

Schifffahrt und Navigation

SHIPS: Eine neue Methode zur effizienten Naturmessung des Schiffs-Squat

Prof. Dr. Alexander Härting

Fachhochschule Oldenburg / Ostfriesland /
Wilhelmshaven

Prof. Dr.-Ing. Jörg Reinking

Fachhochschule Oldenburg / Ostfriesland /
Wilhelmshaven

1 Einleitung

Aktuelle Experimente zur Messung des Squat von Seeschiffen basieren auf der Nutzung von differentiellen kinematischen GPS-Messungen, bei denen die Änderung der ellipsoidischen Höhen zwischen GPS-Empfängern an Bord des Seeschiffes und landfesten Referenzstationen gemessen werden. [1]. Bei den meisten dieser Experimente war es notwendig, die gemessenen Höhen um die Höhenänderungen der ungestörten Wasseroberfläche zu korrigieren. Dazu ist es notwendig, alle verfügbaren Pegelraten heranzuziehen und die Tidewelle so zu modellieren, dass der Wasserstand am Schiffsort zum Messzeitpunkt aus einer räumlich-zeitlichen Interpolation berechnet werden kann. Einige Autoren [2] räumen ein, dass eine Genauigkeit von ca. 6 cm nur erreicht werden kann, wenn für die Messkampagne zusätzliche Pegel ausgelegt werden. Trotzdem ist es zweifelhaft, ob Wasseroberflächentopographie und Windeinfluss vernachlässigbar sind.

In diesem Artikel wird die SHIPS-Methode (SHore Independent Precise Squat observation) zur Naturmessung des Squat von Seeschiffen vorgeschlagen, die den mühsamen und fehleranfälligen Gebrauch von Pegelraten vollständig vermeidet. Daneben bietet die SHIPS-Methode den Vorteil, den Squat unabhängig von landfesten Einrichtungen zu messen. Das Verfahren basiert ebenfalls auf GPS und wird an dieser Stelle ausführlich erläutert. Die SHIPS-Methode wurde in verschiedenen Experimenten auf deutschen Wasserstraßen getestet, die Ergebnisse und Erfahrungen dieser Experimente werden präsentiert und diskutiert.

2 SHIPS-Methode: Das Grundprinzip

Die Grundidee der SHIPS-Methode besteht darin, während der Revierfahrt den Wasserstand am Ort

des zu untersuchenden Seeschiffes durch ein kleineres Begleitboot an Stelle von Pegelmessungen zu repräsentieren (Abb. 1). Das Verfahren nutzt GPS-Trägerphasenmessungen als Instrument zur Messung der Höhenänderungen zwischen dem zu untersuchenden Schiff und dem Begleitboot. An Bord des Seeschiffes werden drei hochgenaue, geodätische GPS-Empfänger möglichst weit voneinander so installiert, dass eine gute Satellitensichtbarkeit gewährleistet ist. Für die meisten Frachtschiffe bedeutet dies, dass zwei GPS-Empfänger an der Backbord- und Steuerbordseite der Brücke und ein Empfänger auf dem Vordeck angebracht werden. Ein vierter GPS-Empfänger wird an Bord des Begleitbootes installiert. Während des Experimentes fährt das Begleitfahrzeug in einer Entfernung von 200 bis 500 m voraus. Dabei werden die Höhendifferenzen der GPS-Antennen an Bord des Seeschiffes relativ zum Begleitfahrzeug gemessen.

Die Positionen der GPS-Antennen an Bord des zu untersuchenden Schiffes werden mit Standard-Messverfahren in das Koordinatensystem des Seeschiffes eingemessen. Für kleine, quasi-statische Änderungen von Trimm und Krängung ist die Annahme gerechtfertigt, dass die Rotationsachsen durch den Wasserlinienschwerpunkt (LCF: longitudinal centre of floatation) verlaufen, der den hydrostatischen Unterlagen des Schiffes entnommen werden kann. Aus den mit GPS gemessenen 3D-Koordinatendifferenzen im lokalen Koordinatensystem können die Höhenänderungen des Referenzpunktes (ergo des LCF) bezogen auf das Begleitboot sowie Roll- und Stampfwinkel berechnet werden. Für Untersuchungen der Kieflfreiheit ist man an dem Punkt der größten Tiefgangszunahme interessiert. Abhängig von der jeweiligen Rumpfform und dem Trimmwinkel liegt dieser Punkt häufig in der Nähe des vorderen Lotes; die Ergebnisse der Messung werden dann als Bug-Squat („bow squat“) bezeichnet.

Der statische Höhenunterschied zwischen dem LCF und der GPS-Antenne an Bord des Begleitbootes, der im Ruhezustand bestimmt wird, was in einem Hafen durchgeführt werden könnte, wird benutzt, um den Null-Punkt der Squat-Skala zu definieren. Werden die beobachteten Höhenänderungen um diese statische Höhendifferenz reduziert, dann ergeben sich die Tiefgangsänderungen für jede Messepoche. Unter der Annahme, dass das Begleitboot die ungestörte Wasseroberfläche beschreibt, werden dadurch Wasserstandsänderungen während des Experimentes eliminiert.

