

Numerische und experimentelle Untersuchung der Wechselwirkung beim Schiffsbegegnen und -überholen auf der Binnenwasserstraße

Numerical and experimental Investigation of the Interaction of Ships Encountering and Overtaking on Inland Waterways

Dr.-Ing. **Andreas Gronarz**¹, Dipl.-Ing. **Rupert Henn**¹, Dr.-Ing. **Tao Jiang**¹, Dipl.-Math. **Rainer Kaiser**¹, Dipl.-Ing. **Sven List**¹, Dr.-Ing. **Norbert Stuntz**, Dr.-Ing. **Roland Vilsmaier**²

¹ DST - Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V., Duisburg

² numrax GmbH, Duisburg

Kurzfassung

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens am DST wurde eine Modellversuchserie im Flachwassertank unter Zuhilfenahme des simultanen Einsatzes des Hauptschleppwagens und der Schnellschleppanlage durchgeführt. Sowohl für das Überholen als auch das Begegnen wurden die Kombination verschiedener Schiffstypen, die Passierabstände, die Schiffsgeschwindigkeiten und die Wassertiefen variiert. Gemessen wurden die auf die Modelle wirkenden Kräfte und Momente sowie der effektive Squat.

Mit Hilfe einer dimensionslosen Formulierung der Kräfte und der Reduktion auf funktionale Zusammenhänge wurden die charakteristischen Kennwerte mit der Parametervariation in Relation gebracht. Aus der vollständigen Testreihe wurde ein mathematisches Modell für die Wechselwirkung zwischen zwei Schiffen hergeleitet. Dieses wird in einem Computerprogramm implementiert, in dem die Kräfte aus der Wechselwirkung mit denen der allein fahrenden Schiffe überlagert werden. Damit wird es möglich, die Bewegungen von zwei sich begegnenden oder überholenden Schiffen in einem großen Parameterraum zu simulieren.

Zur detaillierteren Bestimmung der Druckverteilung auf die Schiffsaußenhaut wurden zusätzlich numerische Berechnungen für die Begegnungs- bzw. Überholsituation durchgeführt. Im ersten Simulationsansatz wurde das Schiffsverhalten über ein iteratives quasistationäres Verfahren angenähert. Die derzeitige Entwicklung, basierend auf einem Relativbewegungsmodell (Overset-Methode) verspricht eine sehr viel exaktere Vorhersage des instationären dynamischen Schiffsverhaltens.

Abstract

In the framework of a research programme at the DST a model test series have been carried out in the shallow water basin of the DST. Captive model tests have been carried out with inland vessels using both the main carriage and the high speed carriage simultaneously. Various parameters have been chosen within the extensive test series: the combination of vessels, the distance between them, the speed of the ships and the water depth both for overtaking

and encountering. In addition to the forces and moments acting on the ships the squat of the vessels has also been measured.

The nondimensional representation of the forces and the reduction to typical functions result in characteristic data which can be set into relation with the various test parameters. A mathematical model describing the ship-ship interaction was derived from the complete test series and will be implemented into a simulation code, which computes the interaction forces and superposes them to the forces calculated by the mathematical model for the ship itself. Thus it is possible to simulate the motion of the vessels within a wide range of parameters.

Additional numerical simulations have been performed to investigate the details of the pressure distribution on the ship hulls during overtaking and encountering. In the first step the ship behaviour was computed by means of an iterative quasi-stationary method. The current development based on a relative motion module (overset technique) promises a more accurate prediction of the full unsteady dynamic behaviour.

1 Einleitung

Die Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs auf Flüssen und anderen tiefen- und seitenmäßig begrenzten Gewässern ist von großer Bedeutung für den Transport auf den Binnenwasserstraßen. Ein hohes Verkehrsaufkommen führt zu einer erhöhten Gefahr von Unfällen und Kollisionen. Die Vertiefung des Wissens über die bei der Wechselwirkung Schiff-Schiff (Überholen und Begegnen) auftretenden Phänomene kann zu einer Verbesserung der Verkehrssicherheit führen und wird eine genauere Nachbildung der realen Verkehrssituationen in Trainings-Simulatoren ermöglichen.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung hat dankenswerterweise unter dem Förderkennzeichen 03SX199 ein Projekt zu diesem Thema mit dem Titel „SICHERBIN - Verbesserung der Verkehrssicherheit auf Binnenwasserstraßen an Eng-

pass- und Gefahrenstellen“ gefördert. Hierbei werden experimentelle und numerische Methoden verwendet, um die aus der Praxis bekannten Gefahrensituationen zu untersuchen.

In diesem Beitrag wird der Schwerpunkt auf die beim Überholen und Begegnen auftretenden Phänomene wie Kraftwirkungen, Wasseroberflächenverformung sowie Trimm und Absenkung gelegt, die experimentell anhand einer Vielzahl von Fällen untersucht wurden. Zusätzlich werden verfügbare numerische Methoden auf ihre Anwendbarkeit hinsichtlich dieser Manöver untersucht und verbessert.

2 Experimente

2.1 Auswahl der Schiffstypen und Szenarien

Für die Modellversuche wurden 4 charakteristische Schiffstypen ausgewählt. Für die meisten Untersuchungen wurde ein Standard-Gütermotorschiff (GMS) mit $L = 110$ m und $B = 11,4$ m verwendet, wie es auf den westeuropäischen Flüssen und Kanälen verkehrt.

Ebenfalls sehr oft ist der einspurig zweigliedrige Schubverband (SV) bzw. Koppelverband (KV) mit $L = 185$ m und $B = 11,4$ m anzutreffen. Er besteht entweder aus einem Schubboot und zwei Standard-Leichtern hintereinander oder einem GMS und einem davor angeordneten Leichter. Für die Darstellung des Schubverbandes wurde ersatzweise der hydrodynamisch fast gleichwertige Koppelverband gewählt. Dadurch konnte durch Weglassen des vorgekoppelten Leichters der häufig anzutreffende Fall, daß zwei GMS einander passieren, nachgebildet werden.

