel höheren Bewegungsfrequenzen führten die vorher eingesetzten Sensoren auf den kleinen Vermessungsbooten oft zu unbrauchbaren Ergebnissen. In den Booten 1-4 des Vermessungsschiff Komet, sowie auf der Komet selbst wurden neue Bewegungssensoren (Octans III) eingebaut. Auf dem Mutterschiff erfolgt der Einsatz problemlos. Anhand der Messungen soll überprüft werden, ob die Ergebnisse durch den Einbau der neuen Sensoren in den kleinen Booten verbessert werden können. Um die Daten und vor allem auch die Qualität der Daten vergleichen zu können wird nicht nur der Octans getestet. Zum Vergleich stehen das Leica GNS-System 1200, ein Trimble SPS361 Empfänger und der Bewegungssensor TCM2 zur Verfügung.

#### **8.1.1 Versuchsaufbau für die Messfahrten**

Um die unterschiedlichen Sensoren miteinander vergleichen zu können, wurde am BSH (durch Dipl. Ing. Bernd Koop) ein separates Programm für die Sensorenerfassung entwickelt. Das Programm fragt vier serielle Schnittstellen ab, an denen die Sensoren angeschlossen sind. Die einlaufenden Daten werden synchronisiert, mit einem Zeitstempel versehen und anschließend in einem Messprotokoll gespeichert. Das Programm dient nur zur Datenerfassung und -speicherung. Die Daten der verschiedenen Sensoren Octans, Leica, Trimble und TCM werden während der gesamten Fahrt über das Sensorenerfassungsprogramm aufgezeichnet. Aus diesen Daten erfolgt später die Auswertung. Die Abb. 25 zeigt den Versuchsaufbau für die Messfahrten.



**Abb. 25: Versuchaufbau**

Die einzelnen Sensoren senden ihre Daten in Form von NMEA 0183 - Telegrammen an die RS-232-Schnittstelle. NMEA-Telegramme sind von der NMEA (National Marine Electronics Association, Nationale Vereinigung für Marineelektronik) definiert worden. Sie regeln den Datenverkehr von GPS-Geräten und allen anderen wichtigen Navigationsgeräten in der Schifffahrt. Da von den Sensoren die verschiedensten Informationen übertragen werden, gibt es auch unterschiedliche Datenformate der Telegramme.

Verwendete Telegrammtypen:

- GGQ = Position und Höhe
- HDT = Kurs (Heading True)
- TRO = roll, pitch
- AVR = roll, pitch, heading true
- LIN = surge, sway, heave

Die verschiedenen Telegrammtypen legen fest, welche Daten übertragen werden. Die Daten werden in Form von Sätzen übertragen. Jeder Datensatz beginnt mit einem \$-Zeichen, gefolgt von einer zwei Zeichen langen Senderkennung und endet immer mit einem \*-Zeichen sowie mit CR/LF (Carriage-Return – Wagenrücklauf, Line Feed – Neue Zeile). Nach der Senderkennung folgt eine drei Zeichen lange Satzkeennung (HDT, TRO, etc.) und anschließend eine beliebige Anzahl von Datensätzen, die durch Kommata getrennt werden. Ein Satz kann maximal 82 Zeichen enthalten (Abb. 26). [13, 18]

\$PHLIN,x.xxx,y.yyy,z.zzz*hh<CR><LF>			
where:	<b>x.xxx</b>	is the surge in meters (signed)	
	<b>y.yyy</b>	is the sway in meters (signed)	
	<b>z.zzz</b>	is the heave in meters (signed)	
	<b>hh</b>	is the checksum	

**Abb. 26: NMEA-Telegramm [13]**

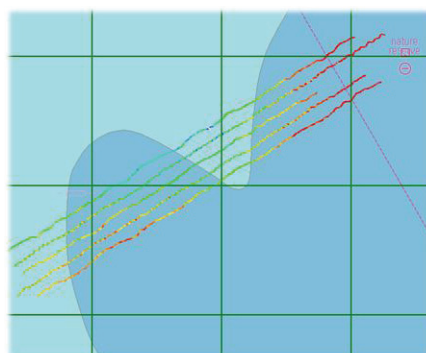
### 8.1.2 Durchführung

Die Testfahrten wurden unter verschiedenen Seegangsverhältnissen durchgeführt. Bei bewegter See ist der Einfluss der Hub-, Roll- und Stampfbewegungen deutlich höher als bei schwachem Seegang. Die Erfassung und Anbringung der Hub-, Roll- und Stampfbewegungen als Korrekturen verbessert die Messergebnisse erheblich. Durch den Einsatz der neuen Bewegungssensoren in den Booten der Komet, sollen auch bei hohen Bewegungsfrequenzen verwendbare Korrekturen ermittelt werden können.

Die Beschickung über WEK erfolgt in Gebieten, in denen keine GNSS-Signale zur Verfügung stehen. Dann müssen die Hubbewegungen mit Hilfe des Octans bestimmt werden. Anhand der Messfahrten, wird durch den Vergleich mit anderen Systemen überprüft, inwieweit der Octans entweder für die Bestimmung der Hubbewegungen bei WEK Beschickung oder zur Reduktion der Roll- und Stampfbewegungen bei PDGNSS Messungen eingesetzt werden kann.

#### Messfahrt – starker Seegang

Die erste Messfahrt fand bei Windstärken von etwa 6-8 Bft statt. Die Aufzeichnung der Daten erfolgt zum Einen über das Programm WinProfil und zum Anderen über ein Sensorenerfassungsprogramm. In WinProfil werden während der Fahrt die Linien, Kurs, Geschwindigkeit und alle für die Fahrt erforderlichen Daten angezeigt. Bei starkem Seegang wurden 5 Profillinien mit einem Abstand von 20 m gefahren (Abb. 27).



**Abb. 27: 5 Profillinien**

### **Messfahrt – Dünung**

Die Erfassung von langperiodischen Bewegungen mit Hilfe von Inertialsystemen liefert oft unzufriedenstellende Ergebnisse. Auf Grund dessen fand die zweite Messfahrt bei besseren Wetterverhältnissen und Dünung (abnehmender Wind der Stärke 3) statt. Der Trimble-Empfänger stand zu diesem Zeitpunkt nicht zur Verfügung. Um die Hub-Komponente trotzdem weiter zu testen, wurden mit dem Sensoren-Programm nur die Leica- und Octansdaten aufgezeichnet. Die Linien wurden bei 6-7 kn für jeweils 4-5 min gefahren.

Diese Messungen zeigten in der Auswertung bereits gute Ergebnisse. Da die vorher eingesetzten Sensoren immer wieder Fehler bei Geschwindigkeits- und Kursänderungen lieferten [14, 19], wurden weitere Testmessungen durchgeführt, um eine endgültige Aussage treffen zu können. Hierbei wurden nur noch einzelne Linien gefahren.

### **Messfahrt – Kurs- und Geschwindigkeitswechsel**

Da die vorher in den Booten eingesetzten Sensoren bei positiven bzw. negativen Beschleunigungen und bei Kurswechseln immer wieder Probleme zeigten, wurden auch hierzu Testfahrten durchgeführt. Für den Geschwindigkeitswechsel wurde eine Linie von ca. 1 km Länge mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten gefahren. Für die Kurswechsel wurden anstatt Linienprofile, eine Spirale mit kleiner werdendem Kurs (Abb. 28), sowie ein Nikolaushaus (Abb. 29) gefahren. Bei dem Nikolaushaus waren stärkere Kurswechsel in Verbindung mit Geradeausfahrten erforderlich. Die Messungen wurden bei einer Windstärke von 3 Bft durchgeführt.

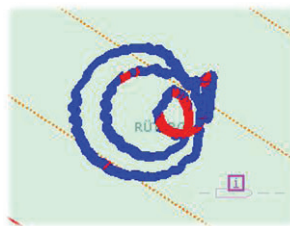


Abb. 28: Spirale



Abb. 29: Nikolaushaus

### **Messfahrt – Dünung, Fahrt mit der Welle**

Bei langer Dünung und Windsee (Windstärke 4-5 Bft) wurde eine weitere Linie, mit der See, gefahren. Langperiodische Wellen, vor allem von achtern, erfordern stärkere Ruderbewegungen. Zudem wird das Boot, bei leichter Dünung von achtern, nur ganz langsam angehoben. Diese Bewegungen lassen sich mit Bewegungssensoren sehr schwer erfassen.



### 8.1.3 Zeitsynchronisation

Die Zeitsynchronisation zwischen dem GNS-System, dem INS, sowie zu allen anderen Sensoren (z.B. Echolot) gehört zu den wichtigsten Aufgaben. Die Sensordaten müssen alle innerhalb einer gewissen Zeitspanne vorliegen, damit keine Fehler entstehen. Ein Zeitfehler von 50 ms, bei einer Geschwindigkeit von ca. 16 km/h, führt zu einem Ortsfehler von etwa 22,2 cm.

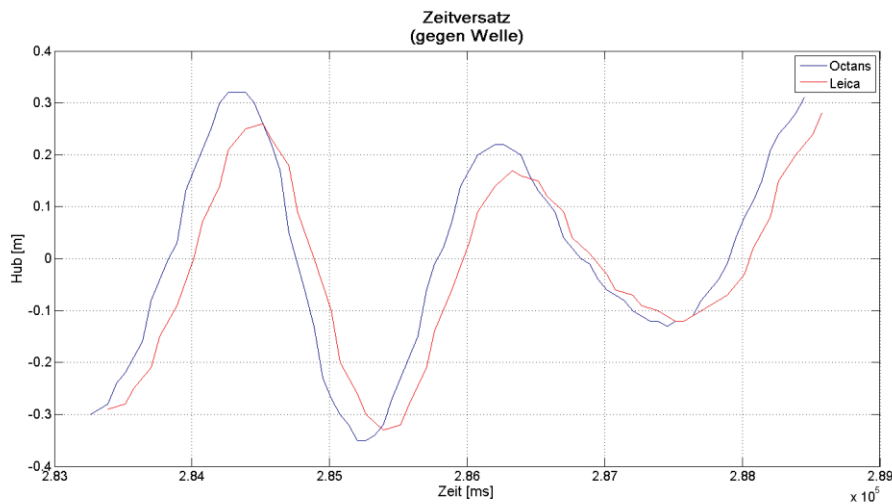


Abb. 30: Zeitversatz bei starkem Seegang, gegen die Welle

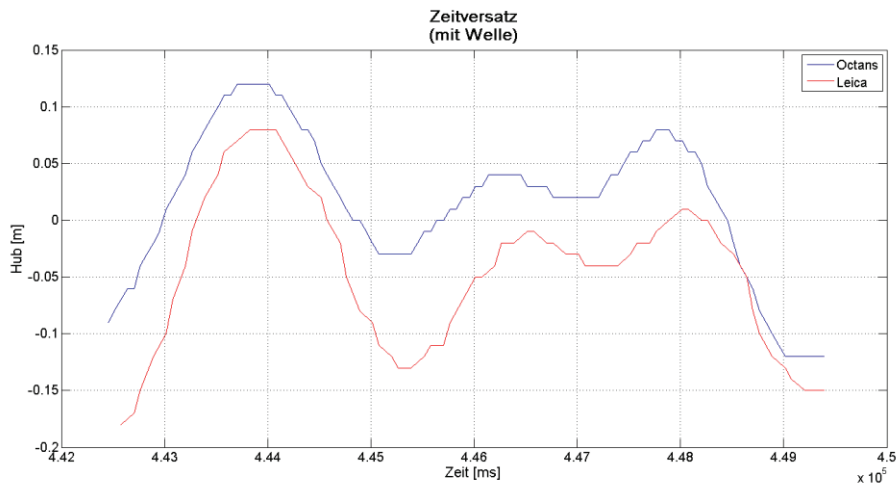


Abb. 31: Zeitversatz bei starkem Seegang, mit der Welle

In den Abb. 30 und Abb. 31 ist deutlich zu erkennen, dass zwischen den Daten des Leica GNS-Systems und des Octans ein Zeitverzug besteht. Im Plotfenster von Matlab können mit dem Befehl „ginput“ die Punktkoordinaten aus einer Grafik abgefasst und in einem neuen Vektor gespeichert werden. Für beide Linien wurden vergleichbare Punkte ausgewählt (z.B. Nulldurchgänge) und stichprobenartig die Zeitunterschiede an diesen Punkten berechnet. Insgesamt ist ein Zeitfehler von ca. 0,2-0,5 sec erkennbar. Mit Welle ist der Zeitfehler größer als gegen die Welle. Die Hubunterschiede sind mit

der Welle ebenfalls größer. Die folgende Tabelle 1 zeigt den entstehenden Fehler in Abhängigkeit der Tiefe.

### Beispielrechnung - Zeitfehler in Abhängigkeit der Tiefe

Öffnungswinkel Echolot:  $8^\circ$

angenommene Geschwindigkeit  $v$ :  $9 \text{ kn} \triangleq 4,63 \text{ m/s}$

( $1 \text{ kn} = 1 \text{ sm/h} = 0,5144 \text{ m/s}$ )

Tiefe [m]	Ø Schallkegel [m]	Zeitfehler t [ms]	Weg [m] =v*t
2,00	0,28	10	0,05
3,00	0,42	25	0,12
4,00	0,56	50	0,23
5,00	0,70	100	0,46
7,00	0,98	125	0,58
10,00	1,40	150	0,69
15,00	2,09	175	0,81
20,00	2,79	200	0,93

Tabelle 1: Zeitversatz

Für die Berechnung in Tabelle 1 wurde eine Fahrtgeschwindigkeit von 9 kn angenommen. Im ersten Teil der Tabelle wurde, mit Hilfe des Cosinussatzes, für die unterschiedlichen Tiefen der Durchmesser des Schallkegels berechnet. Der Schallkegel der sich auf dem Meeresboden abbildet wird als Footprint bezeichnet (vgl. Abb. 2). Die Zeitverzögerungen sind ebenso der Tabelle zu entnehmen. In einer Tiefe von 7 m ergibt sich ein Footprint mit einem Durchmesser von ca. einem Meter auf dem Meeresboden. Alle in diesem Bereich gemessenen Tiefen werden gemittelt und zu einer Tiefe zusammengefasst. Bei einer Tiefe von 7 m darf der Zeitversatz also nicht größer als 200 ms sein. Ansonsten stimmen die GPS-Positionen nicht mehr mit den Lottiefen überein.

## 8.2 Messungen im Labor

In der Hochschule Neubrandenburg wurden mit dem Octans III weitere Testmessungen durchgeführt. Das Instrumentenkundelabor, in dem die Messungen durchgeführt wurden, ist vom restlichen Teil des Gebäudes entkoppelt. Es ist separat gegründet und damit schwingungsfrei. Bewegungen des Gebäudes haben also keinen Einfluss auf die dort durchgeführten Messungen.

### Langzeitmessung

Inertiale Navigationssysteme weisen bei Langzeitmessungen häufig unerwünschte Drifterscheinungen auf. Durch die Nichtidealitäten der Sensoren verschlechtert sich mit der Zeit im Allgemeinen die Positionsgenauigkeit. Dieses Verhalten wird im Rahmen der Langzeitmessung überprüft. Der Octans wurde dafür, wie in der Abb. 33 zu sehen, auf eine ebene Metallplatte gestellt. Diese Platte steht auf einem Betonblock und kann zusätzlich horizontalisiert werden. Die Langzeitmessung wurde über Nacht durchgeführt (ca. 12h). Die Abb. 32 und Abb. 33 zeigen den Versuchsaufbau für die Langzeitmessung im Labor.