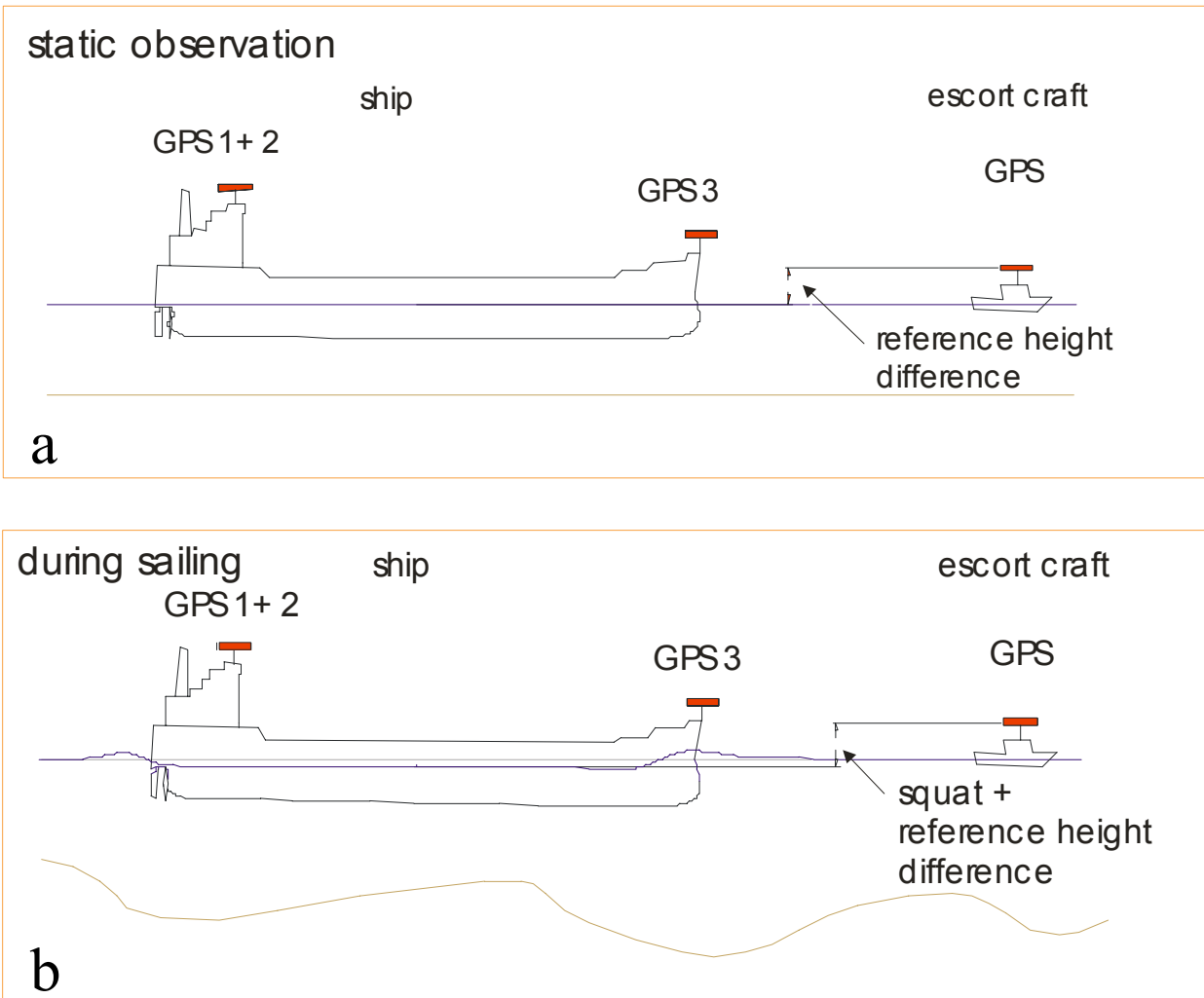


Abb. 1:
Grundidee der SHIPS-Methode: Die Tiefgangsänderung zwischen einem Seeschiff und einem Begleitboot wird mit Hilfe von GPS-Höhenänderungen bestimmt. Messungen im Ruhezustand ergeben den Referenz-Höhenunterschied (a). Die Tiefgangszunahme ergibt sich aus den beobachteten Höhendifferenzen, die um den Referenz-Höhenunterschied reduziert werden (b).

3 Verhalten des Begleitbootes

Die resultierenden Höhenunterschiede sind stark beeinflusst durch das Verhalten des Begleitbootes. Aus verschiedenen Gründen bleibt die Höhe der GPS-Antenne über der ungestörten Wasseroberfläche nicht konstant. Obwohl die Höhenänderungen normalerweise klein sind, ist ihre Kenntnis entscheidend, um aus den rohen Beobachtungen der Höhendifferenzen den Squat des Seeschiffes genau zu bestimmen.

