

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Report, Published Version

Henn, Rupert; Kaiser, Rainer; List, Sven

SICHERBIN - Verbesserung der Verkehrssicherheit auf Binnenwasserstraßen an Engpass- und Gefahrenstellen. Teil Teil C: Numerische Untersuchungen Bewegungssimulationen

DST-Bericht

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107237>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

DST - Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V. (Hg.) (2007):
SICHERBIN - Verbesserung der Verkehrssicherheit auf Binnenwasserstraßen an Engpass-
und Gefahrenstellen. Teil Teil C: Numerische Untersuchungen Bewegungssimulationen.
Duisburg: DST - Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V. (DST-
Bericht, 1818).

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten



Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.

DST - Development Centre for Ship Technology and Transport Systems

Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkennzeichen 03SX199

**SICHERBIN - Verbesserung der Verkehrssicherheit auf
Binnenwasserstraßen an Engpass- und Gefahrenstellen**

Teil C: Numerische Untersuchungen

Bericht 1818 - Februar 2007

von
Dipl.-Ing. Rupert Henn
Dipl.-Math. Rainer Kaiser
Dipl.-Ing. Sven List

Projektleiter:
Dr.-Ing. Tao Jiang

Direktor:
Prof. Dr. Paul Engelkamp


**SICHERBIN - Verbesserung der Verkehrssicherheit auf
Binnenwasserstraßen an Engpass- und Gefahrenstellen**


Teil C: Numerische Untersuchungen


Duisburg, im Februar 2007

Fachbereich Schiffshydrodynamik

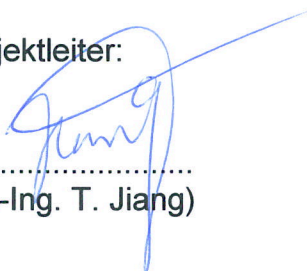
Bearbeiter:


.....
(Dipl.-Ing. Rupert Henn)

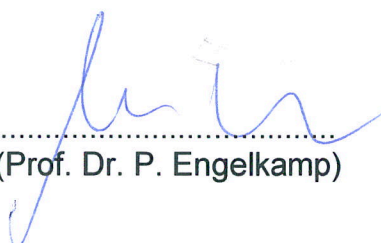

.....
(Dipl.-Math. Rainer Kaiser)


.....
(Dipl.-Ing. Sven List)

Projektleiter:


.....
(Dr.-Ing. T. Jiang)

DST - Entwicklungszentrum für
Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.


.....
(Prof. Dr. P. Engelkamp)

Inhalt

1	Kurzfassungen	5
1.1	Zusammenfassung	5
1.2	Summary	5
2	Flachwasserapproximation BESHiWa	6
2.1	Flachwassergleichungen vom Boussinesq-Typ	6
2.2	Randbedingungen	7
2.3	Modellierung der Schiffswirkung	8
2.4	Kopplung mehrerer Rechengebiete	9
2.5	Kopplung mit ANSYS-CFX	10
2.6	Rechenfälle	10
2.6.1	Zwei Leichter	12
2.6.2	Fahrgastschiff überholt Güterschiff	20
2.6.3	Containerschiff-Feeder	20
3	Potenziallöser UNOPAM	22
3.1	Grundlagen	22
3.2	Koordinatensystem	22
3.3	Zu lösendes Randwertproblem für nicht brechende Wellen	23
3.4	Bodenbedingung bei unebenem Boden; Strömung	24
3.5	Ansatz für das Potenzial	25
3.6	Körpernetz	26
3.7	Netz auf der Wasseroberfläche	26
3.8	Gleichungssystem für die Quellstärken	26
3.8.1	Bedingungen an der Wasseroberfläche	26
3.8.2	Weitere Gleichungen	27
3.8.3	Lösung des Gleichungssystems	28
3.8.4	Brechende Wellen	28
3.9	Zwei Leichter	30
3.9.1	Wasseroberflächennetz für kleine Geschwindigkeiten	38
3.10	Containerschiff-Feeder	47
4	Kopplung ANSYS-CFX mit BESHiWa-Ergebnissen	59
4.1	Aufgabenstellung	59
4.2	Verfahren	59
4.2.1	Erhaltungsgleichungen und Turbulenzmodellierung	59
4.2.2	Diskretisierung	60
4.3	Numerische Berechnungen	61