Die Auswahl wurde durch ein Groß-Containerschiff (GCS) mit $L = 135$ m und $B = 20$ m, welches aufgrund seiner Breite nur auf dem Rhein verkehren kann sowie ein typisches Fahrgastschiff (FGS) mit $L = 50$ m, $B = 9$ m und $T = 1,5$ m ergänzt. Alle Schiffe mit Ausnahme des FGS wurden im Betriebszustand beladen ($T = 2,8$ m) sowie leer ($T_h = 1,5$ m and $T_v = 0,5$ m) untersucht. Die dabei maximalen ökonomisch sinnvollen Geschwindigkeiten sind für die Standard-Wassertiefe von $h = 4$ m in der folgenden Tabelle angegeben.

Typ	V_{\max} [km/h] beladen	V_{\max} [km/h] leer
GMS	15	18
SV / KV	14	16
GCS	14	16
FGS	18	-/-

Neben der Normalwassertiefe wurden auch umfangreiche Messungen auf einer Wassertiefe von

$h = 7,5$ m, welche dem Hochwasser auf dem Rhein entspricht, durchgeführt.

Folgende Größen wurden während der umfangreichen Versuchsserien variiert:

- Manövertyp:
Überholen / Begegnen
- Geschwindigkeit von Eigenschiff und Fremdschiff
 V_E und V_F
- Fahrzeuggröße
 L, B, T, Δ
- Lichter Abstand zwischen den Schiffen
 y
- Wassertiefe
 h

2.2 Versuchsaufbau

Für die Nachbildung eines Überhol- bzw. Begegnungsmanövers im Schlepptank sind zwei unabhängig voneinander operierende Schleppwagen erforderlich. Neben dem großen Schleppwagen wurde hierzu die seit 6 Jahren verfügbare Schnellschleppanlage verwendet.

Die Modelle wurden an beiden Schleppwagen im gefesselten Zustand untersucht. Wegen der großen Anzahl zu untersuchender Modellkombinationen wurde ein spezieller Balken („Backbone“, Abb. 1) entwickelt, der alle Meßinstrumente wie Kraftmeßglieder und Abstandsmesser beinhaltet. So konnte ein schneller Modellwechsel ohne aufwendige Neustallation aller Meßeinrichtungen realisiert werden. Beide Wagen waren mit baugleichen Backbones ausgerüstet, um von beiden am Manöver beteiligten Modellen Daten über die Interaktionskräfte und -momente sowie den Squat zu erhalten.

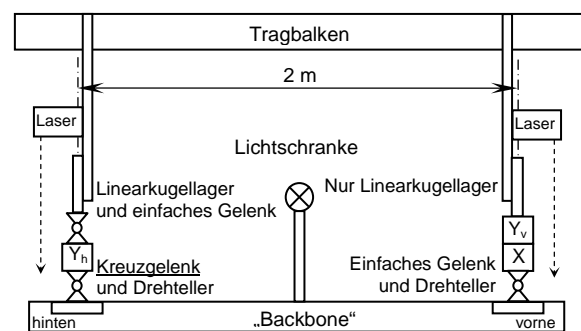


Abb. 1 Messeinrichtung mit „Backbone“

Das Backbone wurde oben auf den Modellen befestigt. Durch diesen hohen Kraftangriffspunkt der Längskraft X wird ein trimmendes Moment induziert. Der entstehende Fehler ist jedoch gering, da die Modelle im Selbstpropulsionspunkt angetrieben werden und nur die geringen Änderungen der Längskraft statt des großen Widerstandes betrachtet werden.

Die Modelle wurden mit konstanter Geschwindigkeit von dem jeweiligen Schleppwagen geführt. Dabei fuhr je nach der Zielsetzung des Versuchs mal der große Schleppwagen oder die Schnell-schleppanlage schneller (Überholen) oder rückwärts (Begegnen). Da die Meßbühne des großen Schleppwagens seitlich verfahrbar ist, konnte dadurch ein veränderlicher Passierabstand eingestellt werden.

Eine Lichtschranke in der Mitte beider Backbones wurde dazu verwendet, um den Zeitpunkt zu erfassen, an dem sich beide Schiffe direkt nebeneinander befinden. Durch dieses Signal und die gemessenen Geschwindigkeiten der Wagen war es möglich, anhand der Zeitachsen der Datenerfassung die Positionen beider Schiffe zueinander während des Manövers zu berechnen.

Für die Auswertung der Daten wird das Schiff, an dem jeweils gemessen wurde, Eigenschiff und das Schiff, mit dem das Eigenschiff interagiert, Fremdschiff genannt. Da beide Modelle mit Backbones zum Messen ausgestattet waren, können die Rollen „Eigenschiff“ und „Fremdschiff“ je nach Betrachtungsweise wechseln.

2.3 Messergebnisse

Die Kräfte X , Y_v und Y_h sowie die Absenkungen z_v und z_h (siehe Abb. 1) wurden während der Überhol- und Begegnungsversuche kontinuierlich für beide Backbones aufgezeichnet. In Abb. 2 sind diese Signale, die mit einem gewissen Eigenrauschen behaftet sind, für das Backbone des Schleppwagens dargestellt.

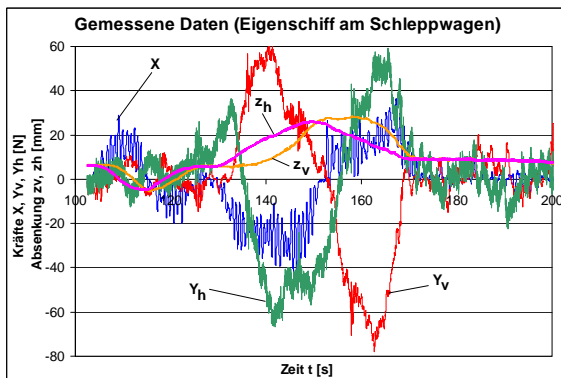


Abb. 2 Meßdaten beim Überholvorgang

Aus den Einzelsignalen für die vordere und die hintere Seitenkraft Y_v und Y_h wurden die Gesamtseitenkraft Y sowie das Giermoment N berechnet, die Distanzsignale für die Absenkungen vorne und hinten lieferten den Squat in der Form Trimm θ und Absenkung z .

Ein speziell für diese Versuche entwickeltes Auswertprogramm übernahm diese und weitere Umrechnungen einschließlich der Glättung der Daten.