Die Höhenänderung der GPS-Antenne auf dem Begleitboot in Abhängigkeit der Geschwindigkeit kann in einem separaten Kalibrations-Experiment bestimmt werden. Zur Vereinfachung bezeichnen wir diese Höhenänderungen als „squat“ des Begleitbootes, obwohl sie für ein kleineres Boot in Gleitfahrt auch eine Höhenzunahme sein kann und ihr Wert durch systematische Roll- und Stampfbewegungen am Ort der Antenne beeinflusst ist. Für Kalibrationszwecke ist die Information ausreichend, solange die GPS-Antenne während der Begleitfahrt an der selben Position installiert wird. Unter den genannten Voraussetzungen ist die Messung des Squat eines kleineren Bootes mit GPS relativ einfach. Vorzugsweise bei Hoch- oder Niedrigwasser fährt man mit dem Begleitboot in der Nähe einer landfesten Referenzstation mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und führt einige Maschine-Stopp-Manöver aus. Da diese Manöver auf dem kleinen Boot nur wenige Sekunden beanspruchen, lässt sich der Squat-Effekt direkt

aus der Änderung der Antennenhöhe ablesen. Sind ausreichend viele Daten erfasst, dann kann der Squat des Bootes als Funktion der Fahrt-durchs-Wasser mittels einer Approximationsfunktion beschrieben werden. Es sei bemerkt, dass für kleine Boote das Fahrwasser als unbeschränkt angesehen werden kann und die Kalibrationsfunktion ausschließlich von der Fahrt-durchs-Wasser abhängt.

Während die Kalibrationsfunktion den Squat des Begleitbootes korrigieren kann, treten bei der Squat-Messung nicht-stationäre Vertikalbewegungen durch Wellen und Schwell auf. Diese welleninduzierten Hubbewegungen müssen eliminiert werden, um Fehlinterpretationen des Squat zu vermeiden. Eine Möglichkeit der Bestimmung der welleninduzierten Hubbewegungen besteht darin, einen Heave-Roll-Pitch-Sensor einzusetzen, der die Höhenänderungen mittels Beschleunigungs- und Drehratenmessung bestimmt. Unglücklicherweise zeigen diese Sensoren über längere Zeiträume eine systematische Drift, so dass eine digitale Hochpass-Filterung der Daten notwendig ist. Eine alternative, unabhängige Messung der Hubbewegungen wäre wünschenswert, um die gefilterten Daten zu verifizieren. Zu diesem Zweck kann der GPS-Empfänger an Bord des Begleitbootes verwendet werden, auch wenn keine landfeste Referenzstation zur Verfügung steht und die absolute Höhe der GPS-Antenne also unbekannt ist. Die welleninduzierte Höhenänderung kann aus kumulierten und gefilterten Epoche-zu-Epoche-GPS-Phasendifferenzen hergeleitet werden [4].

4 Datenqualität und zusätzliche Korrekturen

Nachdem die in Kapitel 3 beschriebenen Korrekturen für das Verhalten des Begleitbootes angebracht wurden, sind noch einige zusätzlichen Korrekturen zu berücksichtigen.

Die Dichte des Wassers in Ästuarien ändert sich häufig auf Grund der tideabhängigen Änderung des Salzgehaltes und der Temperatur. Daher sollten diese Parameter während des Experimentes bestimmt werden. Daten von existierenden Stationen können mit Proben, die auf dem Begleitboot genommen wurden, verglichen werden. Im Allgemeinen sind die Korrekturen für das Begleitboot vernachlässigbar klein, für das Seeschiff müssen sie allerdings berücksichtigt werden.

Die Wasseroberflächenneigung zwischen dem Begleitboot und dem Seeschiff muss, obwohl klein, beachtet werden. Wenn der Abstand zwischen den

beiden Fahrzeugen klein gehalten werden kann (300-400 m), überschreitet der Höhenunterschied zwischen den Fahrzeugen, abhängig von der Tide, selten 1 cm. Diese kleinen Korrekturen können wahrscheinlich mit ausreichender Genauigkeit aus einer mittleren Tidekurve abgeleitet werden. Bei der Untersuchung der bisher durchgeführten Testmessungen haben wir jedoch zusätzlich interpolierte Pegelablesungen benutzt.

Zur Untersuchung der Geschwindigkeitsabhängigkeit des Squat ist die Geschwindigkeit durchs Wasser der relevante Parameter. Allerdings werden aus GPS-Messungen mit guter Genauigkeit nur Geschwindigkeiten über Grund berechnet. Bisher wurden Kalibrationswerte, die aus einigen 180°-Wendemanövern bei konstanter Maschinendrehzahl in Verbindung mit Stromprofilen aus dem Seehandbuch hergeleitet wurden, zur Korrektur der GPS-Geschwindigkeiten über Grund genutzt. Es wäre wünschenswert, unabhängige Messungen der aktuellen Strömungsverhältnisse zu verwenden, die zumindest auf dem Begleitboot mit einer genauen Logge gemessen werden. Weitere Untersuchungen hierzu müssen noch abhängig von vorhandener Ausrüstung durchgeführt werden.