4.3.1	Beschreibung der Berechnungsfälle	61
4.3.2	Aufbereitung der Geometrie	65
4.3.3	Gittergenerierung und Randbedingungen.....	67
4.4	Ergebnisse	70
4.4.1	Berechnungsfall 1 – Überholvorgang Seeschiff - Seeschiff	70
4.4.2	Berechnungsfall 2 – Überholvorgang Fahrgastschiff - Motorgüterschiff	77
5	Weiterentwicklung des 3D-Feldlösers MOUSE zur vollständig gekoppelten, instationären Berechnung relativ zueinander beweglicher Schiffe	86
5.1	Grundzüge des Basislösers für Strömungen mit freier Oberfläche	86
5.2	Überarbeitung des Basislösers	89
5.3	Weiterentwicklung instationär inkompressibler Simulationsmethoden	90
5.3.1	Die duale Zeitschrittmethod	90
5.3.2	Druckkorrekturverfahren	91
5.3.3	Validierung der instationären Lösungsmethoden an einem Benchmark	92
5.3.4	Vergleich der dualen Zeitschrittmethod mit der Druckiterationsmethode	95
5.4	Erarbeitung eines Konzepts zur gekoppelten Berechnung mehrerer, relativ bewegter Objekte mittels Overset-Methode	95
5.5	Prinzipielle Möglichkeiten zur gekoppelten Simulation relativ bewegter Objekte	96
5.5.1	Die Overset-Objekt-Methode	99
5.6	Anwendung der entwickelten Methoden	107
5.6.1	Überholvorgang zweier Schiffe (Seeschiff-Seeschiff)	107
5.6.2	Simulation der Begegnung zweier Seeschiffe	118
5.7	Simulation der Begegnung zweier Leichter.....	122
6	Literatur	127

1 Kurzfassungen

1.1 Zusammenfassung

Die numerischen Untersuchungen wurden mit vier verschiedenen Verfahren durchgeführt. Da die Verfahren selbst im Rahmen des Projekts weiterentwickelt wurden, wurden nicht nur Berechnungen mit Binnenschiffen sondern auch Berechnungen mit Seeschiffen durchgeführt. Es wurde dabei versucht, die Stärken der einzelnen Verfahren auszunutzen und zu kombinieren. Mit dem Flachwasserlöser BESHiWa können große Rechengebiete effizient berechnet werden. Das Verfahren wurde so erweitert, dass beliebig viele Schiffe einander passieren können. Es liefert das Wellenbild und die dynamischen Schwimmlagen der einzelnen Schiffe. Der Potenziallöser Unopam wurde ebenfalls erweitert, so dass zwei sich überholende Schiffe berechnet werden können. Dieses Verfahren liefert zusätzlich auch noch die Kräfte und Momente, die auf die Schiffe wirken. Die mit BESHiWa berechneten Wasseroberflächen und Schwimmlagen wurden als Randbedingung im kommerziellen RANSE-Löser CFX verwendet, um ebenfalls die hydrodynamischen Kräfte und Momente beim Überholen zu berechnen. Die umfangreichste Erweiterung hat die Eigenentwicklung MOUSE erfahren. Dieser RANSE-Löser ist jetzt in der Lage, das Wellenbild und die hydrodynamischen Kräfte mehrerer passierender Schiffe instationär zu berechnen.