2.4 Einfluß des Propellers

Eine für die Durchführung der Versuche sehr wichtige Frage war, ob diese mit Eigenantrieb durchgeführt werden mußten oder ob auf die Propellerwirkung verzichtet werden konnte. Aus diesem Grund wurden eine Serie von Überholmanövern (verschiedene Geschwindigkeiten und Abstände) so ausgeführt, daß bei beiden Modellen der Propeller im Selbstpropulsionspunkt arbeitete bzw. stillstand.

Die in Abb. 3 dargestellten Ergebnisse für die Seitenkraft Y und das Giermoment N zeigen deutlich, daß der seitliche Sog des Propellers einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß auf die Wechselwirkungskräfte zwischen den beiden beteiligten Fahrzeugen hat. In tiefem Wasser kann dieser Einfluß vernachlässigbar klein sein, aber in flachem Wasser sollte er, wie die vergleichenden Experimente gezeigt haben, nicht vernachlässigt werden.

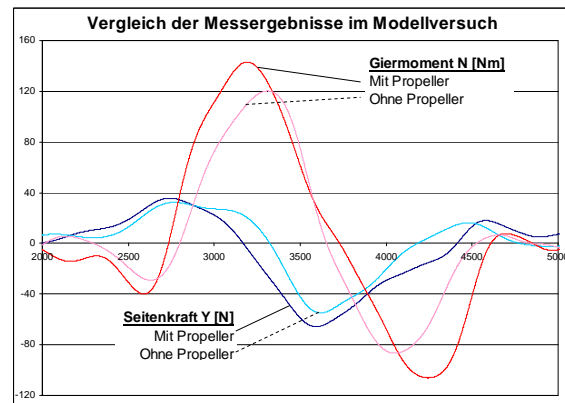


Abb. 3 Meßergebnisse mit und ohne Propeller

Aus diesem Grunde wurden alle folgenden Experimente so ausgeführt, daß die Propellerdrehzahl auf den Selbstpropulsionspunkt entsprechend der aktuellen Geschwindigkeit eingestellt war.

3 Versuchsauswertung

3.1 Dimensionslose Darstellung

Um für die Darstellung der Ergebnisse eine vom Modellmaßstab unabhängige Form zu gewährleisten, werden die Daten dimensionslos gemacht. Die übliche Vorgehensweise ist die, daß die Kräfte durch den Staudruck dividiert werden.

$$X', Y' = X, Y / (\rho/2 \cdot v^2 \cdot L \cdot T) \quad (1)$$

$$N' = N / (\rho/2 \cdot v^2 \cdot L^2 \cdot T) \quad (2)$$

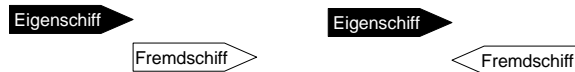
Dies hat allerdings zur Folge, daß geschwindigkeitsabhängige Einflüsse unterdrückt werden. In vielen Fällen mag dies sinnvoll sein, für die geplante Auswertung jedoch sollten alle Einflüsse der Variationsparameter unverändert erhalten bleiben. Ähnliches gilt für die beim Staudruck verwendete Fläche. Aus diesem Grund wurde nicht die Modelllänge zur dimensionslosmachung verwendet, sondern eine fiktive

Länge, die nur dem Maßstab zuzuordnen ist, z.B. die ungefähre Größe eines Menschen mit $L = 2$ m. Als unabhängige Geschwindigkeit wurde die Geschwindigkeit gewählt, die ein Körper im freien Fall nach zurücklegen der Fallhöhe L erreicht.

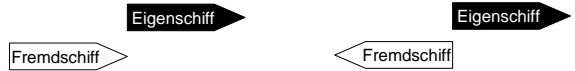
3.2 Transformation

Um alle Versuche, also Begegnen und Überholen mit beiden Modellen, untereinander vergleichbar zu machen, sind gewisse Transformationen der Zeitachse durchzuführen, um diese in die relative Position x_r des Fremdschiffes in Bezug zum Eigenschiff zu überführen. Die folgenden Definitionen werden für alle Messungen angewendet:

- A) Die Zeitachse wird in relative Positionen des Fremdschiffes umgerechnet, so daß sie zwischen Beginn und Ende des Manövers die Werte -1 und +1 annimmt. Wenn beide Fahrzeuge sich mit dem Hauptspant nebeneinander befinden, ist die relative Position $x_r = 0$.
- B) Der Beginn des Manövers $x_r = -1$ ist so definiert, daß sich Bug oder Heck des Fremdschiffes sich am Bug des Eigenschiffes befinden.



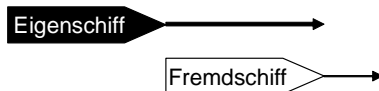
- C) Das Ende des Manövers ist durch $x_r = +1$ gekennzeichnet, wenn sich Bug oder Heck des Fremdschiffes am Heck des Eigenschiffes befinden.



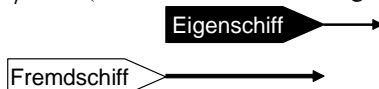
- D) Die Daten werden bezüglich der Vorzeichen so dargestellt, daß sich das Fremdschiff immer an Steuerbordseite des Eigenschiffes befindet.

Diese Vereinbarung hat allerdings zur Folge, daß im Falle des Überholmanövers, wenn das Eigenschiff das langsamere Fahrzeug ist, die Ereigniskette umgekehrt, also von +1 nach -1, verläuft. Dies wird in der nachfolgenden Darstellung erläutert:

Beginn: $x_r = -1$ (Eigenschiff überholt Fremdschiff)



Beginn: $x_r = +1$ (Fremdschiff überholt Eigenschiff)



Unter Einhaltung dieser Regeln können alle Kombinationen von Passierrichtung und -geschwindigkeit in der gleichen Form dargestellt werden.