Die in diesem Artikel vorgestellte Methode stützt sich nicht auf GPS-Messungen im RTK-Modus, da die abgespeicherten rohen Phasendaten eine Untersuchung auf Ausreißer und der Datenqualität sowie die Korrektur verschiedener Effekte ermöglichen. Daneben können welleninduzierte Hubbewegungen nur in der Nachverarbeitung korrekt berechnet werden. Die Speicherrate der Daten sollte möglichst hoch sein, sie hängt aber von der Speicherkapazität der Empfänger ab. Im Allgemeinen verwenden wir ein Speicherintervall von 1 Sekunde. Als die ersten Überlegungen zur SHIPS-Methode entwickelt wurden, war keine kommerzielle Software verfügbar, die die Möglichkeit der Prozessierung von GPS-Trägerphasendaten relativ zu einer bewegten Referenzstation ermöglichte. Daher entwickelten wir eine eigene Software, die den bewegten GPS-Empfänger auf dem Begleitboot als Referenzstation nutzt. Durch die kurze Basislinie zwischen den Empfängern an Bord des Seeschiffes und der bewegten Referenzstation werden die troposphärischen Einflüsse stark reduziert. Ionosphärische Einflüsse werden größtenteils durch die Nutzung von Zweifrequenzempfängern eliminiert. Tests haben gezeigt, dass die mit diesem Programmpaket berechneten Höhendifferenzen eine Qualität von ca. 1 cm haben. Unter Berücksichtigung aller Fehlerquellen ist die erwartbare Genauigkeit des resultierenden Squat besser als 3-4 cm.

5 Testergebnisse

Um die Praktikabilität der SHIPS-Methode und die Qualität der resultierenden Squat-Daten zu untersuchen, wurden verschiedene Experimente durchgeführt.

Die erste Testmessung mit der vorgeschlagenen Methode fand am 30. Oktober und 1. November 1998 auf der Unterweser zwischen Bremerhaven und Bremen statt [5].

Das zu untersuchende Seeschiff war die "MV Pioneer", ein 50.000 t Massengutfrachter mit einem Tiefgang von 10,7 m - dies ist der maximal zugelassene Tiefgang für die Unterweser bis Bremen - mit einer Ladung Erz für die Bremer Stahlwerke. Das Begleitboot war die 12 m-Barkasse „Alk“ des „Schulschiffverein Großherzogin Elisabeth“. Ein Messteam betrat bei der Fahrt weseraufwärts das Seeschiff mit der gesamten Ausrüstung beim Lotsenwechsel bei Geestemünde. Nach der Installation aller Empfänger wurden die Beobachtungen zwischen Weser-km 45 (Dedesdorf) und 10 (Bremer Stahlwerke) ausgeführt (Abb. 2).

schwindigkeit durchs Wasser (speed through water). Allerdings können auch andere Effekte klar identifiziert werden. Zwischen Weser-km 41 und 37 zeigt der Grund der Weser eine wellenartige Struktur mit einer Amplitude von ca. 1-2 m und einer Wellenlänge von ca. 50-100 m. In Verbindung mit diesem Phänomen zeigt der Squat in diesem Bereich Variationen von 10-15 cm. Andererseits treten zwischen km 35 und 31 Squat-Änderungen auf, die nicht durch einen einfachen Zusammenhang zwischen Squat, Geschwindigkeit und Gewässertiefe erklärbar sind. In diesem Bereich ist eine negative Korrelation zwischen kleinen Geschwindigkeitsänderungen und Squat-Änderungen erkennbar. Es stellte sich die Frage, ob dieser Effekt tatsächlich existiert oder ob er auf methodenimmanente Messfehler zurückzuführen ist.

Ein zweites Experiment wurde am 14. Juli 1999 ebenfalls auf der Unterweser durchgeführt. Das zu untersuchende Seeschiff war der PANAMAX-Massengutfrachter „Maersk Taian“ auf der Reise weseraufwärts bis zu den Bremer Stahlwerken mit einem Tiefgang von 10,3 m.