1.2 Summary

The numerical investigations were performed using four different methods. Since the methods have been enhanced within this project, not only inland vessels but also seagoing ships have been integrated into the calculations. It was intended, to use and combine the strengths of each method. The shallow water solver BESHiWa can be used to calculate efficiently large domains. This method has been advanced in such a way, that an arbitrary number of passing vessels can be simulated. It provides the wave pattern and the dynamic trim of each ship. The potential solver Unopam has also been improved to calculate two overtaking ships. This method additionally yields the hydrodynamic forces and moments affecting on the hulls. The water surfaces and the dynamic trim that have been calculated with BESHiWa, have been used as boundary condition for the commercial RANSE-solver CFX, to calculate the hydrodynamic forces and moments. The self-developed RANSE-solver MOUSE has undergone the most extensive enhancement. Now this method can calculate the unsteady wave pattern and hydrodynamic forces and moments of an arbitrary number of passing ships.

2 Flachwasserapproximation BESHwa

Das Programm BESHwa ist ein bewährtes Verfahren zur Berechnung der Wellenausbreitung im flachen Wasser. Die Beschreibung des Strömungsgebiets durch Flachwassergleichungen vom Boussinesq-Typ ermöglicht es, große Gebiete numerisch effizient berechnen zu können. Die Modellierung der Schiffswirkung erfolgt mit der Schlankkörpertheorie, womit sich die dynamische Schwimmlage (Trimm und Absenkung, Squat), die im flachen Wasser eine besondere Bedeutung hat, berechnen lässt.

2.1 Flachwassergleichungen vom Boussinesq-Typ

Das Verfahren BESHwa (Boussinesq Equations for Ship Waves) basiert auf erweiterten Flachwassergleichungen vom Boussinesq-Typ. Diese Gleichungen beschreiben die Wellenausbreitung in einem Strömungsgebiet mit endlicher Wassertiefe, die örtlich variieren kann aber zeitlich konstant ist. Es wird dabei eine reibungs- und rotationsfreie Strömung vorausgesetzt.

Unter der Annahme, dass die Wellenhöhe kleiner und die Wellenlänge größer als die Wassertiefe sind, werden die Kontinuitäts- und die Impulsgleichungen vertikal integriert. Dabei gehen die kinematischen Randbedingungen am Boden und an der freien Oberfläche und die dynamische Randbedingung an der freien Oberfläche in die Integration mit ein. Die Darstellung des Strömungsfeldes erfolgt nun anhand der momentanen lokalen Wellenerhebung $\zeta(x, y, t)$ und der vertikal gemittelten horizontalen Geschwindigkeitskomponenten

$$\bar{u}(x, y, t) = \frac{1}{h(x, y) + \zeta(x, y, t)} \int_{-h}^{\zeta} u(x, y, t) dz \quad (2.1)$$

und

$$\bar{v}(x, y, t) = \frac{1}{h(x, y) + \zeta(x, y, t)} \int_{-h}^{\zeta} v(x, y, t) dz \quad (2.2)$$

Das dreidimensionale Strömungsgebiet kann so durch eine zweidimensionale Geschwindigkeitsverteilung und die Wellenerhebung beschrieben werden. Das numerische Problem wird damit um eine Dimension verringert und kann entsprechend effizient gelöst werden. Auch sind die Randbedingungen am Boden und an der freien Oberfläche in den Boussinesq-Gleichungen implizit erfüllt und bedürfen keiner weiteren numerischen Behandlung.

Es ergeben sich schließlich folgende Gleichungen:

$$\zeta_t - V\zeta_x + (\zeta + h)(u_x + v_y) + (\zeta_x + h_x)u + (\zeta_y + h_y)v = 0 \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned}
 & u_t - Vu_x + uu_x + vu_y + g\zeta_x \\
 & - \frac{h}{2} [h_{xx}u_t + 2h_xu_{tx} + hu_{txx} + h_{xy}v_t + h_yv_{tx} + h_xv_{ty} + hv_{txy} \\
 & - V(h_{xx}u_x + 2h_xu_{xx} + hu_{xxx} + h_{xy}v_x + h_yv_{xx} + h_xv_{xy} + hv_{xxy})] \\
 & + \frac{h^2}{6} (1 - 6C_{BQ}) [u_{txx} + v_{txy} - V(u_{xxx} + v_{xxy})] \\
 & + gh^2C_{BQ} (\zeta_{xxx} + \zeta_{xyy}) = -\frac{p_x}{\rho} + c_F \frac{\rho u_b |u_b|}{2 h + \zeta}
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