3.3 Ergebnisse

Diese Betrachtungsweise führt zu einer allgemeinen Darstellung des Ablaufs der Ereignisse und einer generellen Form der Kurven für die Meßgrößen am Eigenschiff (Abb. 4):

$x_r = -1$

- Der Bug sinkt ab
- Das Schiff beschleunigt
- Die Fahrzeuge stoßen sich ab
- Ausdrehendes Giermoment

$x_r = 0$

- Maximale Absenkung
- Beide Fahrzeuge ziehen sich an

$x_r = +1$

- Das Heck sinkt ab
- Verzögerung
- Die Fahrzeuge stoßen sich ab
- Eindrehendes Giermoment

In der schematischen Darstellung des allgemeinen Verlaufs werden diese Ereignisse deutlich:

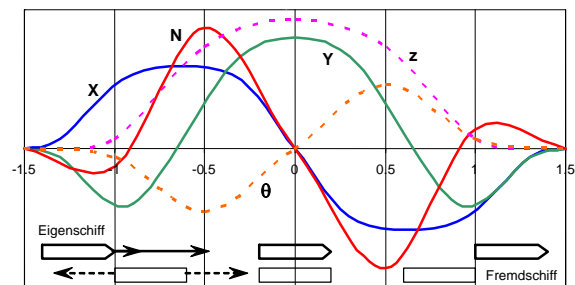


Abb. 4 Verlauf von Längskraft X , Seitenkraft Y , Giermoment N , Trimm θ und Absenkung z .

Dieser verallgemeinerte Verlauf legt es nahe, eine Sinus- bzw. Kosinusfunktion als Ersatzfunktion für die Modellierung der Interaktionsphänomene beim Überholen und Begegnen zu verwenden. Um das Abklingen der Wechselwirkung bei Vergrößerung des Abstandes in Längsrichtung darzustellen, muß die periodische Funktion außerhalb der Bereiche ± 1 abgedämpft werden. Dies kann durch eine Gauß'sche Glockenkurve als Multiplikator geschehen. Ein Beispiel für eine derartige Funktion ist in Formel (3) gegeben:

$$\begin{aligned}
 F' = & A \cdot f_y^{Ay} \cdot f_{B\dot{U}}^{AB\dot{U}} \cdot f_h^{Ah} \cdot f_V^{AV} \cdot f_L^{AL} \\
 & \cdot e^{-1.5 \cdot |x_r|^{De}} \\
 & \cdot \sin \left[\pi \cdot \left(\omega \cdot f_L^{WL} \cdot f_y^{Wy} \cdot x_r \right. \right. \\
 & \left. \left. - \varphi \cdot f_y^{Py} \cdot f_{B\dot{U}}^{PB\dot{U}} \cdot f_V^{PV} \cdot f_L^{PL} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{3}$$

Die Einflüsse der Variationsparameter (siehe Kap. 2.1) werden in dieser Formel durch Einflußfaktoren dargestellt. Als Beispiel für einen derartigen Faktor sei die Abstandsfunktion f_y angegeben:

$$f_y = 0.5 + \frac{(B_o + B_T)/2}{y + (B_o + B_T)/2} \quad (4)$$

Die Amplitude A , die Frequenz ω , die Phase φ sowie die verschiedenen Exponenten für die Einflußfaktoren von Amplitude, Dämpfung, Frequenz und Pha-

senlage werden durch eine nichtlineare Regression aus den geglätteten und datenreduzierten Meßwerten für 5 Zielgrößen (siehe Abb. 4) berechnet. Als Beispiel für die Annäherung der Modellfunktion an die gemessenen Daten ist in Abb. 5 die Seitenkraft Y für Überholen und Begegnen mit verschiedenen Geschwindigkeiten auf tiefem und auf flachem Wasser wiedergegeben.

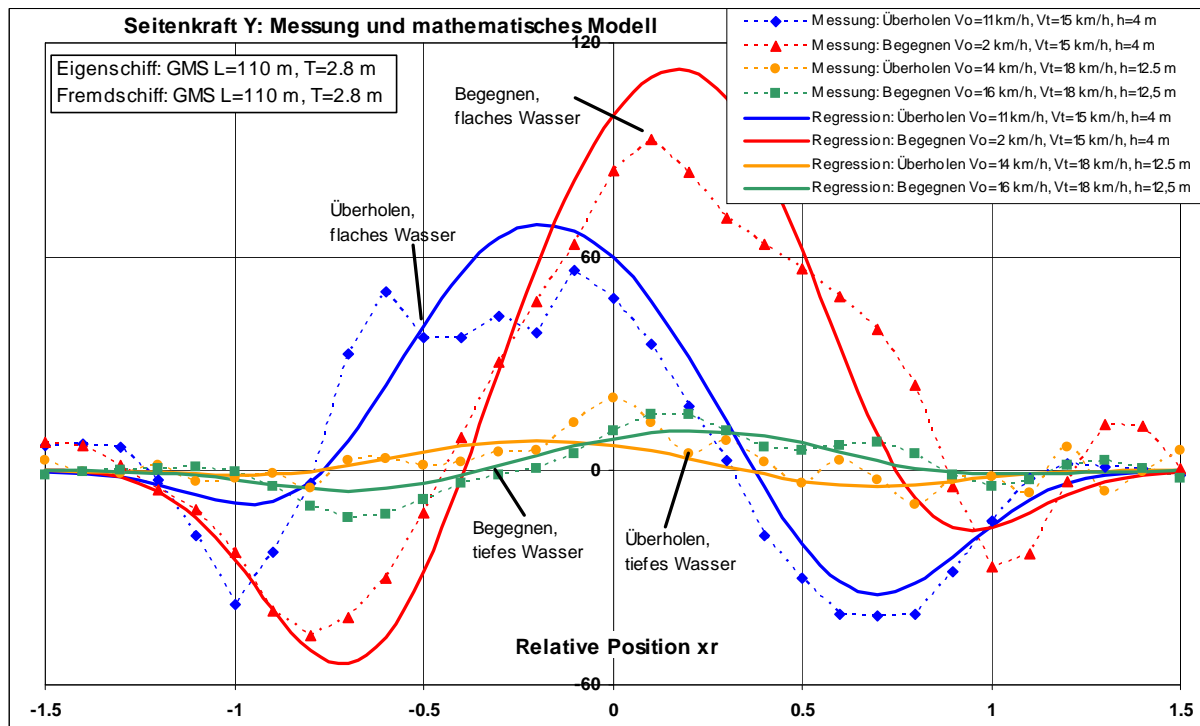


Abb. 5 Vergleich Messung und Regression

4 Simulation der Manöver

Die mathematischen Modellierungen für die Kräfte X und Y sowie das Giermoment N wurden in Unterprogrammen (siehe Formel 3) formuliert, wobei die Position des Fremdschiffes (dargestellt durch x_r und y) sowie die Variationsparameter der Versuchsserien als Kontrollgrößen übergeben werden. Nach dem Superpositionsprinzip werden die berechneten Interaktionskräfte zu den in der Simulation des Bewegungsverhaltens wirkenden hydrodynamischen Kräften am Eigenschiff addiert.