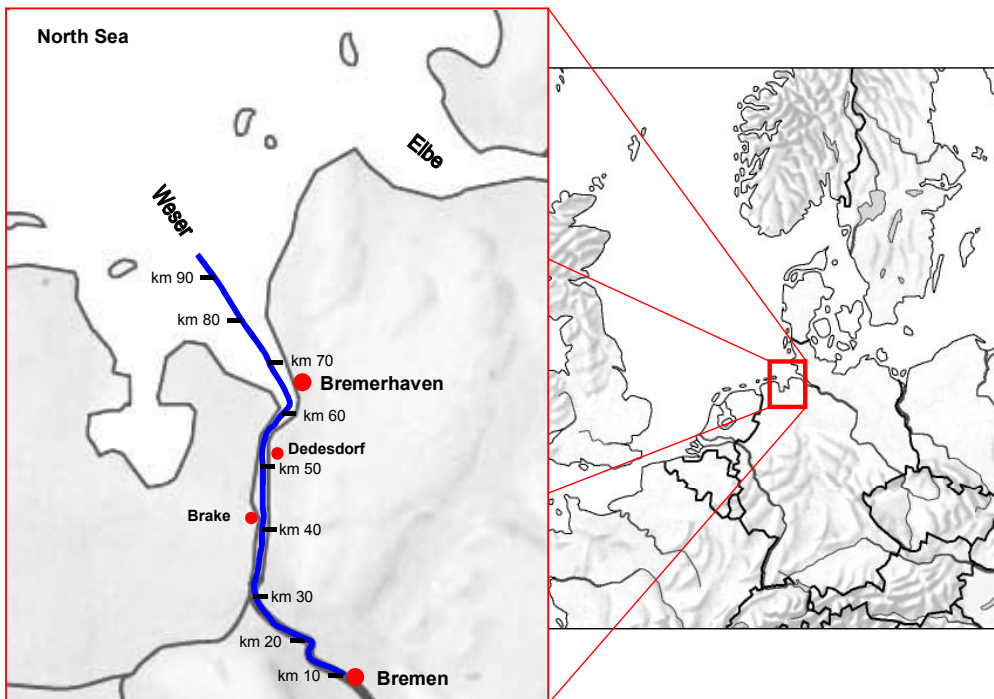


Abb. 2: Karte der Unterweser

Auf Grund technischer Probleme mit dem Begleitboot konnte die tatsächliche Datenaufzeichnung nur bis Weser-km 24 durchgeführt werden. Abb. 3 zeigt den resultierenden Squat für den Abschnitt zwischen km 45 und km 27. Wie vorherzusehen, ist der Squat offensichtlich abhängig von der Ge-

Das Messteam konnte mit den Geräten das Schiff an der Lotsenstation „Weser Pilot“ betreten. Die Beobachtungen wurden zwischen Weser-km 96,9 und 10,3 ausgeführt. Als Begleitboot konnte das Arbeitsboot „Geestemünde“ des WSA Bremerhaven genutzt werden.

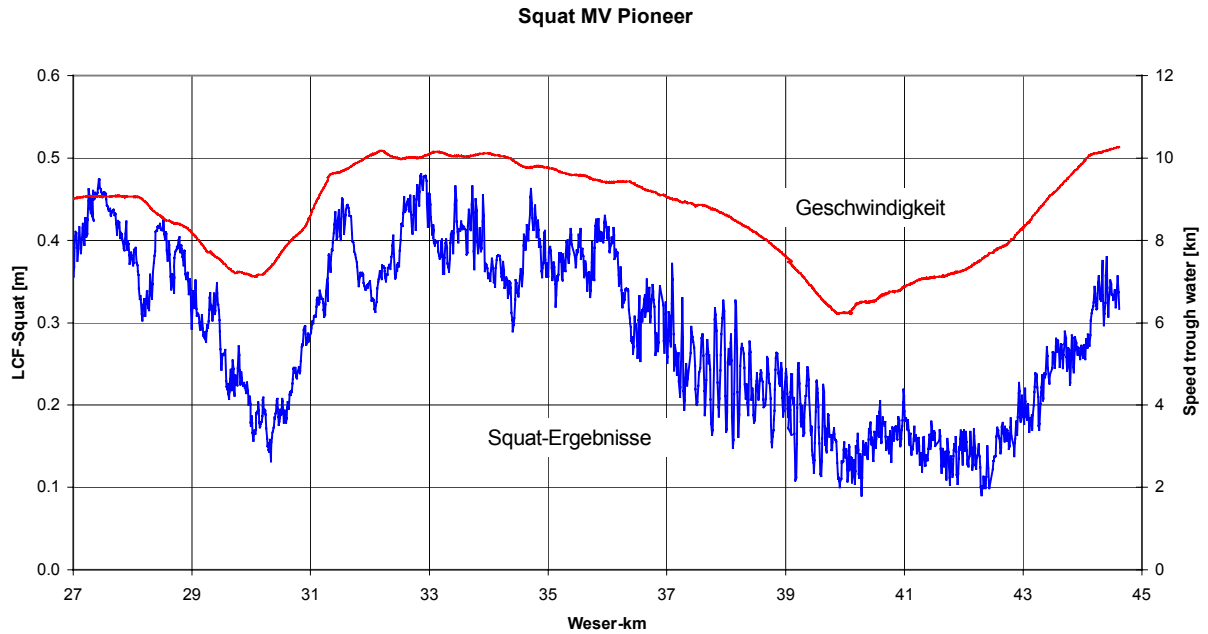


Abb. 3: Squat-Ergebnisse (blau) und Geschwindigkeit (rot) des ersten Experiments mit MV Pioneer