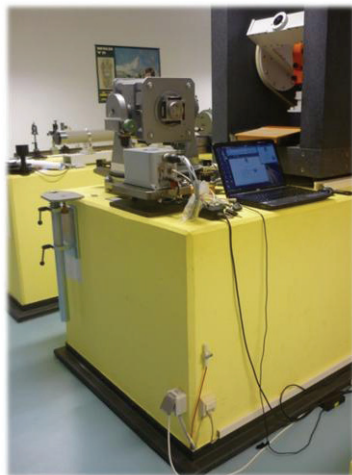


Abb. 32: Aufbau im Labor

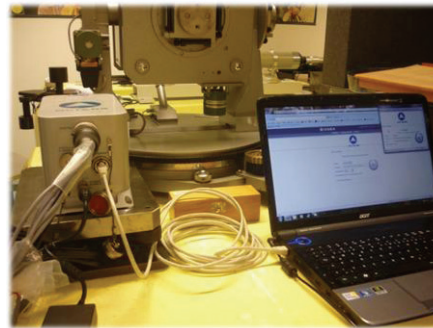


Abb. 33: Datenübertragung

Bevor mit den Messungen im Labor der Hochschule Neubrandenburg begonnen werden konnte, musste die Kommunikation zwischen dem Octans und einem Laptop sichergestellt werden. Es war angedacht, die Daten, wie bei den hydrographischen Messungen, mit dem Sensorenerfassungsprogramm aufzunehmen. Dieses ist aber so programmiert worden, dass alle Schnittstellen geöffnet sein müssen, damit die Daten einlaufen. Da nur der Octans an die Schnittstelle angeschlossen wurde, war das Programm damit hinfällig oder hätte umprogrammiert werden müssen. Somit wurde aus Zeitgründen auf die webbasierte Benutzeroberfläche des Octans zurückgegriffen, welche über eine IP-Adresse zu erreichen ist. Die Verbindung zwischen Octans und

Laptop wurde anstatt einer RS232-Schnittstelle, über ein Ethernetkabel hergestellt. Die folgende Abb. 34 zeigt die Weboberfläche.

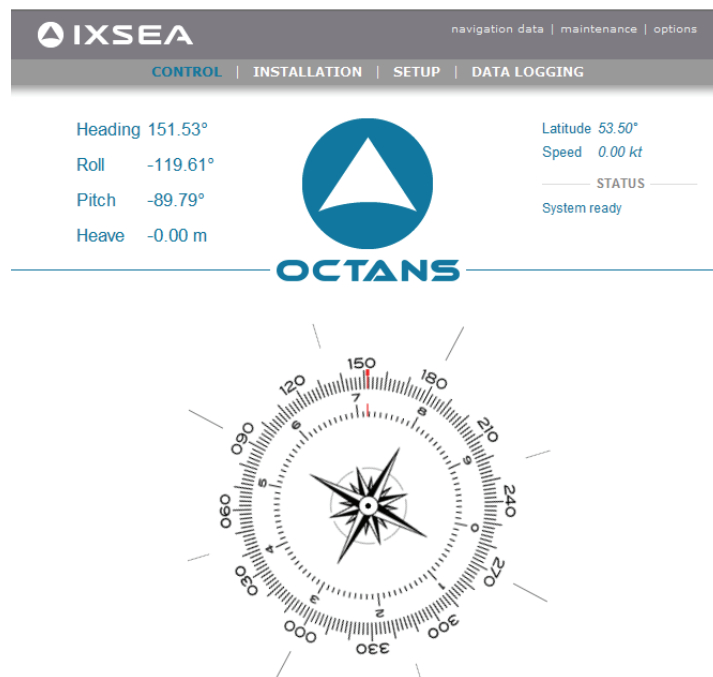


Abb. 34: Weboberfläche IXSEA

Im Menü „Control“ sind die momentanen Werte zu sehen. Über die Menüpunkte „Installation“ und „Setup“ können verschiedene Einstellungen, wie z.B. Protokolltypen, Schnittstellen, Baudraten, Orientierung des Gerätes, etc. vorgenommen werden. Die Datenaufnahme erfolgt unter dem Menüpunkt „Data Logging“.

### Kurstabilität

Zur Überprüfung der Kursrichtung wurde der Octans auf einem Drei-Achsen-Drehtisch (Abb. 35) befestigt. Aufgrund der Größe des Octans konnten jedoch nur zwei Achsen des Drehtisches genutzt werden. Der Drehtisch besitzt wie in Abbildung Abb. 36 zu sehen „Referenzmarken“ an den Stellen 0°, 90° und 270°. An diesen Stellen rastet ein Metallstift ein. Zusätzlich kann die eingestellte Gradzahl noch über eine Optik abgelesen werden.

Die Daten des Octans wurden zunächst ohne Bewegungseinflüsse an den Referenzmarken für ca. 3 min aufgezeichnet. Später wurde der Octans dann zusätzlich auf jeder Referenzmarke nach links und rechts geneigt.

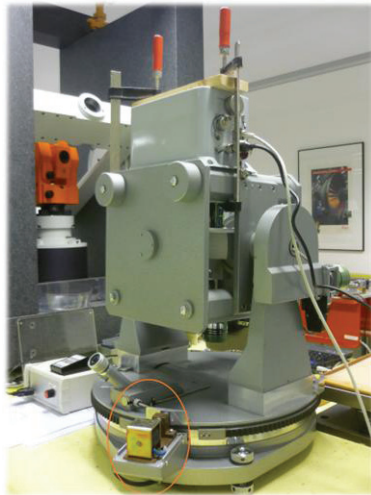


Abb. 35: Drei-Achsen-Drehtisch

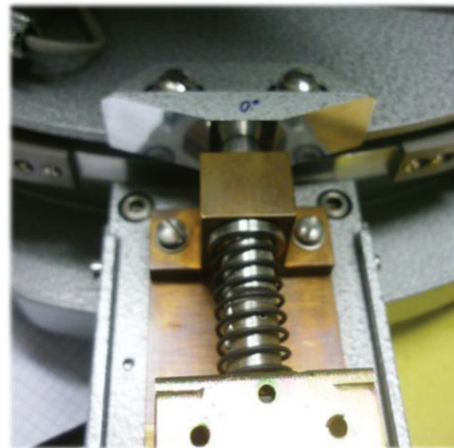


Abb. 36: Referenzmarke

### Wiederholungsmessungen – Simulation von Roll- und Stampfbewegungen

Bei den Wiederholungsmessungen wurde der Drehtisch jeweils  $1^\circ$  nach links und  $1^\circ$  nach rechts geneigt. In diesen Stellungen, sowie auch in der Mittelstellung bei  $0^\circ$ , wurden für ca. 60 s die Daten aufgezeichnet. Um den toten Gang des Drehtisches zu umgehen, wurde dieser von der Mittelstellung aus erst nach links und dann nach rechts geneigt, um dann wieder in die Ausgangsstellung zu kommen (Abb. 37).

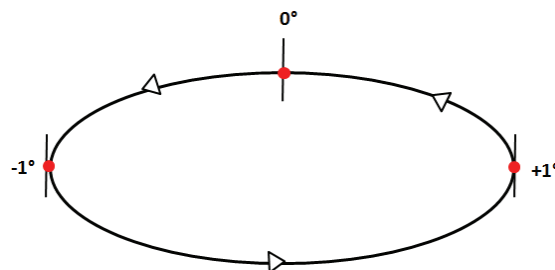


Abb. 37: Messungsablauf

### Hysterese

Hysterese beschreibt das Andauern eines Zustandes in Abhängigkeit einer physikalischen Messgröße oder -richtung. Die maximale Differenz, die sich aus den ansteigenden und absteigenden Werten ergibt, wird als Hysteresefehler bezeichnet. Bei inertialen Sensoren lässt sich beobachten, dass ansteigende Werte zu klein und absteigende Werte zu groß angezeigt werden [27]. Dieses Verhalten wird im Labor überprüft. Hysterese entsteht z.B. durch mechanische Ungenauigkeiten.

## 9. Auswertung der Laboruntersuchungen

### 9.1 Langzeitmessung

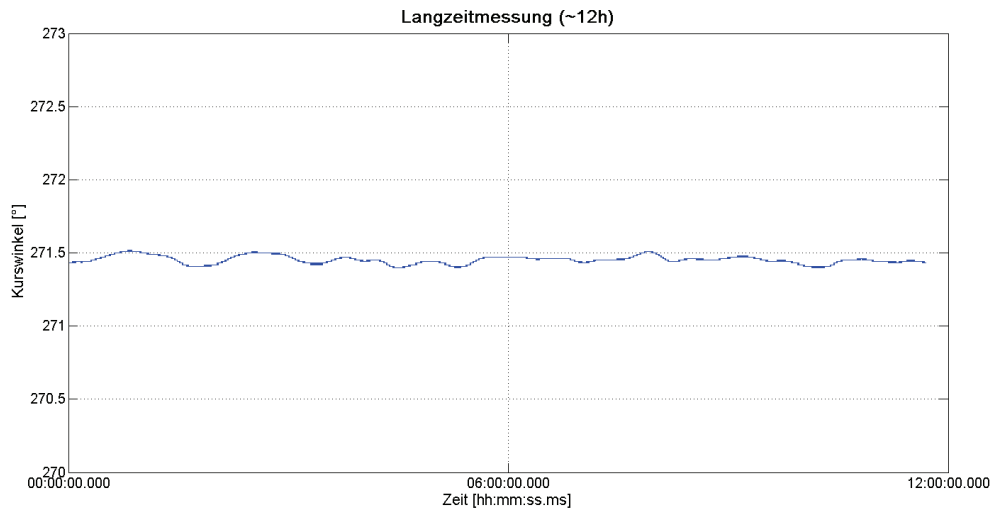


Abb. 38: Langzeitmessung

Mittelwert 271,45°

Standardabweichung 0,028°

Die Kurswinkel steigen während der Langzeitmessung immer wieder leicht an und sinken nach kurzer Zeit wieder. Ein konstanter Anstieg der Werte ist nicht zu erkennen. In den Herstellerangaben ist die Drift mit  $0,05^\circ/\text{h}$  angegeben. Aufgrund des unregelmäßigen Auf- und Absteigen der Werte wurden die Kurswinkel in der folgenden Abbildung innerhalb der einzelnen Stunden betrachtet. Die Abb. 39 zeigt die Langzeitmessung mit einer kleineren Achseneinteilung, um die Werte besser interpretieren zu können.

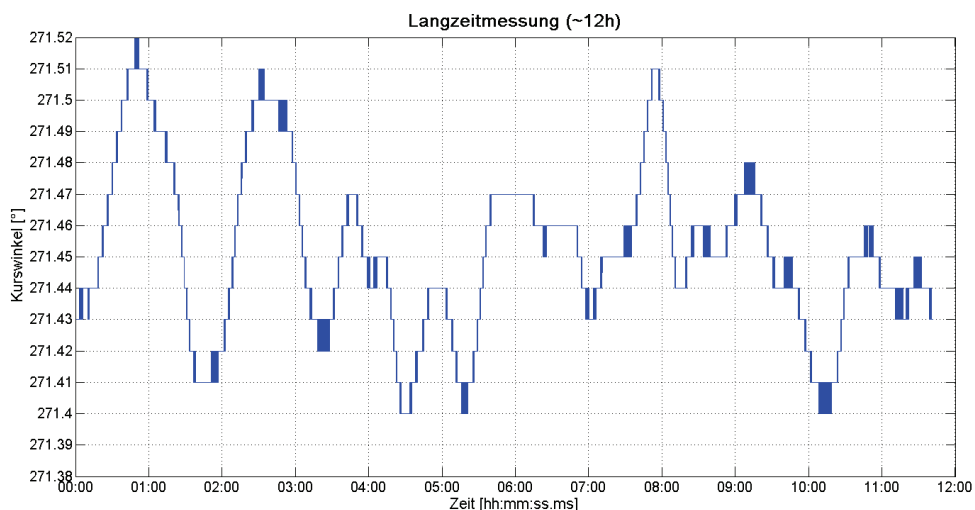


Abb. 39: Langzeitmessung

Von 0:00 bis ca. 03:30 Uhr weichen die Driftraten leicht von den Herstellerangaben ab. Von 3:30 bis ca. 5:30 Uhr liegen sie wieder innerhalb der Herstellerangabe von 0,05°/h. Ab ca. 5:30 Uhr zum Ende der Messung zeigt sich ein unregelmäßiges Verhalten. Während der gesamten Messung liegt der kleinste Wert bei 271,40°. Der größte Wert liegt bei 271,52°. Umwelteinflüsse, wie z.B. Temperaturschwankungen oder Schwingungen des Gebäudes durch vorbei fahrende LKW (Rostocker Str.), sind nicht auszuschließen. Das Instrumentenkundelabor ist auf 20°C klimatisiert. Die Temperatur kann über Nacht leicht ansteigen.

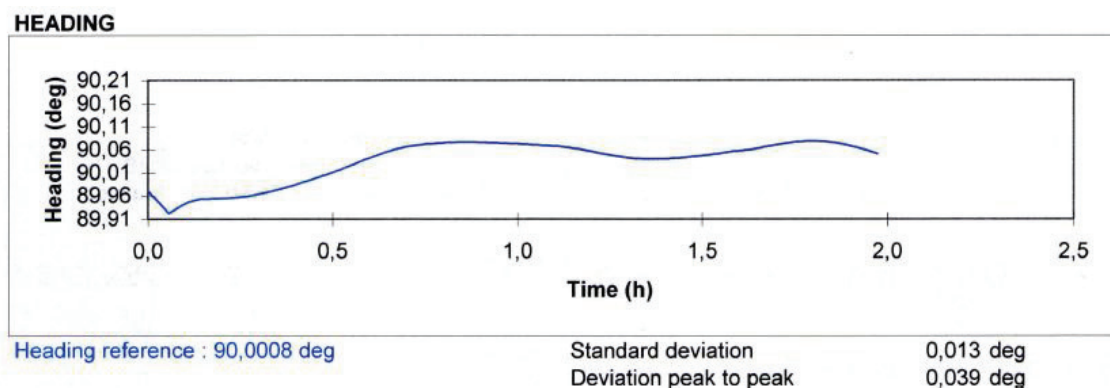


Abb. 40: Referenzmessung Kurs, Abnahmeprotokoll IXSEA

Die Abb. 40 zeigt einen Ausschnitt aus dem Abnahmeprotokoll des Octans. Hier wurde eine Referenzmessung für den Kurs des Octans durchgeführt. Die Standardabweichung für 2h Messdauer beträgt 0,013°. Die Labormessung hat eine Standardabweichung von 0,028° bei ca. 12h Messdauer. Kleine Schwankungen sind hier ebenfalls zu erkennen. Die gesamte Langzeitmessung zeigt, wie in Abb. 38 zu sehen keine Driften, kurzfristig kommen allerdings häufiger Abweichungen von den Herstellerangaben vor.