Dabei bewegt sich das Fremdschiff (links) mit konstanter Geschwindigkeit auf einer geraden Bahn. Dies entspricht nicht der Realität im Verkehrsgeschehen, kann aber sehr gut mit den durchgeführten frei gefahrenen Modellversuchen verglichen werden, bei denen das Fremdschiff auch zwangsgeführt wurde.

In den Abbildungen 6a und 6b sind Momentaufnahmen einer derartigen Simulation eines Überholvorganges wiedergegeben, wobei das Fremdschiff das Eigenschiff überholt und dieses aus dem Kurs bringt.

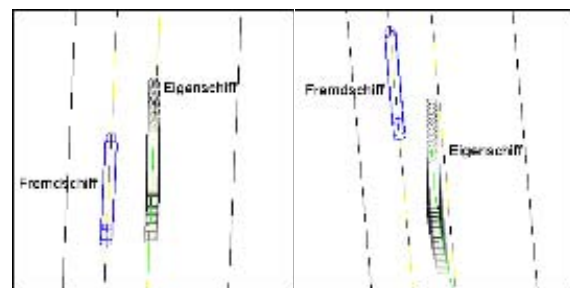


Abb. 6a $x_r = +0.5$

Abb. 6b $x_r = -0.5$

Der Vergleich mit einem frei gefahrenen Überholmanöver, welches ebenfalls im Rahmen des Projektes durchgeführt wurde, zeigt, daß eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und der Bewegung im Modellversuch erzielt werden konnte.

5 Numerische Berechnungen

5.1 Flachwasserlöser BeShiWA

BEShiWa (Boussinesq Equations for Ship Waves) ist eine bewährtes numerisches Verfahren zur Berechnung der Ausbreitung von Schiffswellen in flachem Wasser.

Das Verfahren basiert auf Flachwassergleichungen vom Boussinesq-Typ. Unter der Annahme, dass die Strömung reibungs- und rotationsfrei ist, die Wellenlänge größer und die Wellenamplitude kleiner als die Wassertiefe sind, kann das Strömungsfeld in vertikaler Richtung analytisch behandelt werden. Das mathematische Problem reduziert sich dann auf die Beschreibung der Strömung in einer horizontalen Ebene, mit den Feldvariablen \bar{u} , \bar{v} und ζ . Das sind die vertikal gemittelten Geschwindigkeitskomponenten

$$\bar{u}(x, y, t) = \frac{1}{h(x, y) + \zeta(x, y, t)} \int_{-h}^{\zeta} u(x, y, t) dz$$

und

$$\bar{v}(x, y, t) = \frac{1}{h(x, y) + \zeta(x, y, t)} \int_{-h}^{\zeta} v(x, y, t) dz$$

und die Wellenerhebung ζ .

Es ergeben sich dann die Feldgleichungen

$$\begin{aligned} \zeta_t - V\zeta_x + (\zeta + h)(u_x + v_y) + \\ (\zeta_x + h_x)u + (\zeta_y + h_y)v = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_t - Vu_x + uu_x + vu_y + g\zeta_x \\ - \frac{h}{2}[h_{xx}u_t + 2h_xu_{tx} + hu_{txx} + h_{xy}v_t + h_yv_{tx} + \\ h_xv_{ty} + hv_{txy} - V(h_{xx}u_x + 2h_xu_{xx} + hu_{xxx} + \\ h_{xy}v_x + h_yv_{xx} + h_xv_{xy} + hv_{xyy})] \\ + \frac{h^2}{6}(1 - 6C_{BQ})[u_{txx} + v_{txy} - V(u_{xxx} + v_{xyy})] \\ + gh^2C_{BQ}(\zeta_{xxx} + \zeta_{xyy}) = -\frac{P_x}{\rho} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_t - Vv_x + uv_x + vv_y + g\zeta_y \\ - \frac{h}{2}[h_{xy}u_t + h_yu_{tx} + h_xu_{ty} + hu_{txy} + \\ h_{yy}v_t + 2h_yv_{ty} + hv_{tyy} - V(h_{xy}u_x + h_xu_{xy} + \\ h_yu_{xx} + hu_{xyy} + h_{yy}v_x + 2h_yv_{xy} + hv_{xyy})] \\ + \frac{h^2}{6}(1 - 6C_{BQ})[u_{txy} + v_{tyy} - V(u_{xyy} + v_{xyy})] \\ + gh^2C_{BQ}(\zeta_{xyy} + \zeta_{yyy}) = -\frac{P_y}{\rho} \end{aligned}$$

mit der Schiffsgeschwindigkeit V und dem Dispersionskorrekturfaktor C_{BQ} . Die Verdrängungswirkung des Schiffs wird mit Hilfe der Schlankkörpertheorie modelliert.