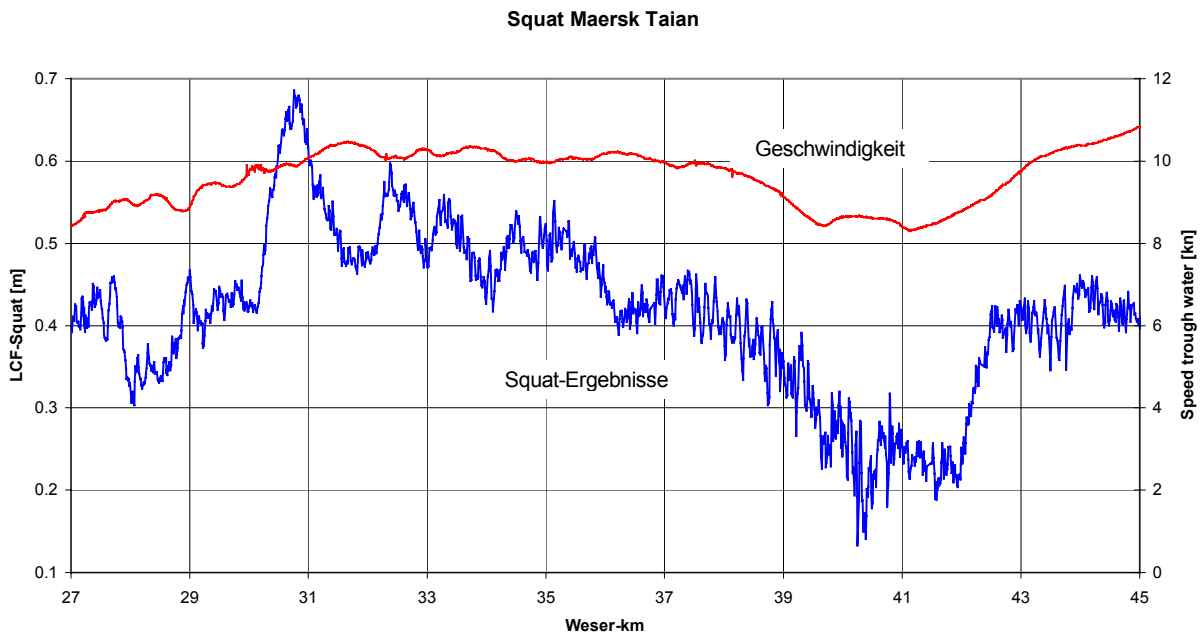


Abb. 4: Squat-Ergebnisse (blau) und Geschwindigkeit (rot) des Experiments mit Maersk Taian

Stellt man die Ergebnisse dieses Experimentes für den selben Abschnitt wie für die MV Pioneer dar (Abb. 4), dann ist wiederum die Abhängigkeit des Squat von der Geschwindigkeit ersichtlich.

Auch der Einfluss der Wellenstruktur des Wesergrundes zwischen Weser-km 41 und 37 ist erkennbar. Und wieder zeigt dieser unabhängige Test mit vollkommen anderen Parametern (Wetter, Begleitboot etc.) eine negative Korrelation für Squat und Geschwindigkeit zwischen Weser-km 31 und 35. Ein detaillierter direkter Vergleich der Ergebnisse dieser Tests ist in Abb. 5 dargestellt.

Ein drittes Experiment wurde am 22. Dezember 2000 wiederum auf der Unterweser durchgeführt. Die Sanko Summit, ein Massengutfrachter mit einer Länge von 190 m und einer Breite von 32,2 m, verließ den Hafen von Brake (km 40) bei der Ausreise mit einem Tiefgang von 11,3 m. Das Begleitboot - wiederum die Geestemünde - begleitete die Sanko Summit bis zum Hafen von Bremerhaven (km 72). Abb. 6. zeigt den resultierenden Bug-Squat und die Geschwindigkeit durchs Wasser. Zusätzlich haben wir den mit der Näherungsformel nach ICORELS [3] berechneten Bug-Squat dargestellt.