## 9.2 Kursstabilität

Im Anschluss an die Langzeitmessung wurde der Kurs mit Hilfe des Drei-Achsen-Drehtisches weiter überprüft. Der Octans wurde auf dem Drehtisch auf den Referenzmarken 0°, 90° und 270° ca. 2 min im Stillstand laufen gelassen. Aus den Kurswinkeln für die jeweiligen Referenzmarken wurde ein Mittelwert sowie eine Standardabweichung berechnet (Tabelle 2).

	Mittelwert [°] (für Referenzmarken)	Stdabw. [°]
90°	92,711	0,007
270°	272,769	0,007
0° (360°)	2,800	0,000

Tabelle 2: Kursabweichung

Die gemessenen Kursrichtungen haben insgesamt eine mittlere Abweichung von 2,76°, darin ist ein Offset enthalten, welcher durch das provisorische und dadurch nicht korrekte Aufsetzen des Octans auf den Drehtisch entsteht. Die Abb. 41 zeigt in der x-Achse die Referenzwinkel und in der y-Achse die einzelnen Mittelwerte (für die Referenzmarken) vom Gesamtmittelwert (2,76°) abgezogen.

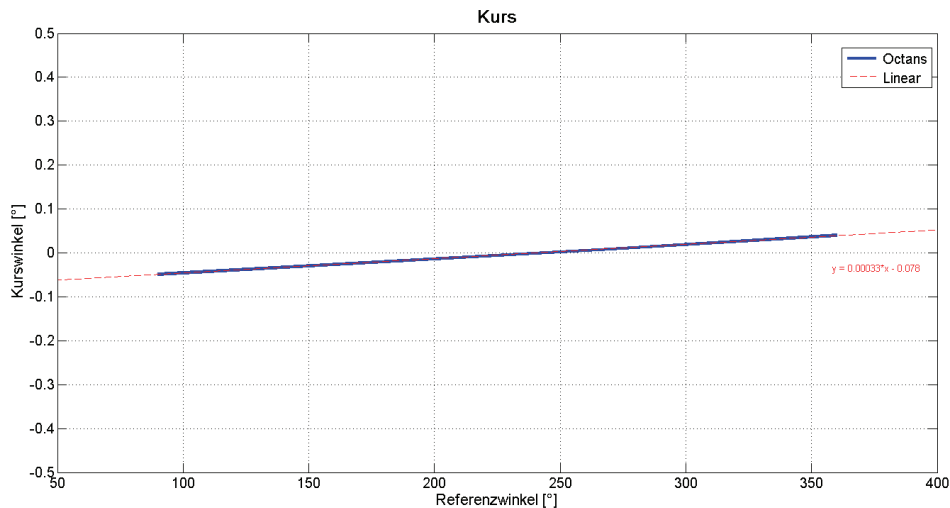


Abb. 41: Referenzmessung

### Kursstabilität unter Bewegungseinflüssen

Der Octans wurde auf den Referenzmarken 0°, 90°, 270° zusätzlich nach Back- und Steuerbord geneigt. Unabhängig von den Bewegungsrichtungen (für jeweils ~2 min) ist während der gesamten Messdauer für jede Referenzmarke ein Anstieg des Kurswinkels zu erkennen. In der Tabelle 3 sind die Anfangs- und Endwerte, sowie die Differenzen dargestellt.

	Uhrzeit	Kurs 270°	Diff [°]	Uhrzeit	Kurs 0°	Diff [°]	Uhrzeit	Kurs 90°	Diff [°]
Beginn	17:53:16	272,69	0,06	18:05:10	2,77	0,07	18:22:40	92,76	0,07
Ende	18:02:30	272,75		18:14:33	2,84		18:32:42	92,83	
	(~9min)			(~12min)			(~12min)		

Tabelle 3: Kursstabilität unter Bewegungseinflüssen

Mit einer Driftrate von 0,07° auf etwa 12 min werden die Angaben des Herstellers mit 0,05°/h deutlich überschritten. Die Messungen der Kursstabilität bestätigen damit die Ergebnisse der Langzeitmessung. Aufgrund des provisorischen Aufbaus sind die Ergebnisse jedoch kritisch zu betrachten.



### 9.3 Wiederholungsmessungen

Bei den Wiederholungsmessungen werden Roll- und Stampfbewegungen simuliert. Der Drehtisch wurde dafür jeweils um 1° nach back- und 1° nach steuerbord geneigt. In diesen Stellungen, sowie auch in der Mittelstellung bei 0°, wurden für ca. 60 s die Daten aufgezeichnet. Um den toten Gang des Drehtisches zu umgehen, wurde dieser von der Mittelstellung aus erst nach links und dann nach rechts geneigt, um dann wieder in die Ausgangsstellung zu kommen.

Die Standardabweichungen, sowie die Standardabweichungen für den Einzelwert sind in der Tabelle 4 zu sehen. Für die Links- und Rechtsneigungen beträgt die Standardabweichung jeweils 0,002°, sowie für den Einzelwert 0,001°.

	für -1°	für +1°
$s_w = \sqrt{\frac{[vv]}{(n-1)(s-1)}} =$	0,002°	0,002°
$\bar{s}_w = s_w * \frac{1}{\sqrt{n}} =$	0,001°	0,001°

Tabelle 4: Standardabweichungen

„n“ bezeichnet die Anzahl der Wiederholungsmessungen

„s“ bezeichnet die Anzahl der gemessenen Werte während einer Wiederholungsmessung

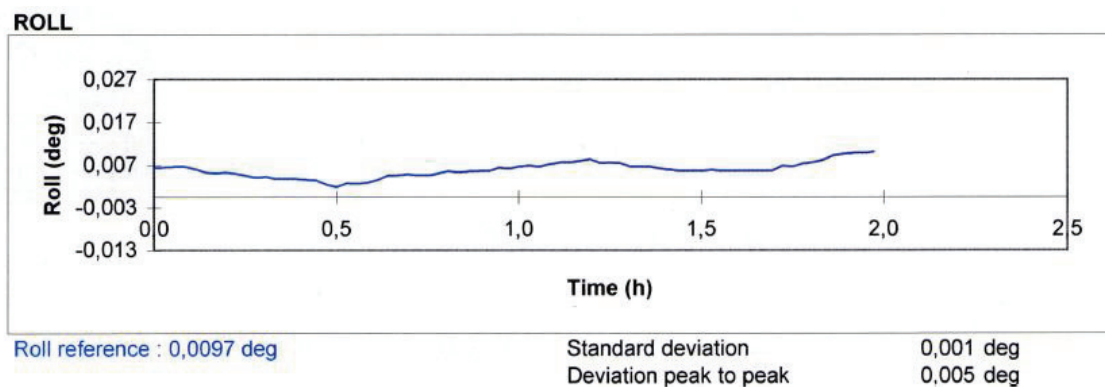


Abb. 42: Referenzmessung Roll, Abnahmeprotokoll IXSEA

Die Abb. 42 zeigt einen Ausschnitt aus dem Abnahmeprotokoll des Octans. Hier wurde eine Referenzmessung für den Rollwinkel durchgeführt. Die Referenzmessung für den Stampfwinkel zeigt dieselben Abweichungen. Die Standardabweichung des Rollwinkels beträgt hier 0,001° bei einer Messdauer von 2 Stunden. Die Ergebnisse der Wiederholungsmessungen sind demzufolge realistisch.

## 9.4 Hysterese

Eine Hysterese äußert sich bei inertialen Sensoren dadurch, dass die aufsteigenden Werte immer kleiner als die absteigenden Werte angezeigt werden. Der Octans wurde an den Referenzmarken 0°, 90°, 270° für kurze Zeit in der Ruhephase belassen, bis auf 360° gedreht und dann im Rückweg wieder an den Referenzmarken 270°, 90°, 0° für kurze Zeit laufen gelassen. Der erste Teil der Messung, von 0° auf 360°, beschreibt also den „Hinweg“ und der zweite Teil, von 360° auf 0°, den Rückweg (Abb. 43). Die Tabelle 5 stellt die gemittelten Winkel in den Ruhephasen dar, sowie die Differenzen zwischen Hin- und Rückweg. Die Messung wurde zweimal durchgeführt und bestätigt die Ergebnisse der ersten Messung. Die Differenzen sind zwar im Hinweg kleiner als im Rückweg, aber sie sind so klein, dass keine Hysterese festgestellt werden kann.

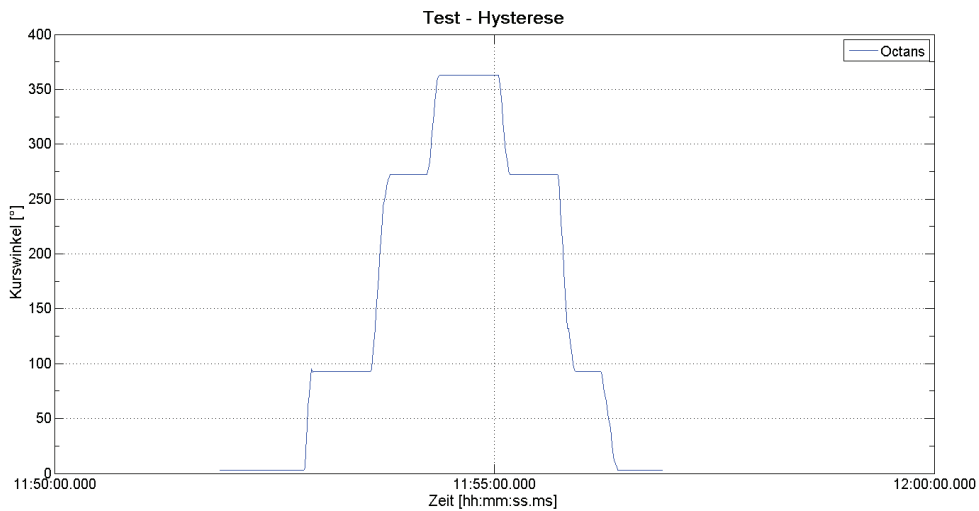


Abb. 43: Hysterese

	Hinweg [°]	Rückweg [°]	Differenz [°]
0°	2,609	2,683	0,074
90°	92,640	92,689	0,048
270°	272,676	272,680	0,004

Tabelle 5: Differenzen zwischen Hin- und Rückweg

## 10. Auswertung der Messfahrten auf See

Die Auswertung der Messungen auf See unterteilt sich in zwei Abschnitte. Im Abschnitt 9.1 werden die Hub-, Roll- und Stampfdaten der Messfahrten bei starkem Seegang und bei Dünung miteinander verglichen. Im Abschnitt 9.2 erfolgt die Auswertung der Messfahrten mit Kurs- und Geschwindigkeitswechsel sowie die Fahrt bei Dünung mit achterlicher See. Aufgrund der großen Datenmengen wurde die Auswertung mit den Programmen Matlab der Firma „The MathWorks“ sowie kleinere Berechnungen mit Microsoft Excel durchgeführt.

### Berechnung der Hubdaten aus den ellipsoidischen Höhen des Leica GNS-Systems

Der Hub entsteht durch die Auf- und Abwärtsbewegungen des Bootes. Mit dem Leica GNS-System werden nicht nur horizontale Bewegungen, sondern auch die Hubbewegungen des Bootes erfasst. Die Hubbewegungen werden ebenfalls vom Octans abgeleitet und direkt im Messprotokoll ausgegeben. Bei einer Vermessung mit WEK Beschickung oder einem Ausfall des Korrekturdatendienstes SAPOS® kann auf die Hubwerte des Octans zurückgegriffen werden.

Vom Leica GNS-System werden ellipsoidische Höhen bestimmt. Um die Hubdaten zwischen den beiden Systemen vergleichen zu können, müssen die ellipsoidischen Höhen zunächst um ihre Roll- und Stampfwinkel korrigiert werden. Der vertikale Abstand von der GNSS-Antenne zum Echolot ist bekannt und beträgt 2 m. Dieser Höhenunterschied wird durch die Seegangsbewegungen verfälscht (Abb. 44). Vom Leica GNS-System werden bei Seegang, durch die Schräglage des Bootes, niedrigere Höhen gemessen.

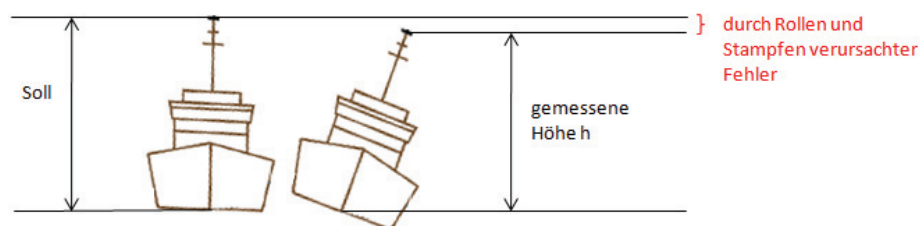


Abb. 44: Fehler durch Seegangsbewegungen

Die Schräglage des Bootes verursacht demnach eine falsch gemessene Höhe. Diese Höhe wird mit Hilfe der Roll- und Stampfwinkel, welche vom Octans gemessen werden, korrigiert. Um die Hubbewegungen des Leica Systems mit denen des Octans vergleichen zu können, muss der Fehler, der sich durch Rollen und Stampfen ergibt ( $f_1+f_2$ ), auf die ellipsoidische Höhe aufaddiert werden (Abb. 45). Aus den neuen ellipsoidischen Höhen wird ein Mittelwert berechnet, um schließlich durch Abzug des

Mittelwertes, von den einzelnen ellipsoidischen Höhen, zu den Hubwerten zu gelangen.