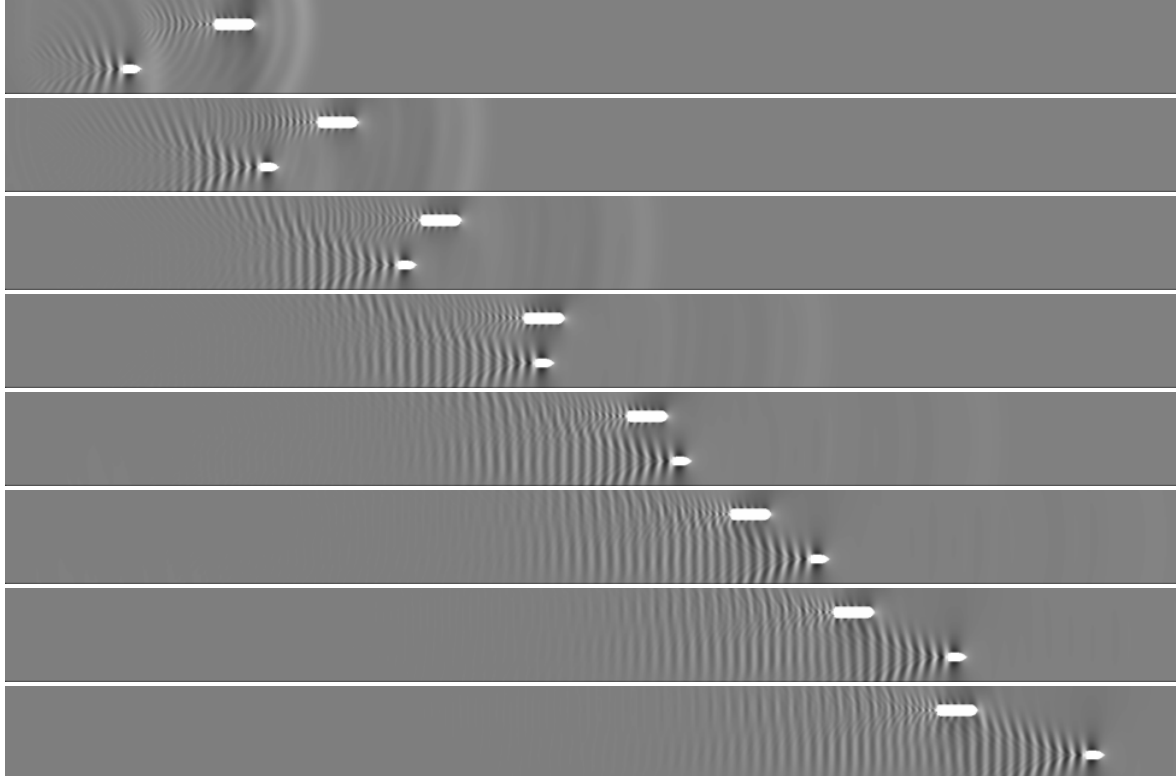


Abb. 7 Zeitreihe der Wellenbilder beim Überholen. Hier überholt ein kleines Fahrgastschiff (17,6 km/h) ein Küstenmotorschiff (15 km/h), die Wassertiefe beträgt 5 m.

Die Differentialgleichungen werden auf einem kartesischen Gitter mit einem Finite-Differenzen-Verfahren diskretisiert und in konstanten Intervallen Δt gelöst.

Das Verfahren wurde so erweitert, dass mehrere Berechnungsgebiete gekoppelt werden können. Die Feldvariablen des einen Gebiets sind dann die Randbedingung des benachbarten Gebiets und umgekehrt. So ist es möglich beliebig viele Schiffe gleichzeitig zu simulieren. Das Verfahren ist bis jetzt noch darauf beschränkt, daß die Schiffe nur auf parallelen Kurslinien fahren können.

Während die hier interessanten Kräfte, die auf das Schiff wirken (Widerstand, Querkräfte und Giermoment) nicht berechnet werden können, kann die dynamische Schwimmlage des Schiffs sehr gut berechnet werden.

In Abb. 7 ist eine Zeitreihe der Wellenbilder beim Überholvorgang dargestellt. Zur Verdeutlichung der Wechselwirkung der Wellensysteme wurde hier ein Fall ausgewählt, der nicht im Forschungsvorhaben SICHERBIN untersucht wurde. Hier überholt ein kleines Passagierschiff ein Küstenmotorschiff. Zunächst sind deutliche Beschleunigungswellen zu erkennen, die vor dem Küstenmotorschiff herlaufen. Diese rühren daher, daß die Simulation immer im Ruhezustand beginnt. Im späteren Verlauf zeigt sich, daß das Fahrgastschiff, das mit einer Tiefenroudezahl von 0,7 fährt, ein ausgeprägtes, unterkritisches Wellensystem erzeugt. Das Wellensystem des langsameren Küstenmotorschiffs ist dagegen schwächer ausgebildet. Beide Wellensysteme durchdringen sich und beeinflussen dabei auch die dynamische Schwimmlage des jeweils anderen Schiffes.

Ein exemplarisches Beispiel für den Verlauf von Absenkung Trimm beim Überholen zeigt Abb. 8. Hier überholt ein Leichter mit 13,4 km/h einen anderen Leichter, der sich mit 9 km/h bewegt.

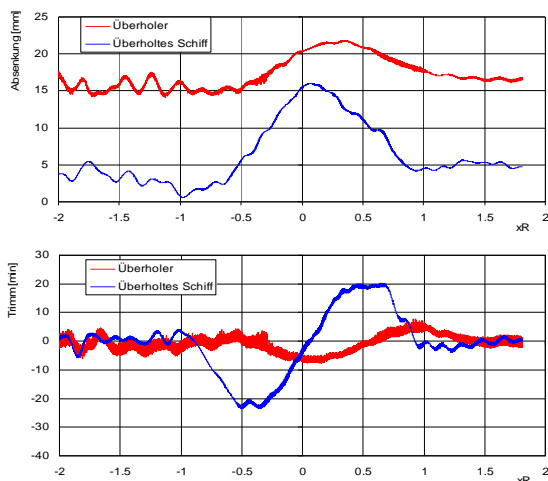


Abb. 8 Verlauf von Absenkung und Trimm beim Überholvorgang zweier Leichter.

5.2 Detaillierte Berechnung relativ bewegter Binnenschiffe mittels Overset-Methode

Um eine detaillierte numerische Simulation relativ bewegter Gitter zu ermöglichen wird ein auf dem Programmpaket MOUSE entwickelter 3-D Feldlöser für Strömungen mit freier Oberfläche mit einer neu entwickelten Overset-Methode gekoppelt.

5.2.1 Grundzüge des Basislösers für Strömungen mit freier Oberfläche

Das zugrunde liegende Programmpaket MOUSE basiert auf einem Finite-Volumen Lösungsverfahren in knotenzentrierter Anordnung auf unstrukturierten und hybriden Gittern. Es stehen unterschiedliche Methoden für inkompressible Strömungen zur Verfügung. In der vorliegenden Arbeit wird die Methode der künstlichen Kompressibilität eingesetzt. Ein duales Zeitschritteverfahren ermöglicht hierbei je nach Anwendungsfall auch zeitgenaue Berechnungen unter laufender Berücksichtigung der Massenerhaltung, die in einer inneren Iterationschleife je Zeitschritt erreicht wird.