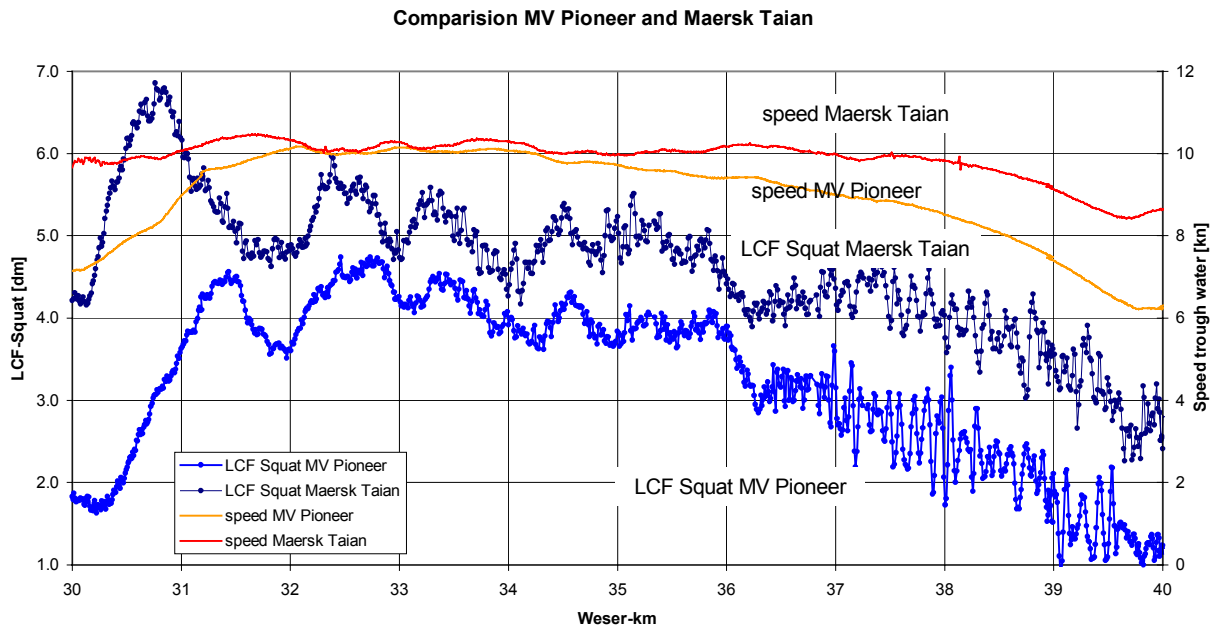


Abb. 5: Vergleich der Ergebnisse der ersten beiden Experimente

Die Geschwindigkeit beider Schiffe zeigt zwischen Weser-km 36 und 31,5 eine ähnliche Charakteristik. In beiden Squat-Datensätzen ist dieselbe negative Korrelation mit kleinen Geschwindigkeitsänderungen an denselben Positionen erkennbar. Auch wenn dieses Verhalten bisher noch nicht im Detail erklärt werden kann, so zeigt der Vergleich dieser beiden unabhängigen Datensätze deutlich die beeindruckende Qualität des mit der SHIPS-Methode erzeugten Datenmaterials. Anscheinend ist die erwartete Genauigkeit von unter 3-4 cm erreichbar, wenn das neue Konzept angewendet und alle notwendigen Korrekturen angebracht werden.

$$s_b = 2.4 \cdot \frac{\nabla}{L_{PP}^2} \cdot \frac{F_{nh}^2}{\sqrt{1 - F_{nh}^2}} \cdot K_s$$

Fahrwassertiefen und -weiten wurden hydrographischen Unterlagen des WSA Bremerhaven entnommen. Zwischen Weser-km 42 und 56 beschreibt der ICORELS-Squat den beobachteten Squat mit einer ausreichenden Qualität. Die Standardabweichung, berechnet aus den Differenzen beider Werte liegt bei 4,3 cm. Bedenkt man, dass die-ICORELS-Gleichung wegen des approximativen Charakters nicht in der Lage ist, das gesamte Squat-Verhalten des Schiffs exakt zu beschreiben und berücksichtigt man, dass der gemessene

Squat auch kleinskalige Effekte enthält, dann kann festgestellt werden, dass erstens die Genauigkeit des gemessenen Squats offensichtlich so gut wie erwartet ist und zweitens, dass die ICORELS-Formel, wenn sie wie angegeben verwendet wird, eine passende Beschreibung der Realität für diesen Parametersatz (Schiff, Tide, Fahrwasserstruktur etc.) darstellt. Von Weser-km 56 bis zu km 72 nimmt die Breite des Fahrwassers bis zu Werten zu, die nicht mehr vom Korrekturfaktor K_s abgedeckt werden. Für diesen Abschnitt des Flusses führt eine Anpassung des eher konservativen Faktors 2,4 zu einer besseren Beschreibung.

Wenn die vorgeschlagene Methode etabliert ist, sind Naturmessungen des Squat-Effektes mit erheblich geringerem Aufwand möglich. Aus einer größeren Zahl von Messungen können, abgesehen von den individuellen Resultaten, folgende wesentliche Fragestellungen untersucht werden:

- Ist es möglich, für individuelle Schiffe und in einem Revier eine Vorhersage des Squat-Effektes für bestimmte Geschwindigkeiten, Positionen und Tidestände zu treffen? Wie genau ist eine solche Vorhersage? Idealerweise sollten die Ergebnisse der Experimente so aufbereitet werden, dass sie ähnlich wie Manövrierunterlagen genutzt werden können.