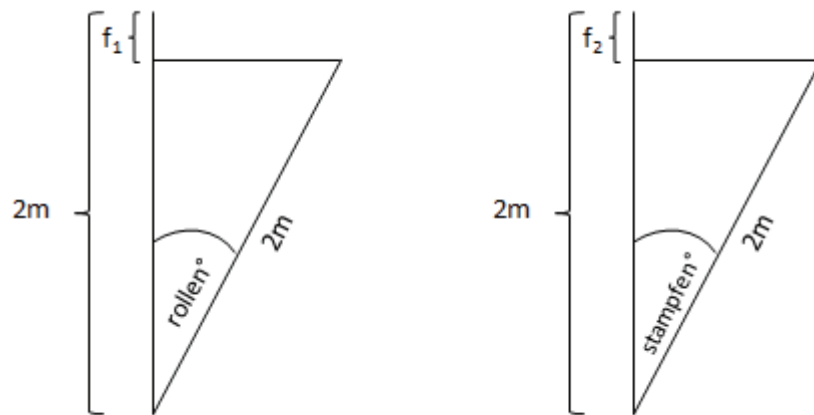
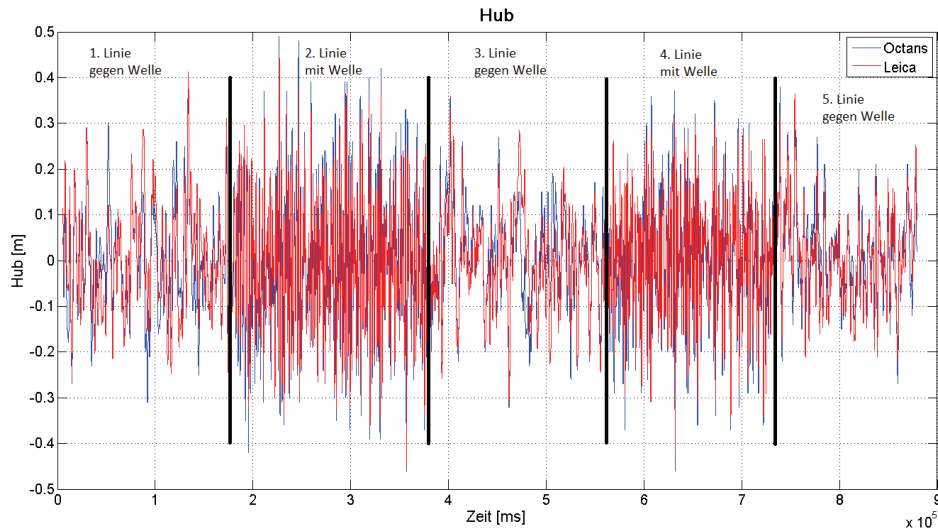


Abb. 45: Berechnung über Cosinussatz

## 10.1 Vergleich der Messfahrten „starker Seegang“ und „Dünung“

### 10.1.1 Hub

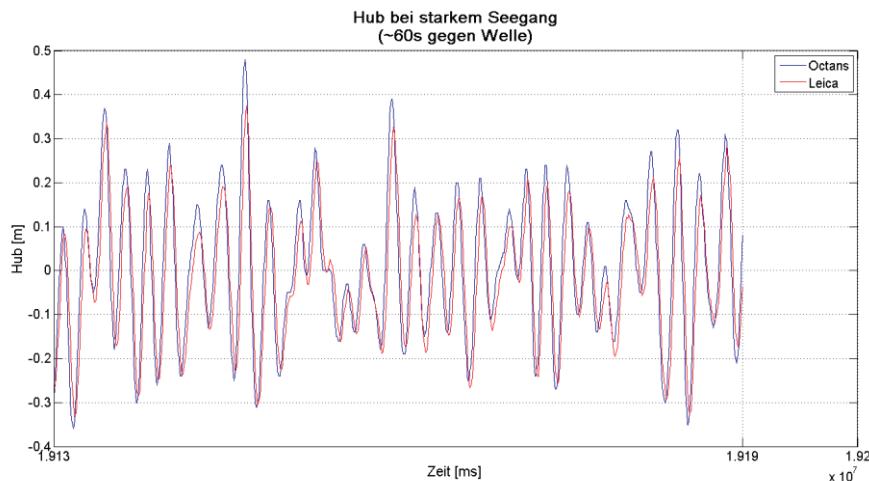
Zur Erfassung der Hubbewegungen des Bootes stehen zum einen die Daten des Octans III zur Verfügung und zum anderen die Hubbewegungen aus dem Leica GNS-System 1200. Die Daten des Leica GNS-System 1200 wurden um die Roll- und Stampfwinkel des Octans korrigiert. Es soll überprüft werden, ob die Hubkomponente des Octans verwendet werden kann, wenn keine GNSS-Signale zur Verfügung stehen. Beide Sensoren wurden bei Fahrt gegen die Welle und bei Fahrt mit der Welle, bei schlechtem sowie gutem Wetter getestet. In der Abb. 46 sind 5 Profillinien zu sehen, die mit und gegen die Welle, bei starkem Seegang gefahren wurden. In den Daten sind keine groben Ausreißer zu sehen. Deutlich zu erkennen sind die Unterschiede zwischen den Fahrten mit und gegen die Welle. Die Fahrten mit Welle haben eine höhere Frequenzdichte und größere Amplituden. Bei den Fahrten gegen die Welle sind, durch die entgegenkommenden Wellen, die Amplituden kleiner.



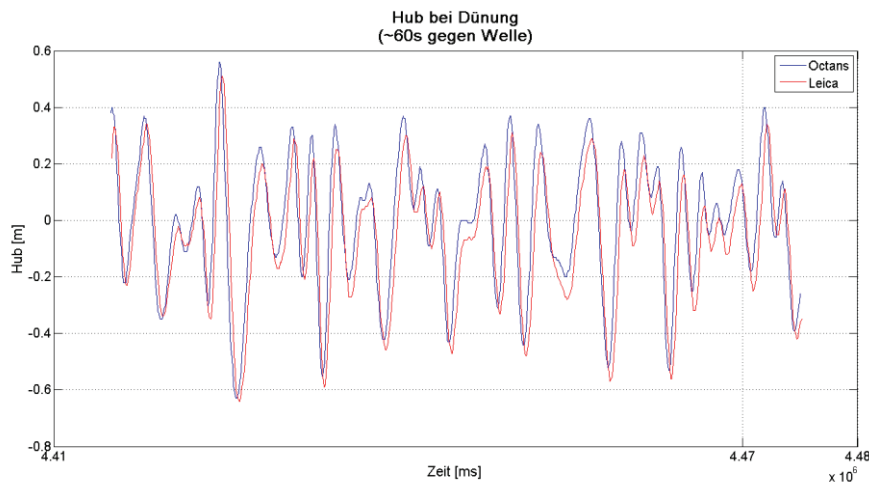
**Abb. 46: Hub (5 Profillinien)**

### Hub gegen die Welle

Die Fahrt der 5 Profillinien fand bei starkem Seegang (Windstärken von 6-8 Bft) statt. Dies sind Messbedingungen unter denen im Normalfall keine Messfahrt stattfinden würde. Da bei ruhiger See die Unterschiede nicht deutlich werden, wurden die Systeme unter extremen Bedingungen getestet. In den folgenden Abbildungen sind jeweils Ausschnitte der einzelnen Profillinien zu sehen. Die Zeitachsen in den Abbildungen sind in 60 s Abschnitte eingeteilt, um die Messungen untereinander besser vergleichen zu können. Die Bewegungsfrequenz bei starkem Seegang gegen die Welle ist deutlich höher als bei Dünung. Die Fahrten gegen die Welle bei starkem Seegang (Abb. 47), sowie bei Dünung (Abb. 48) zeigen Abweichungen von ca. 10 - 20 cm im Hub. Bei Dünung sind die Abweichungen geringer (ca. 5-10 cm). Auch wenn der Octans unter diesen extremen Bedingungen realistische Werte liefert, sollten die Belastungen an die Bootsbesatzung berücksichtigt werden.



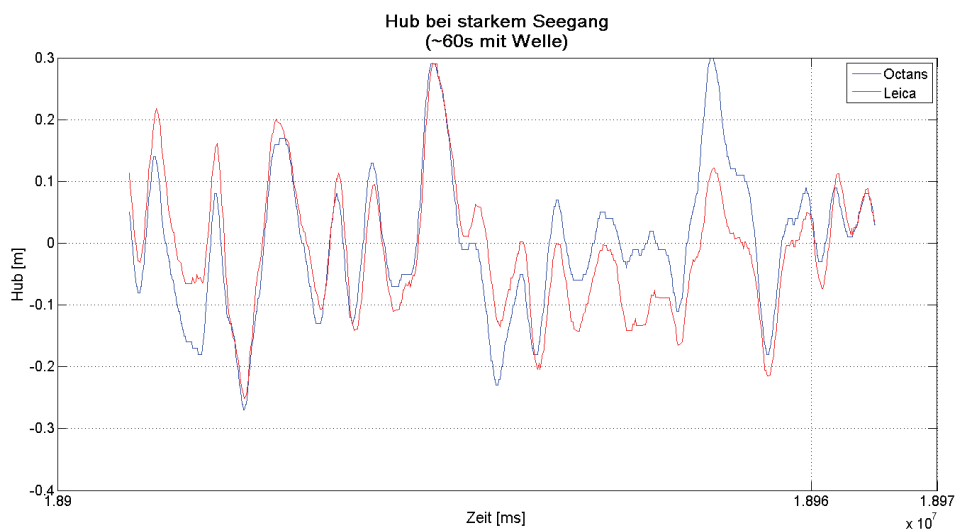
**Abb. 47: Hub bei starkem Seegang, 60 s gegen die Welle**



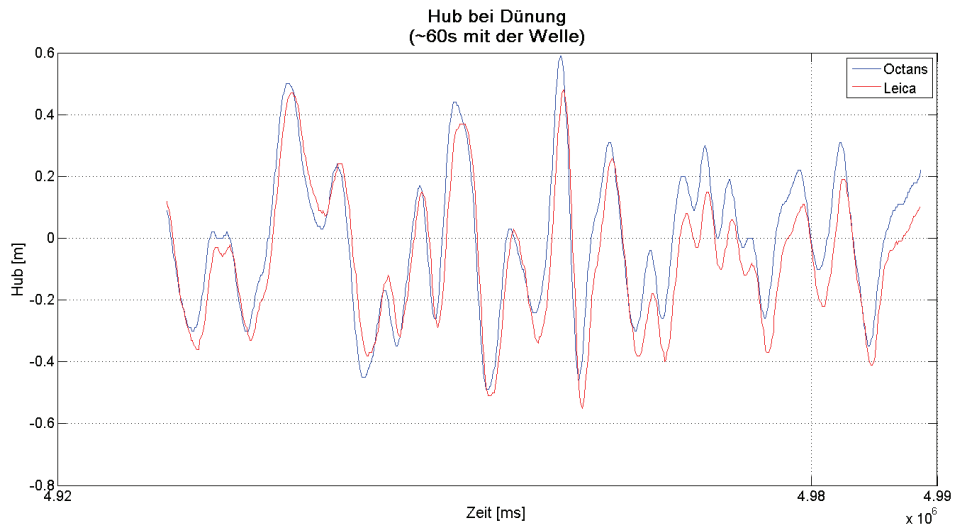
**Abb. 48: Hub bei Dünung, 60 s gegen die Welle**

### Hub mit der Welle

Vom Leica GNS-System werden dieselben Ausschläge, aber in etwas geringeren Ausmaßen abgebildet. Bei starkem Seegang und bei Fahrt mit der Welle gibt es Differenzen bis zu 20 cm, wie in der Abb. 49 zu sehen ist. Bei Dünung, mit der Welle liegen die Abweichungen wieder bei ca. 10 cm (Abb. 50). Des Weiteren ist zu sehen, dass bei allen Leica-Werten ein kleiner Zeitverzug besteht. Dieser entsteht wahrscheinlich durch das Sensorenerfassungsprogramm. Da dieses Programm nur zur Datenaufnahme und –speicherung der Testmessungen entwickelt wurde, wird dieser Fehler nicht weiter betrachtet. Des Weiteren ist zu beachten, dass vom Leica-Empfänger nur eine Aufzeichnungsrate von 10 Hz realisiert wird. Der Octans ist auf eine Messfrequenz von 20 Hz eingestellt. Die Abbildungen 46 bis 49 zeigen, dass der Octans nicht nur bei kurzen Wellen gegenan, sondern auch beim „Surfen“ mit langer Dünung ausreichend sicher arbeitet.

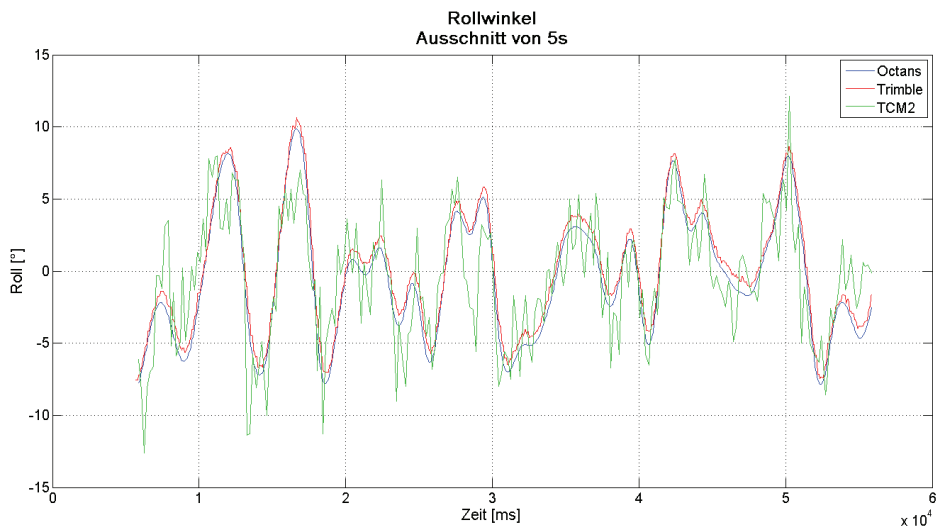


**Abb. 49: Hub bei starkem Seegang, 60 s mit der Welle**



**Abb. 50: Hub bei Dünung, 60 s mit der Welle**

### 10.1.2 Rollwinkel



**Abb. 51: Rollwinkel bei starkem Seegang, Ausschnitt 5 s**

Der Rollwinkel wird zu Korrektur benötigt, wenn die Höhenänderungen mit PDGNSS (Präzises Differentielles GNSS) gemessen werden. Er wird auf den kleinen Vermessungsbooten der Komet mit dem Octans III bestimmt. Für die Testmessungen steht zum Vergleich ein Trimble SPS361 zur Verfügung. Die Bestimmung der Schiffslageänderungen mit diesem System erfolgt wie in Kapitel 5.1 und 7.3 beschrieben.

Die Abb. 51 zeigt einen Ausschnitt von 5 s mit den Sensoren Octans III, Trimble SPS361 und TCM2. Die Rollwinkel des Octans III und des Trimble SPS361 passen, bis auf einen kleinen Offset des Trimble-Systems, gut zusammen. Das Offset entsteht durch den

provisorischen Anbau der Antennen, da eine Kalibrierung der Empfänger nur an Land erfolgen kann. Die Linie des Trimble SPS361 verläuft etwas unruhiger als beim Octans. Der Low Cost Sensor TCM2 zeigt Tendenzen an, ist aber sprunghaft. Durch die geringe Messfrequenz von 5 Hz und der hohen Bewegungsfrequenz ist es möglich, dass vom TCM2 nicht alle Bewegungen erfasst werden. Als optimale Abtastrate wird in [19-Pohlmann] eine Frequenz von 10 Hz angegeben. Niedrigere Frequenzen bergen die Gefahr, dass kurzperiodische Bewegungen nicht erfasst werden. Die Daten des Low-Cost-Sensors TCM2 sollten nur zum Vergleich dienen und werden nicht weiter ausgewertet.