Die Berücksichtigung der freien Oberflächen erfolgt mittels Levelset-Methode. Bei dieser Methode wird die freie Oberfläche über einen diskreten Iso-Wert einer skalaren Funktion dargestellt, die Ihrerseits als skalare Transportgleichung das System der Erhaltungsgleichungen ergänzt und gemeinsam mit den eigentlichen Strömungsvariablen in der Zeit integriert wird. Als Randbedingung wird zu jedem Zeitpunkt der Umgebungsdruck an der zeitlich veränderlichen freien Oberfläche vorgegeben.

Eine detailliertere Darstellung der Methoden ist z.B. Stuntz et. al. 2005 dargestellt.

5.2.2 Overset-Objekt-Methode

Das Overset-Objekt Konzept charakterisiert die Verwendbarkeit unterschiedlicher, vorab vernetzter Einzelobjekte und Teilgitter in hierarchischer Struktur. Die Einzelobjekte können relativ zueinander positioniert und ggf. auch bewegt werden.

Entsprechende Positionen und Bewegungen werden in einem Szenieriefle abgelegt und laufend mitberechnet. Das Konzept erlaubt somit eine konsequente Kapselung der spezifischen Methoden zur Berechnung der Positionierungen und Relativbewegungen verschiedener Objekte.

In schiffstechnischen Anwendungen können somit mehrere Schiffe in einer gemeinsamen, vollständig dreidimensionalen, Simulation erfaßt werden.

Die Ankopplung zwischen den Teilgittern erfolgt über einen wechselseitigen Interpolationszugriff, Abb. 9. Die Zuweisung verschiedener Prioritätsklassen für die einzelnen Teilgitter ermöglicht die

Definition der Gültigkeitsbereiche. In den hier durchgeführten Berechnungen sind die Lösungen auf den schiffsfesten Gittern prioritär und überschreiben somit die darunterliegenden Lösungen auf einem erdfesten Inertgitter.

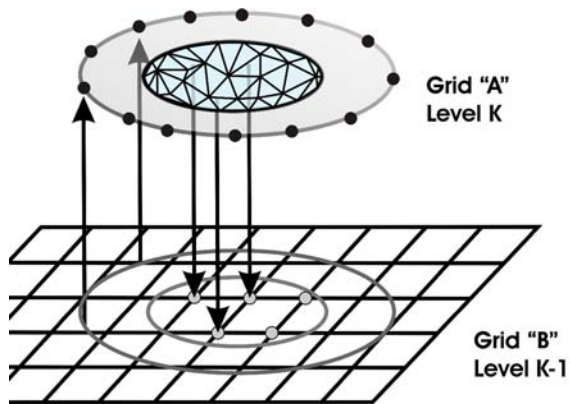


Abb. 9 Interpolationskopplung zwischen überlappenden Gittern.

Aufgrund des objektorientierten Basislösers ist die Implementierung der Overset-Objekt-Methode weitestgehend unabhängig vom eigentlichen Lösungsverfahren. Die zentrale Steuerung übernimmt ein sogenannter OversetObjectManager, Abb. 10. Diese Daten- und Methoden-Klasse "kennt" den hierarchischen Baum der Teilnetze (Abb. 10, rechts) und die je nach Anwendung dazugehörigen Bewegungsmodelle (Abb. 10, links). Zur Ablaufsteuerung werden Aktionsklassen in die bestehende Ablaufsequenz des Programms integriert (Abb. 10, unten).

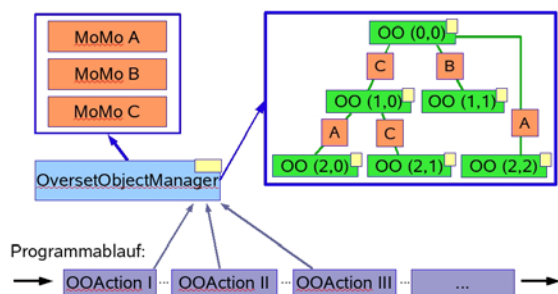


Abb.10 Konzeptioneller Aufbau der Overset-Objekt-Methode. Die Abkürzungen MoMo und OO stehen für die Bewegungsmodelle (Motion Model) und die einzelnen Teilnetze (Overset Objekt).

Eine Kombination der unter 5.2.1 dargestellten Methoden mit der Overset-Objekt-Methode ist ohne methodische Einschränkung möglich. Lediglich bei der Parallelisierung entstehen logische Konflikte mit den Gruppierungskonzepten der Gebietszerlegung. Aus diesem Grund konnten die Verfahren bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur auf Skalarrechnern eingesetzt werden, weswegen sich das angefügte Rechenbeispiel auf zunächst moderat große

reibungsfreie und quasistationäre Strömungen beschränken muß.

5.2.3 Berechnungsbeispiel

Im folgenden soll der Überholvorgang zweier Binnenschiffe untersucht werden. Zur Vereinfachung wird zunächst eine modellhafte Leichter-Geometrie angenommen. Beide Schiffe haben in diesem einfachen Beispiel die gleiche Form. Um den mit einer realen Überholsituation verbundenen hohen Rechenaufwand bei der Anwendung der dualen Zeitschrittemethode zu umgehen, wird hier eine quasistationäre Rechnung in verschiedenen Relativpositionen durchgeführt.

Die eigentlichen Schiffsnetze bestehen lediglich aus einer dünnen Schale mit 5 krummlinig strukturierten Elementebenen. Sie werden zunächst mittels Overset Methode in ein kartesisches, schiffsfestes Koppelgitter eingesetzt und bilden in dieser Konstellation eine Berechnungseinheit. In der hier dargestellten Simulation werden zwei dieser Berechnungseinheiten, den beiden beteiligten Schiffen entsprechend, wiederum mittels Overset Methode in ein gemeinsames Hintergrundgitter eingesetzt. Abb. 11 zeigt die Gitterkonfiguration zu Beginn des Überholvorgangs. Abb. 12 zeigt die relative Auslenkung der Oberfläche zu einigen Zeitpunkten während des Überholvorgangs.