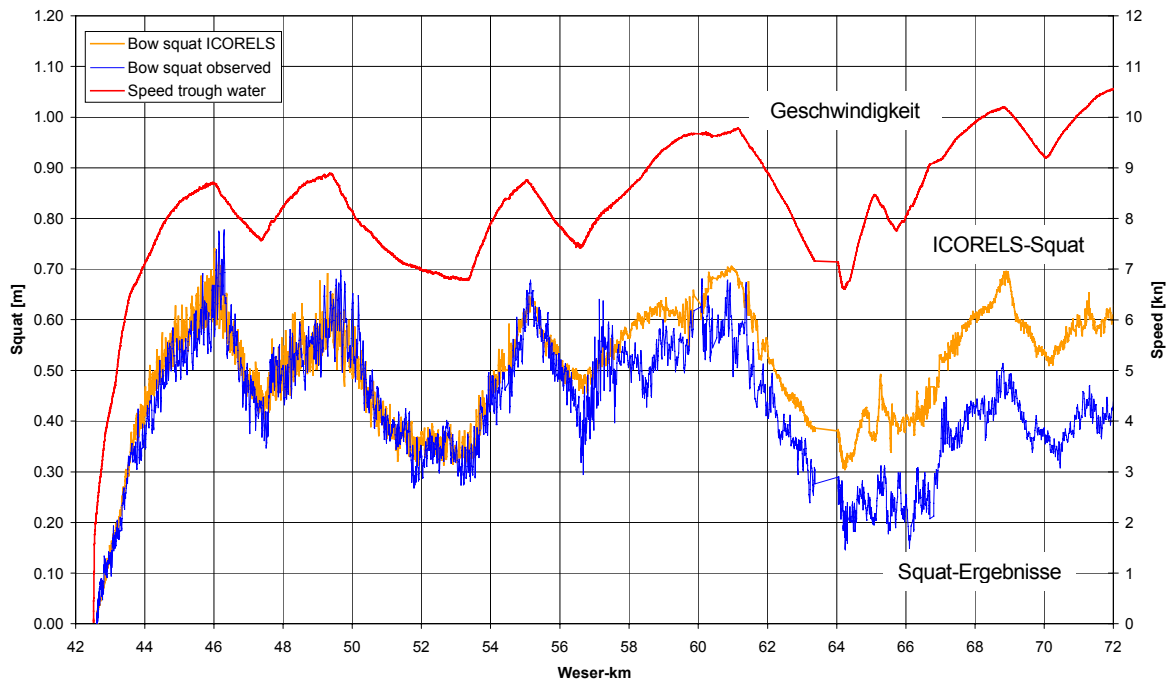


Abb. 6: Squat-Ergebnisse (blau) und Geschwindigkeit (rot) des Experiments mit der Sanko Summit. ICORELS-Squat in orange.

6 Künftige Möglichkeiten

Bei allen unserer ersten Testfahrten waren behelfsmäßige Improvisationen notwendig. Für zukünftige effiziente Messungen ist es erforderlich, die logistische Vorbereitung, den Geräteeinsatz und den Datenfluss zu optimieren. Die exzellente Qualität der Daten zeigt, dass der Informationsgehalt erheblich höher ist, als in Kapitel 5 dargestellt werden konnte. Die Analysen müssen so weiterentwickelt werden, dass alle signifikanten Parameter verstanden werden können.

- Ist es möglich, existierende Näherungsformeln für einzelne Schiffe auf der Grundlage individueller Untersuchungen zu „kalibrieren“?
- Ist es möglich, das beobachtete systematische Verhalten zu generalisieren und gegebenenfalls zu einem Produkt zu entwickeln, das existierende empirische Formeln ersetzen kann? Ein solches Produkt muss für eine Standard-PC zugeschnitten sein und könnte teilweise auf analytischen Beschreibungen

und teilweise auf entsprechende Interpolation von in Datenbanken abgelegten experimentellen Ergebnissen basieren.

Eine ausreichende Anzahl hochgenauer experimenteller Datensätze würde die Untersuchung möglicher dynamischer Effekte im Squat-Verhalten, z.B. in Abhängigkeit der Änderung von Parametern, erlauben. Über ein solches Verhalten mehr zu erfahren wäre wichtig, da solche Änderungen typisch für die Realität sind, alle theoretischen Näherungen allerdings stationäre Zustände voraussetzen.

7 Literatur

- [1] J.Feng, K.Kubik and S.O'Mahony, On-The-Fly GPS Kinematic Positioning for Measuring Squat and Trim of Large Passenger Ships, Proc. ION-GPS-96, Kansas-City, Sept. 1996, pp. 367-373.
- [2] Braun, G., Dünck-Kerst, H.-G., Wirth, H., Meßtechnische Ermittlung des schiffsdynamischen Parameters Squat, Beiträge zum 11. Hydrographentag, Glücksburg, Germany 1996.
- [3] PIANC-IAPH, Approach Channels, A Guide for Design, Report of the joint working group II-30, PIANC-Bulletin Nr.95, June 1997.
- [4] Reinking, J., Härting A., GPS-gestützte Seegangskorrektur hydrographischer Messungen aus Einzelempfänger-Daten, Zeitschrift für Vermessungswesen 127, in print (2002)
- [5] Härting, A., Reinking, J., Efficient determination of ship squat, Schiff und Hafen, 3 (1999), pp. 78-81.

Verfasser:

Prof. Dr. Alexander Härting
Fachhochschule Oldenburg / Ostfriesland /
Wilhelmshaven
Weserstr. 4, 26931 Elsfleth
Tel.: 01805 67807-4161
e-mail: Alexander.Haerting@els.fh-oldenburg.de

Prof. Dr.-Ing. Jörg Reinking
Fachhochschule Oldenburg / Ostfriesland /
Wilhelmshaven
Ofener Straße 16-19, 26121 Oldenburg
Tel.: 0441 7708-3250
e-mail: reinking@fh-oldenburg.de