### Rollwinkel mit und gegen die Welle

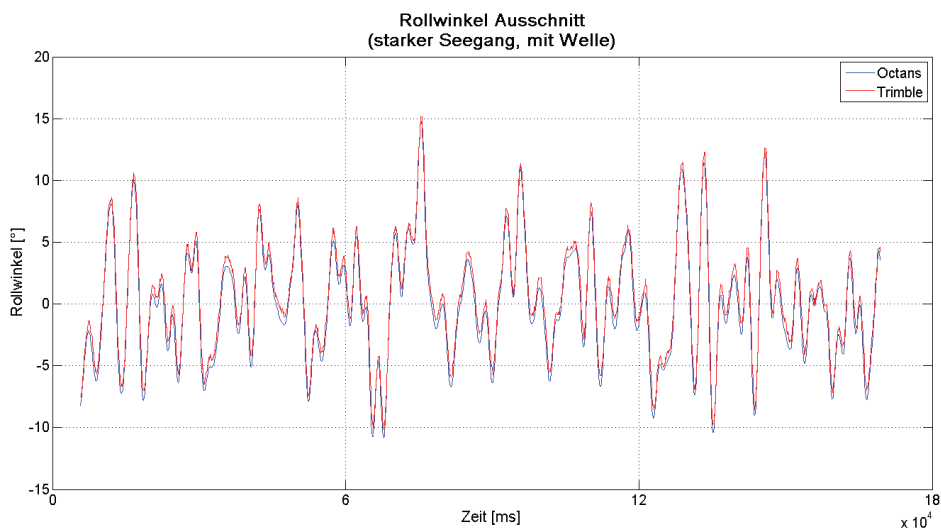


Abb. 52: Rollwinkel bei starkem Seegang, mit der Welle (Linie 2), ca. 3 min

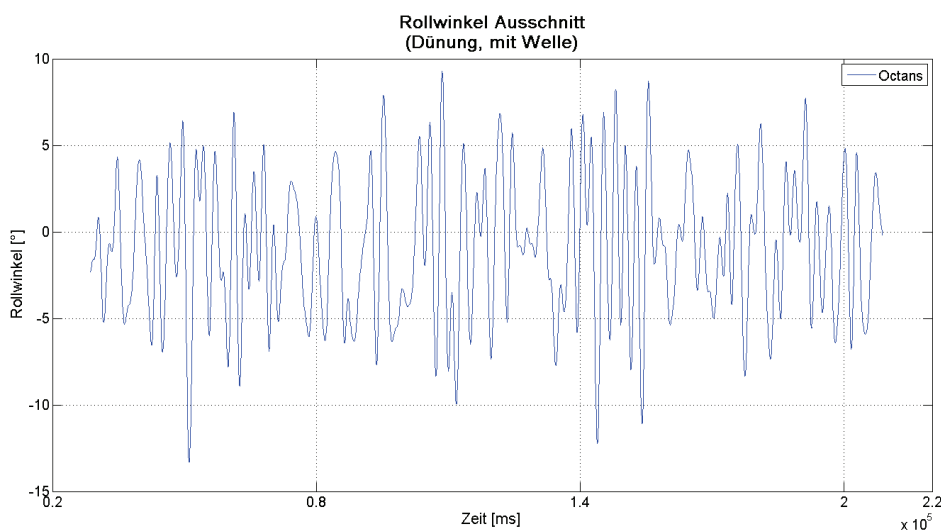
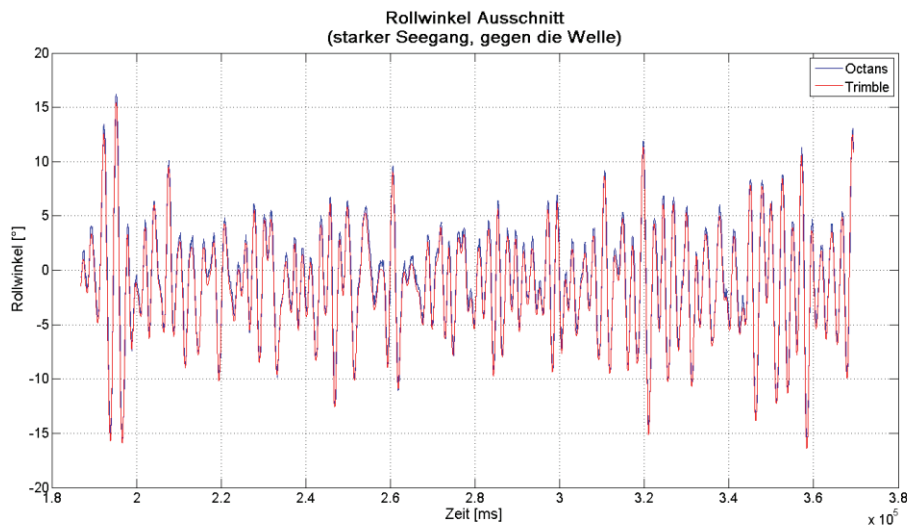
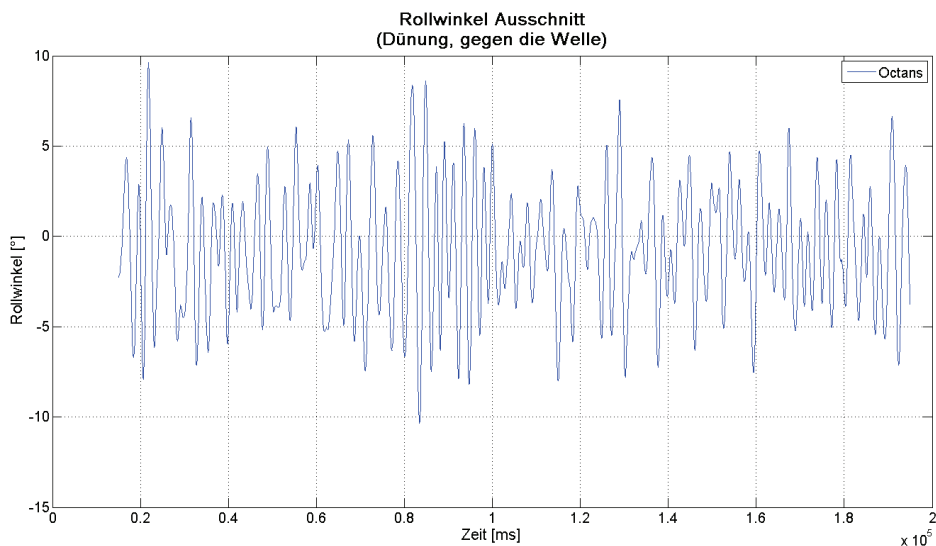


Abb. 53: Rollwinkel bei Dünung, mit der Welle, ca. 3 min





**Abb. 54: Rollwinkel bei starkem Seegang, gegen die Welle (Linie 3), ca. 3 min**



**Abb. 55: Rollwinkel bei Dünung, gegen die Welle, ca. 3 min**

In Abb. 53 und Abb. 55 sind nur die Rollwinkel des Octans zu sehen, da bei Dünung das Vergleichssystem (Trimble SPS361) nicht mehr zur Verfügung stand. In den Abbildungen ist zu sehen, dass die Rollwinkel bei Dünung (Abb. 53 u. Abb. 55) und bei starkem Seegang bei ca.  $\pm 5^\circ$  liegen. Bei Dünung rollt das Boot jedoch gleichmäßiger um die Längsachse als bei starkem Seegang. Bei starkem Seegang sind bei Fahrt mit der Welle kleine Spitzen zu erkennen (Abb. 52). Diese entstehen wahrscheinlich dadurch, dass die Wellen aus unterschiedlichen Richtungen auf das Boot treffen. Somit sind die Rollwinkel kleiner als bei Dünung. Bei langperiodischen Wellen kann sich das Boot stärker um die Rollachse bewegen. Größere Rollwinkel sollten für die Tiefenmessung unbedingt als Korrekturen angebracht werden. Fahrten mit der Welle erfordern außerdem stärkere Ruderbewegungen. Insgesamt ist zu sagen, dass bei starkem

Seegang mit und gegen die Welle die Rollwinkel der getesteten Systeme bis auf kleine Differenzen gut zusammenpassen (Abb. 56). Die Abbildung zeigt die Differenzen der 5 Profilfahrten (mit und gegen die Welle). Sie liegen im Mittel bei  $0,7^\circ$ .

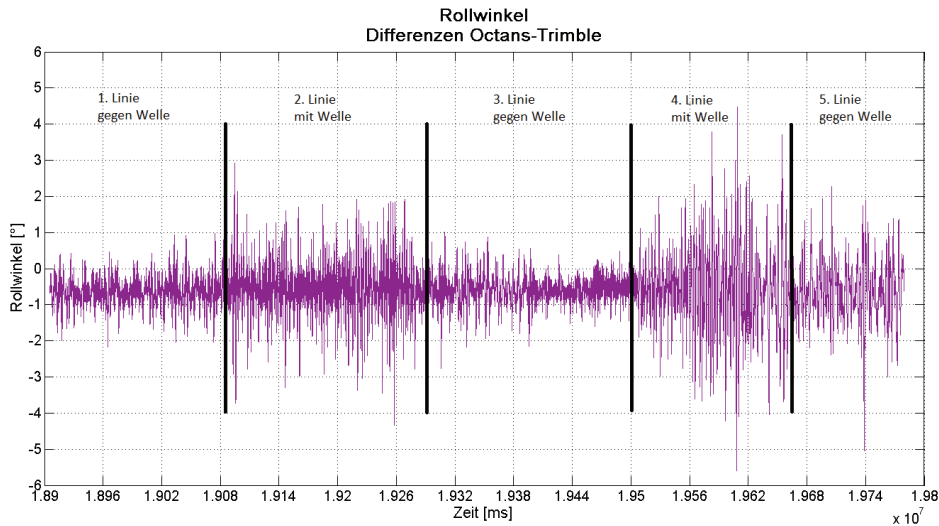


Abb. 56: Differenzen Octans Trimble

### Auswirkung des Rollwinkels auf die Tiefe

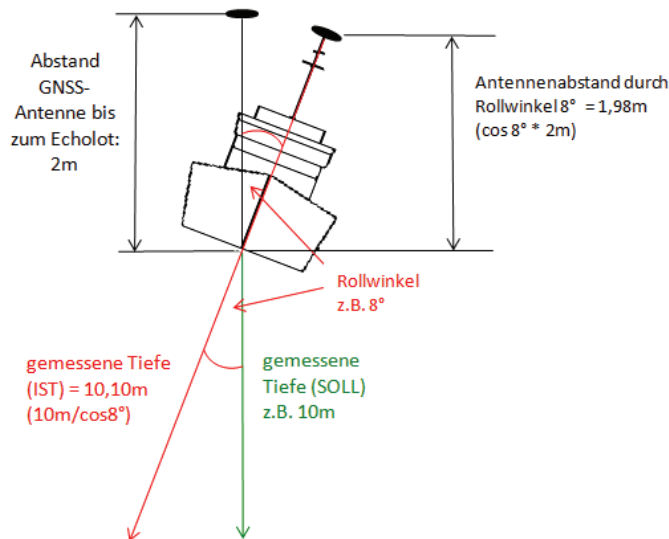


Abb. 57: Auswirkung des Rollwinkels auf die Tiefe

Das Echolot hat einen Öffnungswinkel von  $8^\circ$ . Das heißt, dass das Boot sich bis zu  $4^\circ$  nach Back- oder Steuerbord neigen kann, ohne dass vom Echolot eine fehlerhafte Tiefe gemessen wird. Bei größeren Rollwinkeln werden die Positionen der Einzelbeams, sowie die Messwerte für die Wassertiefen verfälscht (Abb. 57). Die gemessenen Tiefen sollten durch die vom Octans bestimmten Rollwinkel berichtigt werden, wenn der

Rollwinkel den halben Öffnungswinkel ( $4^\circ$ ) übersteigt. Beim Stampfen des Bootes treten ähnliche Fehler auf, aber in kleineren Größenordnungen. Eine gemessene Wassertiefe von 10 m wird durch einen Rollwinkel von  $8^\circ$  um 10 cm verfälscht.

Die Tabelle 6 zeigt die, durch den Rollwinkel entstehenden, Tiefenfehler in Abhängigkeit von der Wassertiefe. Für die Angaben in der Tabelle wurde der halbe Öffnungswinkel bereits berücksichtigt.

Roll- winkel [°]	Tiefe [m]									
	2,00	5,00	7,50	10,00	12,50	15,00	17,50	20,00	22,50	25,00
1	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
2	0,01	0,03	0,04	0,06	0,07	0,08	0,10	0,11	0,12	0,14
3	0,02	0,04	0,06	0,08	0,09	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19
4	0,02	0,05	0,07	0,10	0,12	0,15	0,17	0,20	0,22	0,25
5	0,02	0,06	0,09	0,12	0,16	0,19	0,22	0,25	0,28	0,31
6	0,03	0,08	0,12	0,15	0,19	0,23	0,27	0,31	0,35	0,39
7	0,04	0,09	0,14	0,19	0,23	0,28	0,33	0,37	0,42	0,47
8	0,04	0,11	0,17	0,22	0,28	0,34	0,39	0,45	0,50	0,56
9	0,05	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,53	0,59	0,66
10	0,06	0,15	0,23	0,31	0,38	0,46	0,54	0,61	0,69	0,77

Tabelle 6: Auswirkung des Rollwinkels, resultierende Differenzen in [m]

### 10.1.3 Stampfwinkel

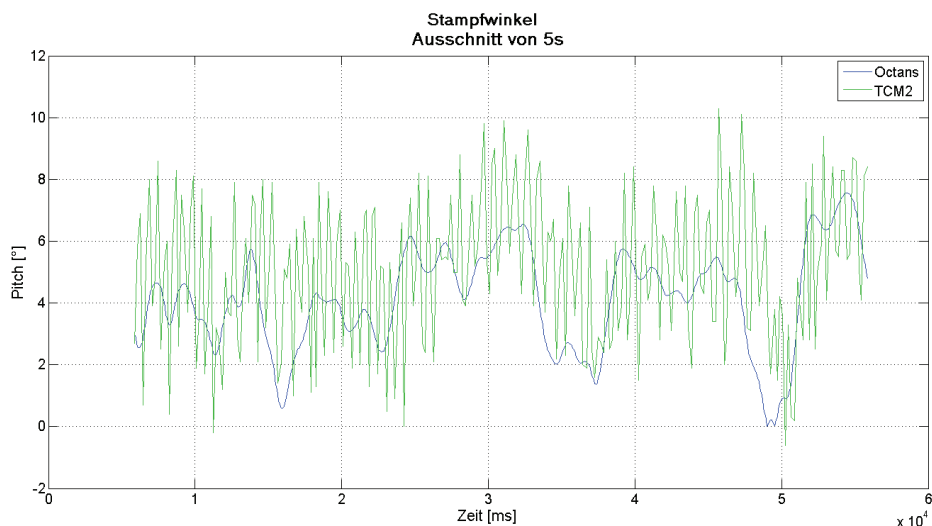


Abb. 58: Stampfwinkel, Ausschnitt 5 s

Die Stampfwinkel werden, wie die Rollwinkel, als Korrekturen bei der Messung der Höhenänderungen mit PDGNSS angebracht. Die Stampfwinkel wurden in der Abb. 58

vom Octans III und TCM2 verglichen. Grundsätzlich sind die Winkel beim Stampfen des Bootes kleiner als beim Rollen. Durch die Trimmung des Bootes und dem Squatverhalten liegen sie überwiegend im positiven Bereich.

Der TCM2 hat, wie beim Rollwinkel auch, wieder viele Ausschläge. Mit dem Trimble SPS361 kann ebenfalls das Stampfen des Bootes bestimmt werden, wenn die Antennen nicht quer zur Fahrtrichtung aufgebaut sind, sondern längs in Schiffsrichtung (mittig). Aufgrund der längeren Basis zwischen den beiden Antennen kann der Stampfwinkel dann sogar genauer als der Rollwinkel bestimmt werden (siehe Kapitel 7.3). Die Ermittlung des Stampfwinkels wurde nicht durchgeführt, da die Bestimmung des Rollwinkel für die Hydrographie eine größere Bedeutung hat (Kapitel 5.1).