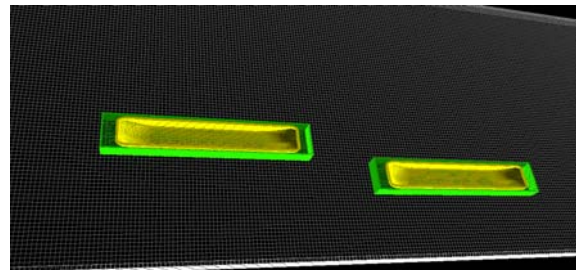
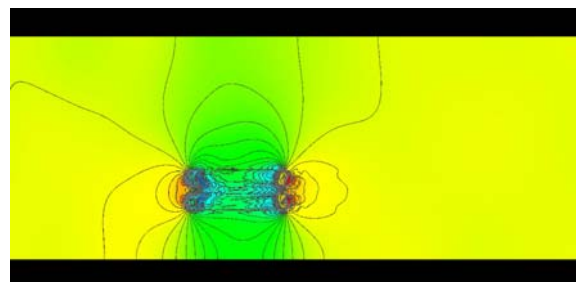
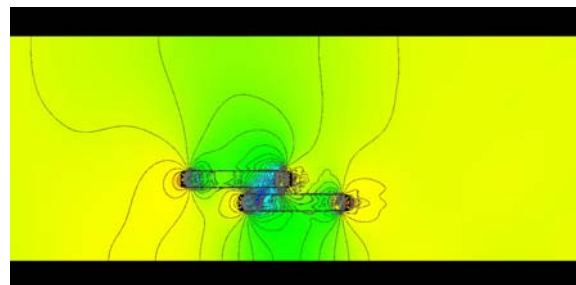


Abb. 11 Netzkonfiguration mit zwei Schiffseinheiten in einer gemeinsamen Berechnung.



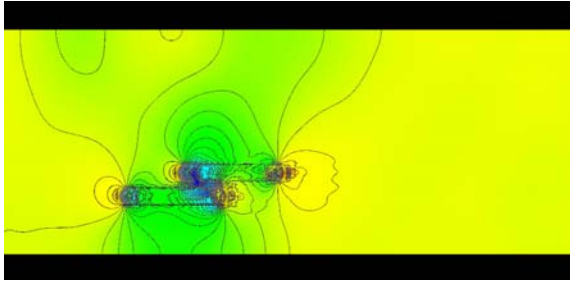


Abb. 12 Auslenkung der freien Oberfläche zu verschiedenen Zeitpunkten während des Überholvorgangs.

6 Schlußfolgerungen

- Die Kräfte und Momente beim Überholen und Begegnen werden durch Strömungseffekte und das durch die Oberflächenverformung hervorgerufene Gefälle verursacht. Bei geringer Wassertiefe ist diese Wechselwirkung besonders ausgeprägt.
- Die Sogwirkung des arbeitenden Propellers verstärkt diese Effekte auf flachem Wasser.
- Wegen der langen Wirkdauer ist das Überholmanöver wesentlich kritischer als Begegnen.
- Alle Kraftwirkungen sowie der Trimm und die Absenkung können unabhängig von Fahrtrichtung und Geschwindigkeitsverhältnis der beteiligten Fahrzeuge in einem mathematischen Modell zusammengefaßt werden.
- Durch Berechnung der Zusatzkräfte und -momente können Überholmanöver realitätsnah numerisch simuliert werden.
- Die Wechselwirkung der Wellensysteme beider Schiffe und deren dynamische Schwimmelage beim Überholen und Begegnen kann mit dem Flachwasserlöser BESHwa berechnet werden.
- Die neu entwickelte Overset-Methode ermöglicht die gemeinsame dreidimensionale Strömungssimulation um beliebige Konstellationen mit mehreren Schiffen und/oder Hindernissen mit minimalem Aufwand zur Netzgenerierung.

7 Ausblick

Die hier beschriebenen Untersuchungen der Wechselwirkung Schiff-Schiff werden in einem Anschlußvorhaben weitergeführt und auch auf die Wechselwirkung Schiff-Wasserstraße ausgedehnt. Das Ziel dieser Bemühungen ist die Erstellung einer Simulationsumgebung, die die Bewegung des Eigenschiffes in einer komplexen Verkehrssituation auf einem Fluß mit lokal veränderlicher Strömung wiedergibt.

Da die Fahrt des Eigenschiffes auch die Bewegung der Fremdschiffe beeinflusst, ist es anzustreben, auch diese vollständig hydrodynamisch zu modellieren, um wirklich realistische Simulationen von Überholmanövern berechnen zu können.

Vollständig instationäre Berechnungen sind noch sehr aufwendig und erfordern eine konsequente Parallelisierung zur Nutzung leistungsfähiger Großrechenanlagen. Je nach Bewegungsmodell sind dann auch Simulationen unter Berücksichtigung eigener dynamischer Freiheitsgrade (Absenkung, Vertrimmung, Rollen, ...), möglich.

Schrifttum

Baumgarten, B., List, S., Gronarz, A. (2005): INTERAKTION - Numerische und experimentelle Untersuchungen der Wirkung der Strömung auf das fahrende Schiff unter Berücksichtigung von Buhnen, Gewässerquerschnitten und Sohlbeschaffenheiten (Teilprojekt Buhneneinfluß: Experimentelle und numerische Bestimmung der Wirkung von Buhnen auf das Fahrverhalten von Schiffen). DST-Bericht Nr. 1728, Duisburg

Gronarz, A. (1997): Rechnerische Simulation der Schiffsbewegung beim Manövrieren unter besonderer Berücksichtigung der Abhängigkeit von der Wassertiefe. Dissertation, Gerhard-Mercator-Universität Gesamthochschule Duisburg

Jiang, T., Henn, R., Sharma, S.D. (2002): Wash Waves Generated by Ships Moving on Fairways of Varying Topography - Experimental and Numerical Results, 24th Symposium on Naval Hydrodynamics (ONR), Fukuoka, Japan, 8-13 July 2002 (auch www.dst-org.de)

Stuntz, N., Henn, R., Jiang, T., Steffen, R., Hänel, D., Vilsmeier, R., (2005): Simulationssoftware für hydrodynamische Probleme - Schiff und Antrieb in begrenzten Gewässern, www.dst-org.de