#### 10.1.4 Kurs

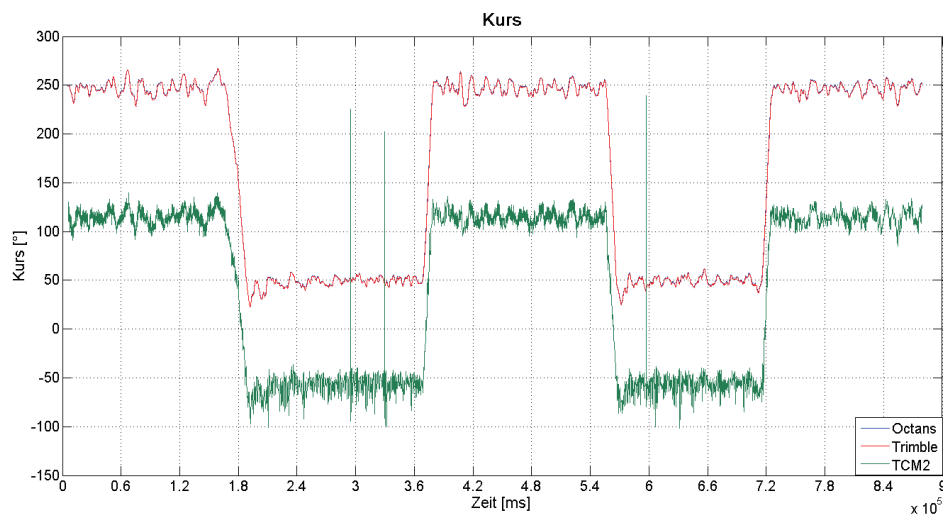


Abb. 59: Kurs (5 Profillinien)

Beim Kurs wird zwischen „rechtweisender Kurs“ und „Kurs über Grund“ unterschieden. Von Inertialsystemen wird der rechtweisende Kurs, auch „heading“ genannt, bestimmt. Dieser gibt die Richtung der Schiffslängsachse an. Mit GNSS-Mehrantennensystemen kann ebenfalls der rechtweisende Kurs bestimmt werden. Mit einer GNSS-Antenne kann nur der Kurs über Grund bestimmt werden. In der Abb. 59 ist jeweils der rechtweisende Kurs vom Octans III, Trimble SPS361 und TCM2 bei starkem Seegang, über fünf Profillinien einer Messung zu sehen. Die Linien vom Octans III und Trimble SPS361 liegen fast übereinander. Der Trimble Empfänger bildet etwas größere Ausschläge ab. Der TCM2 hat einen Offset von ca. 130°, Ausreißer und deutlich größere Ausschläge, als die anderen beiden Sensoren. Wobei bei dem TCM2 wieder die niedrigere Messfrequenz und die Ablenkung durch das Magnetfeld des

Schiffes beachtet werden sollte. Der Offset des TCM2 ergibt sich daraus, dass der Sensor nicht kompensiert wurde. Des Weiteren sind die Fahrten mit Welle und gegen Welle bei allen 3 Sensoren gut zu erkennen. Wenn der Kurs nur zur Orientierung für den Bootsführer genutzt wird, würde die Kursbestimmung mit dem Trimble SPS361 vollkommen ausreichen. Wird der Kurs jedoch für Fächerecholotmessungen genutzt, so muss er sehr genau bestimmt werden. Bei 8facher Überdeckung wirkt sich ein Kursfehler von  $0,1^\circ$  bei 10 m Wassertiefe bereits mit einem Lagefehler von 7 cm aus. Die Kurs-, Roll- und Stampfwinkel des Octans III sowie des Trimble SPS361 werden in den folgenden Messfahrten weiter untersucht.

## 10.2 Weitere Messfahrten

### 10.2.1 Spirale

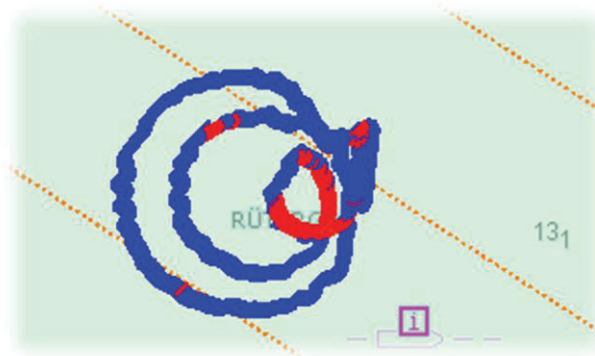
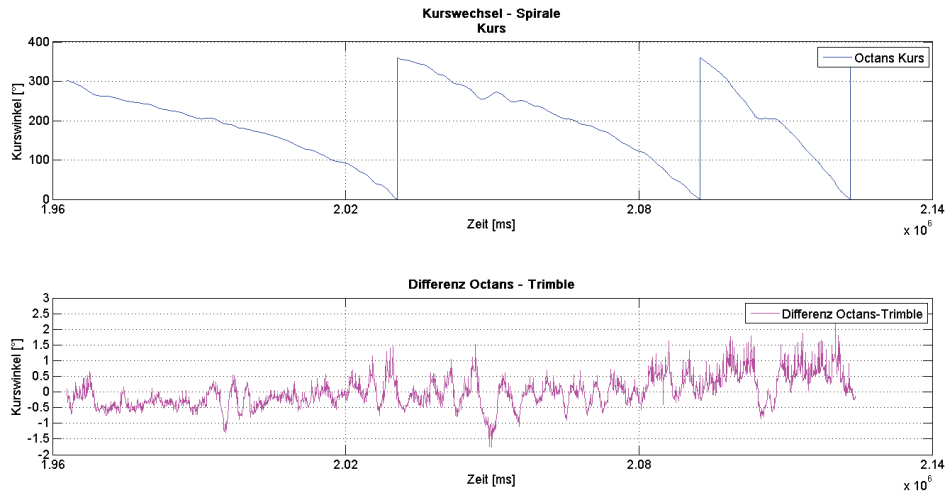


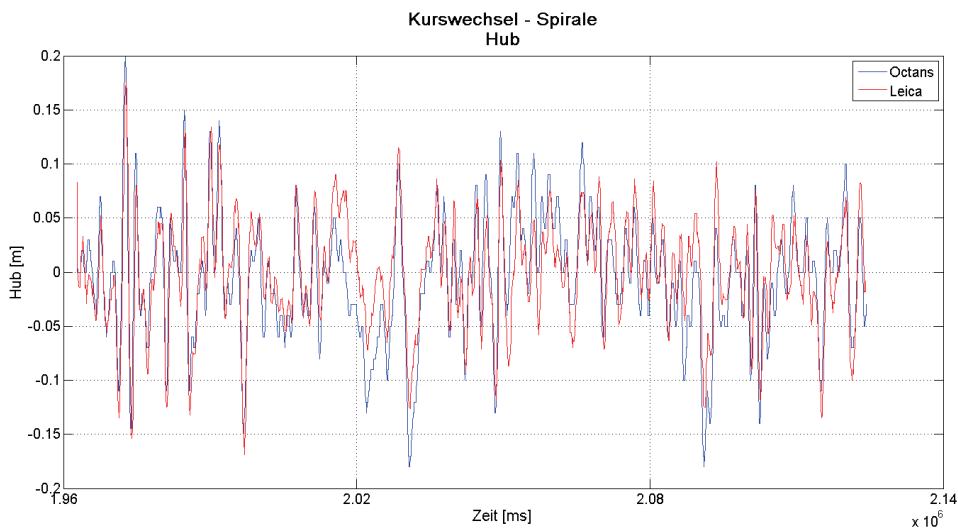
Abb. 60: Fahrtlinie – Spirale

Mit der Spiralfahrt wurde getestet, wie sich der Octans unter gleichmäßigen Kurswechseln verhält. Inertiale Navigationssysteme reagieren empfindlich auf Kurswechsel und benötigen eine Regenerationszeit. So ein Verhalten zeigten auch die vorher in den Booten eingesetzten Sensoren. Gerade in den kleinen Vermessungsbooten kommen Kursänderungen häufiger vor als auf den großen Schiffen. In der Abb. 60 ist die Fahrtlinie der Spirale, mit gleichmäßigen Kurswechseln zu sehen. Die Spirale hat einen Anfangsdurchmesser von ca. 110m und wurde mit einer Geschwindigkeit von 6-8 kn gefahren. Bei konstanter Geschwindigkeit wurde mit abnehmendem Durchmesser der Kurswinkel zunehmend kleiner. Dies zeigt auch die Abb. 61. Im unteren Teil der Abb. 61 sind die Differenzen zwischen dem Octans III und dem Trimble SPS361 dargestellt. Mit schnell kleiner werdendem Kurs werden die Differenzen der Kurswinkel zwischen Octans und Trimble größer. Dies könnte darauf hinweisen, dass ein System „nachhinkt“ oder dass zu starke Rollwinkel z.B. als Kurswinkel interpretiert werden. Die Hubwerte in Abb. 62 sind unauffällig. Die

Differenzen liegen bei ca.  $\pm 5$  cm. In Abb. 63 zeigen sich bei großen Rollwinkeln große Differenzen. Im Mittel liegen die Differenzen zwischen den Rollwinkeln bei  $0,2^\circ$ .



**Abb. 61: Kurs und Differenzen – Spiralfahrt**



**Abb. 62: Hub – Spiralfahrt**

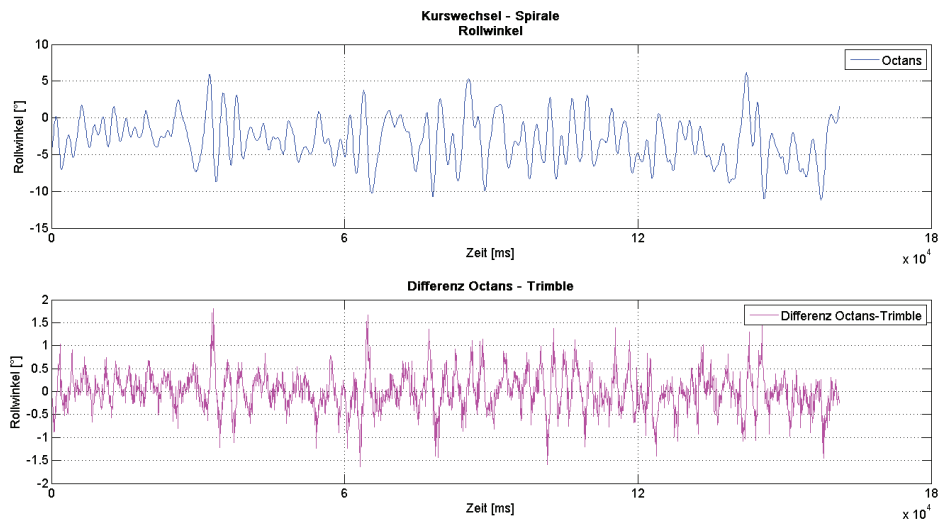


Abb. 63: Rollwinkel – Spiralfahrt

## 10.2.2 Nikolaushaus

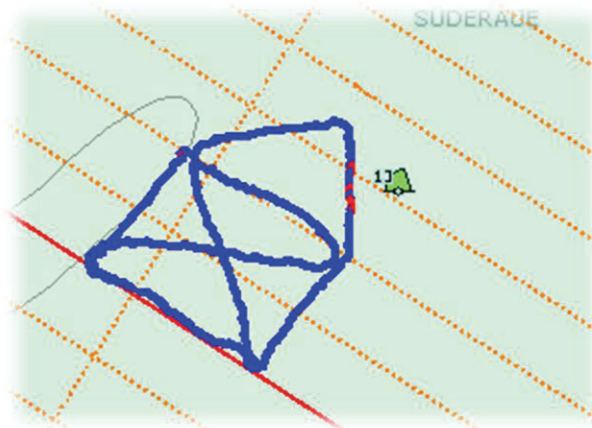


Abb. 64: Fahrtlinie – Nikolaushaus

Die Fahrt des Nikolaushauses wurde ebenfalls durchgeführt, um das Verhalten bei Kurswechseln zu testen. Die Abb. 64 zeigt die Fahrt des Nikolaushauses. Das Haus hat eine „Höhe“ von ca. 350 m. Hier waren Kurswechsel mit anschließenden Geradeausfahrten erforderlich. Dies ist auch bei den Kurswinkeln in Abb. 65 zu erkennen. Bei starken Kurswechseln sind auch die Differenzen deutlich größer als während der Geradeausfahrt. Beim Hub liegen die Differenzen in einem normalen Bereich zwischen 5 und 10 cm. Auffällig ist aber, dass die Linie der Leica-Hubwerte, abwechselnd über und unter den Werten des Octans verläuft (Abb. 66). Größere Abweichungen bei stärkeren Ruderbewegungen sind ebenfalls zu erkennen. Die Auswertung der Rollwinkel (Abb. 67) zeigt dasselbe Verhalten wie bei der Spiralfahrt. Bei größeren Rollwinkeln sind ebenfalls wieder größere Differenzen erkennbar.

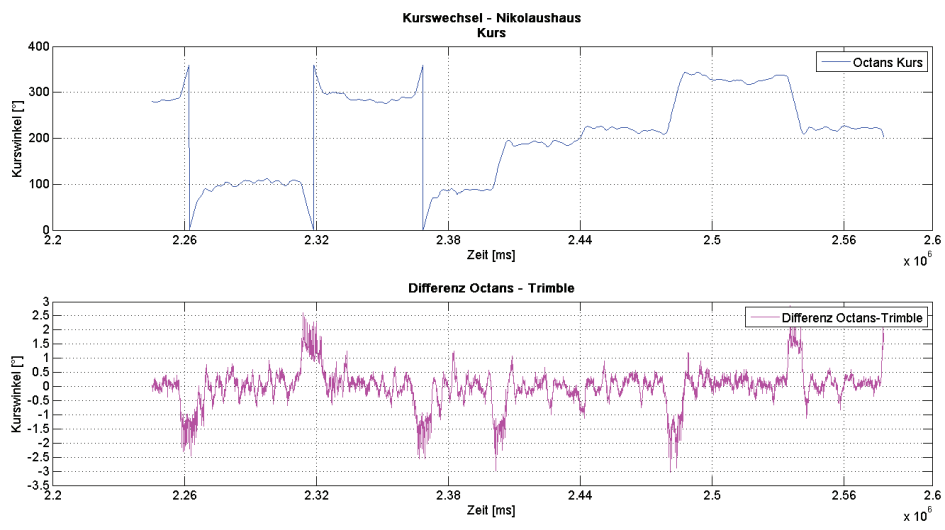


Abb. 65: Kurs und Differenzen – Nikolaushaus

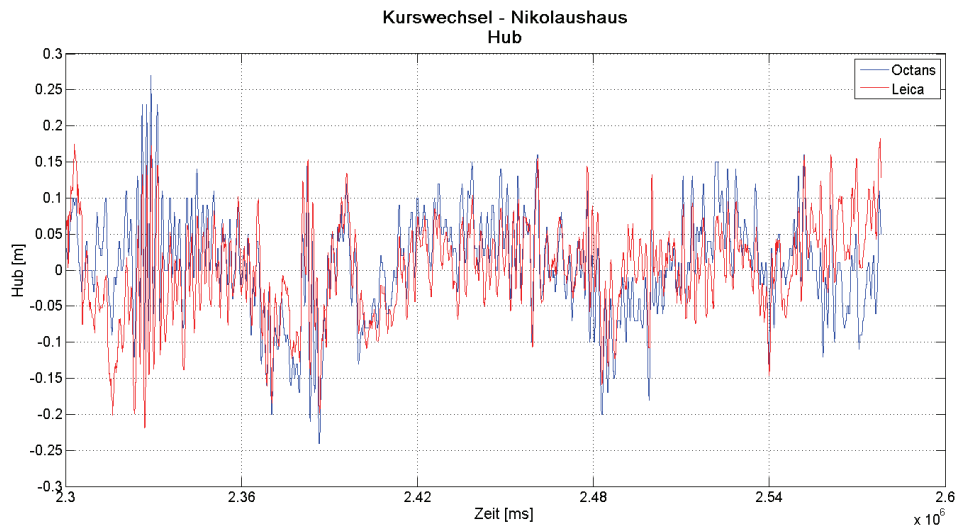


Abb. 66: Hub – Nikolaushaus



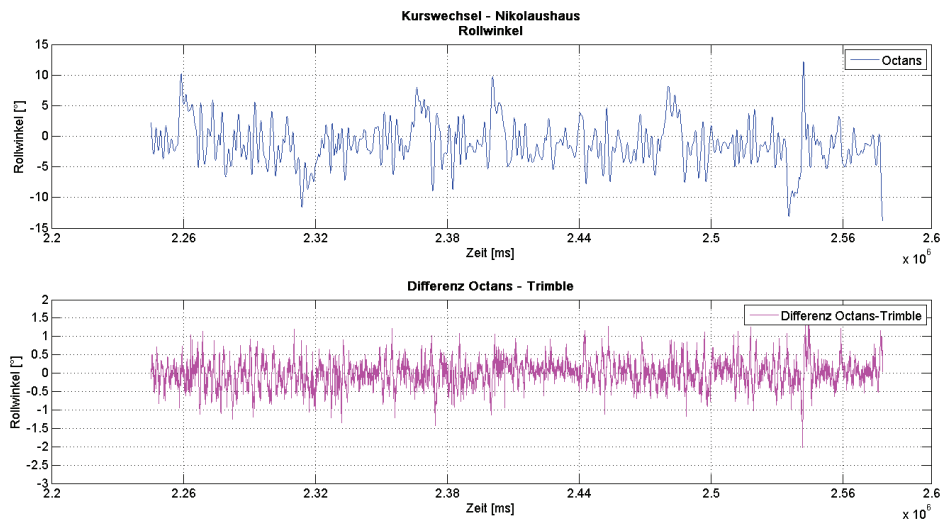


Abb. 67: Rollwinkel – Nikolaushaus

### 10.2.3 Geschwindigkeitswechsel

Positive oder negative Beschleunigungen führten in der Vergangenheit genauso wie Kurswechsel zu unbrauchbaren Korrekturen. Aus diesem Grund wurde eine Linie mit Geschwindigkeitswechsel gefahren. Die Fahrt bestand aus dem wiederholten Beschleunigen, auf etwa 15 kn, mit anschließendem Aufstoppen. In der Auswertung der Hubdaten fällt wieder auf, dass die Leica-Werte beim Beschleunigen der Fahrt immer unter denen des Octans liegen. Beim Aufstoppen der Fahrt ist es genau umgekehrt (Abb. 69). Dennoch erfolgt die Hubbestimmung hinreichend genau mit Differenzen von 5-10 cm. Bei den Kurswinkeln (Abb. 68) sowie bei den Rollwinkeln (Abb. 70) zeigen sich bei großen Änderungen, größere Differenzen. Die Differenzen der Rollwinkel haben einen Mittelwert von  $0,1^\circ$ . Bei größeren Änderungen liegen die Abweichungen bei  $0,5^\circ$ - $1^\circ$ . Der Mittelwert der Kursdifferenzen liegt bei  $1,9^\circ$ .

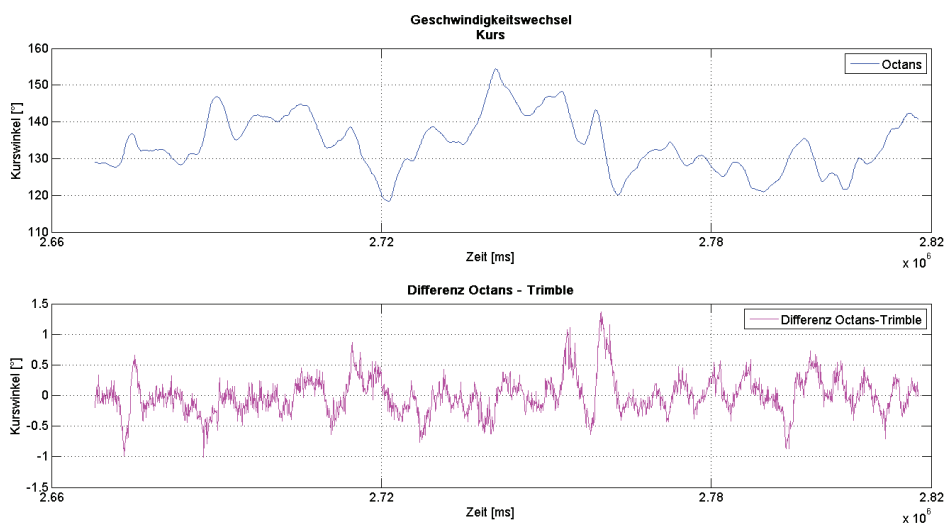
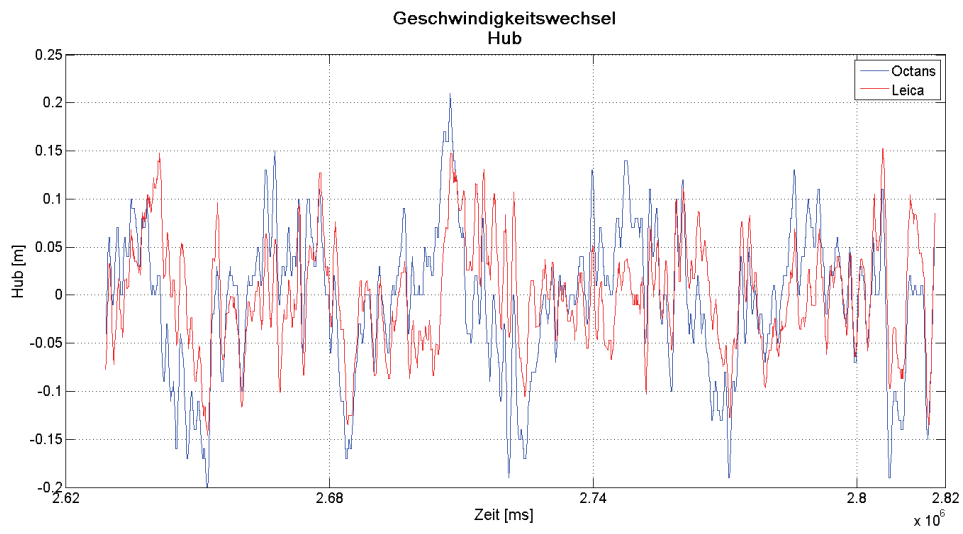


Abb. 68: Kurs und Differenzen - Geschwindigkeitswechsel



**Abb. 69: Hub - Geschwindigkeitswechsel**



**Abb. 70: Rollwinkel - Geschwindigkeitswechsel**

### 10.2.4 Dünung – Fahrt mit der Welle

Inertiale Sensoren benötigen eine gewisse Dynamik, um auch kleinste Bewegungen zu erfassen. Bei langer Dünung, mit relativ geringer Wellenhöhe und bei Fahrt mit der Welle, wird das Boot von hinten nur ganz langsam angehoben. Mit der Fahrt bei Dünung soll getestet werden, ob der Octans diese Bewegungen wahrnimmt.

Vor der Fahrt wurde das Boot ca. 2 min, ohne Ruderbewegungen, treiben gelassen, um ein Bild der Dünung zu erhalten (Abb. 71). In 60 s wurde das Boot ca. 10mal durch eine Welle angehoben, wobei der Hub dabei ungefähr 60 cm beträgt. Demzufolge ist die Dünung schwach und langperiodisch.

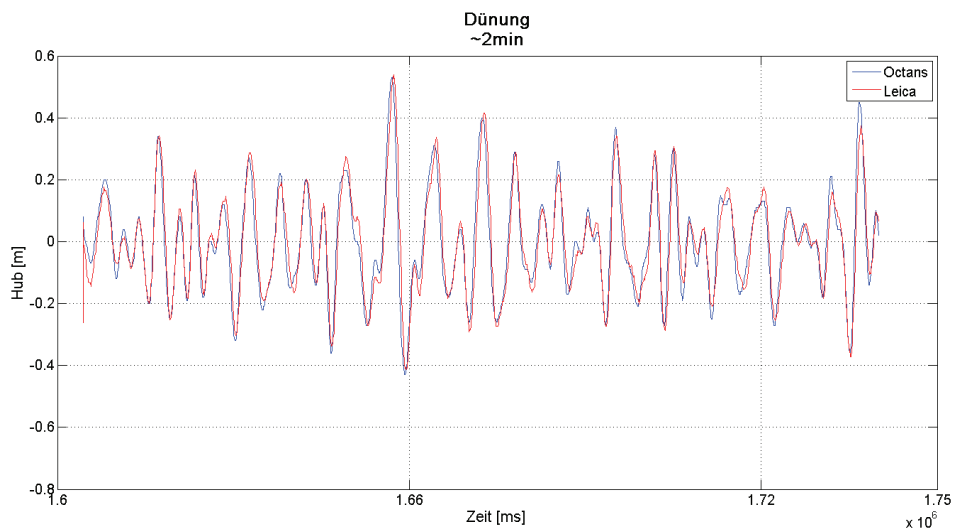
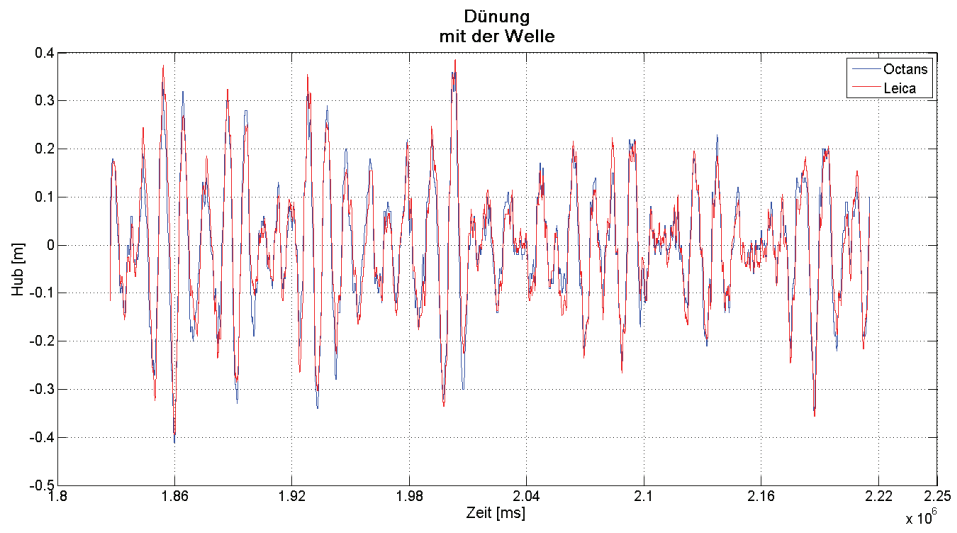


Abb. 71: Dünung, ohne Fahrteinflüsse

Für den Rollwinkel beträgt die Standardabweichung zwischen dem Octans III und Trimble SPS361  $0,69^\circ$ . Der Trimble SPS361 wurde jedoch nicht auf seine exakte Lage eingemessen, wodurch ein Offset entsteht.

Die Linienlänge in Abb. 72 beträgt etwa 1 km. Die Linie wurde mit achterlicher See gefahren. Der Octans scheint alle Bewegungen, die vom Leica GNS-System erfasst werden, ebenfalls gut zu erfassen. In den einzelnen Peaks ist zu erkennen, dass die Hubwerte des Octans im Gegensatz zum Leica häufig etwas überhöht sind (Abb. 72). Dies kann damit zusammenhängen, dass durch die unterschiedlichen Aufzeichnungsraten das Signal des Leica-Empfängers nicht korrekt aufgelöst wird. [E-Mail Arne Hoof, Ixsea, vom 8.08.2011]



**Abb. 72: Fahrt bei Dünung, mit der Welle**

## 11. Zusammenfassung

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Genauigkeit der Tiefenmessung sich auch in kleinen Vermessungsbooten durch den Einsatz von Bewegungssensoren verbessern lässt. Vor allem in tiefen Gewässern ist der Einsatz von Bewegungssensoren von hoher Bedeutung, da sich die Roll- und Stampfbewegungen in Abhängigkeit der Tiefe umso stärker auswirken. Nach den Berechnungen in Tabelle 6 ist es notwendig die Bewegungen des Schiffes zu korrigieren. Vor allem wenn:

- *keine GNSS-Signale zur Verfügung stehen und die Gezeitenbeschickung mit Hilfe von Wasserstandserrechnungskarten durchgeführt wird.*

Für eine Beschickung mit WEK ist in erster Linie die Bestimmung der Hubbewegungen nötig. Bei allen Testmessungen auf See lieferte der Octans, unter den verschiedensten Seegangsverhältnissen, hinreichend genaue Hubdaten. Er arbeitet also nicht nur auf den großen Schiffen ohne größere Probleme, sondern auch auf den kleinen Booten. Die Bestimmung der Hubdaten zeigte im Vergleich zum Leica GNS-System gute Ergebnisse. Bei starkem Seegang gab es maximale Abweichungen von ca. 10 – 20 cm. Messungen bei starkem Seegang finden im Normalfall nicht statt. Bei besseren Verhältnissen zeigten sich auch höhere Genauigkeiten. Bei Dünung lagen die Abweichungen bei maximal ca. 10 cm. Der Hub des Octans wird ausreichend sicher bestimmt und kann somit für eine Beschickung über WEK genutzt werden.

- *die Höhenänderungen mit PDGNSS gemessen und die Roll- und Stampfbewegungen nur zur Reduktion angebracht werden.*

Für eine Beschickung über GNSS werden die Hubdaten des Octans nicht zwingend benötigt. Sie dienen hier eher zur Stützung. Bei kleineren Unterbrechungen des Satellitenempfangs kann auf den Hub des Octans zurückgegriffen werden. Da der Octans nur relative Höhenunterschiede misst, ist die Länge der Überbrückung, wegen des Tidenhubs, auf wenige Minuten zu beschränken. Bei GNSS Beschickungen ist es sinnvoll, dass die Roll- und Stampfbewegungen korrigiert werden, da sonst eine ungenaue Tiefenmessung erfolgt (siehe Abb. 57). Die Bestimmung dieser Bewegungen erfolgt durch den Octans. Zum Vergleich diente für die Testmessungen ein Trimble SPS361. Beide Systeme zeigten unter den verschiedenen Seegangsverhältnissen ausreichend gute Ergebnisse.

Auf welche Weise die Roll- und Stampfbewegungen der Boote bestimmt werden, ist eine Frage der Genauigkeitsanforderungen, aber auch der Kosten. Die Anschaffungskosten des Octans betragen ca. 60.000€.

Wenn die Höhenänderungen über PDGNSS gemessen werden, ist in Anbetracht der Kosten zur Bestimmung der Roll- und Stampfbewegungen der Trimble SPS361 eine gute Alternative. Mit einem zweiten System könnten beide Winkel (Roll- und Stampfwinkel) ermittelt werden. Die Kosten belaufen sich mit zwei Systemen auf ca. 8.000€.

Zwischen den beiden Systemen wurde unter 9.2.4 eine Standardabweichung von  $0,69^\circ$  ermittelt. Bei einer genauen Positionsbestimmung des Trimble SPS361 könnte die Standardabweichung verringert werden.

Die vorher in den Booten eingesetzten Bewegungssensoren hatten vor allem Probleme beim Beschleunigen und Aufstoppen der Fahrt. Daraus entstanden lange Abklingzeiten bis die Sensoren wieder in ihren vorgegebenen Genauigkeiten arbeiteten. [14, 19]

Die Messfahrten mit Kurs- und Geschwindigkeitswechsel sowie die Fahrt mit Dünung von achtern zeigten weder auffällige Hubsprünge noch lange Abklingzeiten.

In der Auswertung der Spiralfahrt (Abb. 61) wurde allerdings festgestellt, dass mit schnell kleiner werdendem Kurs (bedingt durch den kleiner werdenden Durchmesser der Spirale) ein Ansteigen der Differenzen zwischen Octans und Trimble erfolgt. Dies könnte auf ein „nachhinken“ eines Systems hinweisen und sollte genauer untersucht werden.

Weiterhin wurde festgestellt, dass beim Geschwindigkeitswechsel die Hubwerte in Abhängigkeit von der Beschleunigung höher oder niedriger angezeigt werden. Die Hubwerte des Leica GNS-Systems liegen beim Beschleunigen der Fahrt unter den Hubwerten des Octans. Beim Aufstoppen der Fahrt verhalten sich die Hubwerte genau umgekehrt. Hier kommt der Squat-Effekt zum Tragen. Die unterschiedliche Trimmung führt dazu, dass horizontale Beschleunigungen als Hub interpretiert werden.

Des Weiteren sind in den Labormessungen Abweichungen von den Driftgenauigkeiten festgestellt worden. Die Herstellerangabe von  $0,05^\circ/h$  wird in der Langzeitmessung teilweise leicht überschritten. Die Messungen unter Bewegungseinflüssen zeigen etwas höhere Abweichungen. Der Kurswinkel stieg innerhalb von 12 min um  $0,07^\circ$  an. Hier ist zu erwähnen, dass im Datenblatt des Octans eine Einschwingzeit von einer Minute angegeben wird. Große Schwankungen in der ersten Minute sind in den Daten jedoch nicht zu erkennen. Darüber hinaus ist der provisorische Messungsaufbau auf dem Drei-Achsen-Drehtisch kritisch zu betrachten.

Die Testmessungen fanden größtenteils unter Extrembedingungen statt. Messungen bei starkem Seegang, Fahrten einer Spirale bzw. eines Nikolaushauses oder Geschwindigkeitswechsel werden in der Seevermessung normalerweise nicht durchgeführt. Hier werden vorwiegend Linienprofile in entsprechenden Abständen,

mit konstanter Geschwindigkeit gefahren. Kurswechsel finden nur an den Profilenden statt, um die nächste Linie im Gegenkurs zu fahren. Die Kurvenfahrt sollte jedoch vor Beginn der nächsten Linie beendet sein, um eventuelle Schwankungen in den Hubwerten zu vermeiden. Die Fahrten z.B. bei Dünung zeigten gute Ergebnisse mit Abweichungen von ca. 5-10 cm im Hub. Es ist also davon auszugehen, dass die Ergebnisse in der Praxis durch den Einsatz des Octans verbessert werden.

Insgesamt ist der Octans ein System, welches die dynamischen Bewegungen, auf kleinen Schiffen, mit ausreichender Genauigkeit erfasst. Die Hub-, Roll- und Stampfbewegungen werden unabhängig von den Seegangsverhältnissen ausreichend sicher erfasst. Ein Vorteil des Octans ist, dass die Bestimmung der Roll- und Stampfbewegungen ohne GNSS-Signale erfolgt. Er kann somit nicht nur zur Hubbestimmung bei WEK Beschickungen eingesetzt werden, sondern stützt außerdem das Leica GNS-System bei Ausfällen des Korrekturdatendienstes. Der Einsatz des Octans ist daher zu empfehlen.

## Literaturverzeichnis

- 1 **Böder, Volker** Zur hochpräzisen GPS-Positions- und Lagebestimmung unter besonderer Berücksichtigung mariner Anwendungen, Dissertation im Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Hannover, 2002
- 2 **BSH** [http://www.bsh.de/Vorlagen/ressources/nav\\_de/navigation2.jsp](http://www.bsh.de/Vorlagen/ressources/nav_de/navigation2.jsp) (19.07.11)
- 3 **BSH** Info Komet, [http://www.bsh.de/de/Das\\_BSH/Organisation/Schiffe/index.jsp](http://www.bsh.de/de/Das_BSH/Organisation/Schiffe/index.jsp)
- 4 **BSH** Info LAT - neues Seekartennull, [http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Seevermessung\\_und\\_Wracksuche/Seevermessung/aktu\\_ent.jsp](http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Seevermessung_und_Wracksuche/Seevermessung/aktu_ent.jsp), (19.07.11)
- 5 **Cramer, Dipl.-Ing. Michael** Genauigkeitsuntersuchungen zur GPS/INS-Integration in der Aerophotogrammetrie [Bericht]. - Stuttgart : Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart, 2001
- 6 **Dodel, Hansl; Häuptler, Dieter** Satellitennavigation, Springer Verlag, 2. Auflage.
- 7 **Fabeck Wolf von** Kreiselgeräte. Die verschiedenen Gerätetypen und ihre technischen Anwendungen; Prinzipbedingte Fehler und gerätetechnische Lösungen; Physikalische Grundlagen. 1. Auflage, Würzburg, Vogel-Verlag, 1980
- 8 **Foppe, Karl** Kombination von inertialen und satellitengestützten Beobachtungsverfahren zur ingenieurgeodätischen Überwachung von Brückenbauwerken [Bericht]. - Hannover : Dissertation, Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Hannover, 2001
- 9 **GeneSys Elektronik GmbH** Beschreibung inertialer Sensoren und System, <http://www.genesys-offenburg.de/archiv/iss/iss.htm#Strap-Down-Systeme>, Juli 2000, (20.07.11)
- 10 **Gevatter Hans-Jürgen** Automatisierungstechnik. Band 1, Meß- und Sensortechnik, Berlin, Springer Verlag, 2000
- 11 **Goffinet Patrick** Qualitätssteigerung der Seevermessung und Navigation durch neuartige Beschickungsverfahren, <http://www.ife.unihannover.de/mitarbeiter/seeber/seeber60/goffinet.pdf>, (25.08.11)
- 12 **IXSEA** Octans, [http://www.ixsea.com/en/navigation\\_motion/1/octans.html](http://www.ixsea.com/en/navigation_motion/1/octans.html), (27.08.11)
- 13 **IXSEA** Octans User Guide, pdf-Dokument, (05.09.11)
- 14 **Klüber, Ulrich** Untersuchung des Motionsensors ATLAS DYNABASE CRU auf den Vermessungsbooten von VS "Komet", Fachbereich Geomatik, Fachhochschule Hamburg, 2000



- 15 **Krebs Norman** Projektarbeit - Entwicklung einer Software für ein Ringlaser-Winkelmessgeber, Technische Universität Ilmenau
- 16 **M. Wolf, G. Liebsch, A. Richter, R. Dietrich, W. Ellmer** Bestimmung von Schiffsbewegungen aus GPS-Messungen, Hydrographentag 2001, Potsdam
- 17 **Neil M. Barbour, William E. Howell** "Inertial navigation system" in AccessScience cMcGraw-Hill Companies, <http://accessscience.com/content/Inertial-navigation-system/342700#S3>, 2008, (21.07.11)
- 18 **PNI Sensor Corporation**, [www.pnicorp.com](http://www.pnicorp.com), (01.09.11)
- 19 **Pohlmann, Martin** Überprüfung der GPS-bestimmten Hubbewegung von Vermessungsschiffen, Diplomarbeit der Fachhochschule Neubrandenburg, Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen, 2002
- 20 **SAPOS** Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung, [www.sapos.de](http://www.sapos.de), (25.07.11)
- 21 **Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin** Gewässeratlas von Berlin. Von der Gewässervermessung zum Gewässeratlas Berlin mit hydrographischem Informationssystem, [www.berlin.de/sen/umwelt/wasser/wasserrecht/pdf/wasseratlas.pdf](http://www.berlin.de/sen/umwelt/wasser/wasserrecht/pdf/wasseratlas.pdf), pdf-Dokument, (25.07.11)
- 22 **Trimble** -[http://www.trimble.com/construction/marine/SPS361\\_SPS461.aspx?dtID=over](http://www.trimble.com/construction/marine/SPS361_SPS461.aspx?dtID=over), zuletzt besucht: (19.07.11)
- 23 **Trimble** User Guide - [http://www.trimble.com/sps361\\_sps461\\_ts.asp?Nav=Collection-64680](http://www.trimble.com/sps361_sps461_ts.asp?Nav=Collection-64680) S.63, (26.07.11)
- 24 **WSV** Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes [Bericht]. - [www.wsv.de](http://www.wsv.de), (17.07.11)
- 25 **Zahalka, Kapt. P.** Squat, Verein Hanseatischer Transportversicherer e.V, pdf-Dokument.
- 26 **Ziegler, Christian** Der Einsatz von Seegangskompensatoren auf den Vermessungsbooten des VS "Komet", Fachhochschule Neubrandenburg, Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen, 2005.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Auslegersystem [24-WSV] .....	10
Abb. 2: Fächerecholot [24-WSV] .....	10
Abb. 3: Schiffsbewegungen .....	11
Abb. 4: Schiffsbewegungen [16-Wolf, Liebsch et.al].....	11
Abb. 5: Reichweite der SAPOS®-Stationen im Küstenbereich der Nordsee [2-Sapos]..	14
Abb. 6: Beschickung über WEK [11-Goffinet].....	15
Abb. 7: Beschickung über GNSS [11-Goffinet].....	16
Abb. 8: Aufbau eines Inertialsystems [8-Foppe] .....	18
Abb. 9: Strapdown-System [13-GeneSys].....	19
Abb. 11: Prinzip Feder-Masse-Systeme [8-Foppe] .....	20
Abb. 12: Prinzip Servo-Systeme [8-Foppe] .....	21
Abb. 10: Prinzip Pendelsystem [8-Foppe] .....	20
Abb. 13: Prinzip Schwingsaiten-Systeme [8-Foppe].....	21
Abb. 14: Aufbau eines faseroptischen Kreisels [10-Gevatter] .....	22
Abb. 15: Aufbau eines Ringlaserkreisels [7-von Fabeck].....	23
Abb. 16: Vermessungsschiff Komet .....	24
Abb. 17: Tochterboot.....	24
Abb. 18: Leica GNSS-Antenne .....	25
Abb. 19: Octans III [9 - IXSEA] .....	26
Abb. 20: Innenansicht Octans III [10 - IXSEA] .....	26
Abb. 21: Antennenaufbau Vermessungsboot .....	27
Abb. 22: Trimble SPS 361 [22] .....	27
Abb. 23: Antennenaufbau.....	27
Abb. 24: TCM2 [18-PNI] .....	28
Abb. 25: Versuchsaufbau .....	30
Abb. 26: NMEA-Telegramm [13] .....	31
Abb. 27: 5 Profillinien .....	31
Abb. 28: Spirale.....	32
Abb. 29: Nikolaushaus .....	32
Abb. 30: Zeitversatz bei starkem Seegang, gegen die Welle.....	33
Abb. 31: Zeitversatz bei starkem Seegang, mit der Welle.....	33
Abb. 32: Aufbau im Labor .....	35
Abb. 33: Datenübertragung.....	35
Abb. 34: Weboberfläche IXSEA.....	36
Abb. 35: Drei-Achsen-Drehtisch .....	37

Abb. 36: Referenzmarke .....	37
Abb. 37: Messungsablauf .....	37
Abb. 38: Langzeitmessung .....	38
Abb. 39: Langzeitmessung .....	38
Abb. 40: Referenzmessung Kurs, Abnahmeprotokoll IXSEA .....	39
Abb. 41: Referenzmessung .....	40
Abb. 42: Referenzmessung Roll, Abnahmeprotokoll IXSEA .....	41
Abb. 43: Hysterese.....	42
Abb. 44: Fehler durch Seegangsbewegungen .....	43
Abb. 45: Berechnung über Cosinussatz .....	44
Abb. 46: Hub (5 Profillinien) .....	45
Abb. 47: Hub bei starkem Seegang, 60 s gegen die Welle .....	45
Abb. 48: Hub bei Dünung, 60 s gegen die Welle .....	46
Abb. 49: Hub bei starkem Seegang, 60 s mit der Welle .....	46
Abb. 50: Hub bei Dünung, 60 s mit der Welle .....	47
Abb. 51: Rollwinkel bei starkem Seegang, Ausschnitt 5 s .....	47
Abb. 52: Rollwinkel bei starkem Seegang, mit der Welle (Linie 2), ca. 3 min .....	48
Abb. 53: Rollwinkel bei Dünung, mit der Welle, ca. 3 min .....	48
Abb. 54: Rollwinkel bei starkem Seegang, gegen die Welle (Linie 3), ca. 3 min .....	49
Abb. 55: Rollwinkel bei Dünung, gegen die Welle, ca. 3 min .....	49
Abb. 56: Differenzen Octans Trimble .....	50
Abb. 57: Auswirkung des Rollwinkels auf die Tiefe .....	50
Abb. 58: Stampfwinkel, Ausschnitt 5 s .....	51
Abb. 59: Kurs (5 Profillinien) .....	52
Abb. 60: Fahrtlinie – Spirale.....	53
Abb. 61: Kurs und Differenzen – Spiralfahrt.....	54
Abb. 62: Hub – Spiralfahrt .....	54
Abb. 63: Rollwinkel – Spiralfahrt .....	55
Abb. 64: Fahrtlinie – Nikolaushaus .....	55
Abb. 65: Kurs und Differenzen – Nikolaushaus .....	56
Abb. 66: Hub – Nikolaushaus.....	56
Abb. 67: Rollwinkel – Nikolaushaus.....	57
Abb. 68: Kurs und Differenzen - Geschwindigkeitswechsel .....	57
Abb. 69: Hub - Geschwindigkeitswechsel.....	58
Abb. 70: Rollwinkel - Geschwindigkeitswechsel.....	58
Abb. 71: Dünung, ohne Fahrteinflüsse .....	59
Abb. 72: Fahrt bei Dünung, mit der Welle.....	60