$$\begin{aligned}
 & v_t - Vv_x + uv_x + vv_y + g\zeta_y \\
 & - \frac{h}{2} [h_{xy}u_t + h_yu_{tx} + h_xu_{ty} + hu_{txy} + h_{yy}v_t + 2h_yv_{ty} + hv_{tyy} \\
 & - V(h_{xy}u_x + h_xu_{xy} + h_yu_{xx} + hu_{xxy} + h_{yy}v_x + 2h_yv_{xy} + hv_{xyy})] \\
 & + \frac{h^2}{6} (1 - 6C_{BQ}) [u_{txy} + v_{tyy} - V(u_{xxy} + v_{xyy})] \\
 & + gh^2C_{BQ} (\zeta_{xxy} + \zeta_{yyy}) = -\frac{p_y}{\rho} + c_F \frac{\rho v_b |v_b|}{2 h + \zeta}
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Zur besseren Lesbarkeit wurden die Überstriche bei den gemittelten Geschwindigkeiten hier weggelassen. p ist der Druck auf der freien Oberfläche; ohne äußere Störung ist dies der konstante Luftdruck.

Die Gleichungen beschreiben das Strömungsgebiet in einem Koordinatensystem, das sich mit der Geschwindigkeit V in x -Richtung bewegt, oder das erdfest ist ($V = 0$). Weiterhin beinhalten sie eine Dispersionskorrektur, mit der das Dispersionsverhalten kurzer Wellen verbessert werden kann. Hierzu nimmt der Parameter C_{BQ} Werte zwischen 0 und -0.0572 an. Eine ausführliche Beschreibung der Herleitung und eine Diskussion der Dispersionskorrektur gibt Jiang [J11].

In den Impulsgleichungen (2.4) und (2.5) finden sich auf der rechten Seite Reibungsterme, die die Bodenrauigkeit berücksichtigen. Der Reibungsbeiwert c_F für den Versuchstank entspricht dem Reibungsbeiwert einer parallel angeströmten Platte (z. B. nach Schlichting [SL1]).

2.2 Randbedingungen

Im Gegensatz zu potentialtheoretischen Paneelverfahren und Euler- und RANSE-Verfahren wird die freie Oberfläche durch die Flachwassergleichungen implizit bestimmt und muss nicht gesondert ermittelt werden.

An den Kanalwänden wird eine Tangentialflussbedingung angesetzt, die zu einer Totalreflexion führt. Dies entspricht exakt den Bedingungen bei den Modellversuchen, die mit BESH*i*Wa berechnet wurden.

An den offenen Ein- und Ausströmrändern werden Sommerfeld-Randbedingungen angewendet. Diese erlauben das Ein- und Auslaufen von Wellen in und aus dem Rechengebiet. Dies ist von besonderer Bedeutung bei der Berechnung instationärer Vorgänge. Da die Simulation immer im Stillstand beginnt und das beschleunigte Schiff eine Welle erzeugt, die vor dem Schiff nach vorne wegläuft, ist es wichtig, dass diese Welle das Rechengebiet gegen die Zuströmung verlassen kann.

Am Boden wird ebenfalls implizit eine Tangentialflussbedingung angesetzt. Hinzu kommen aber noch die in den Gleichungen (2.4) und (2.5) aufgeführten Reibungsterme. Es hat sich allerdings gezeigt, dass die Bodenreibung ohne vorhandene Grundströmung wenig Einfluss auf die Wellenbildung und die dynamische Schwimmelage der Schiffe hat.

2.3 Modellierung der Schiffswirkung

Die Verdrängungswirkung des Schiffsrumpfs auf die Strömung wird mit Hilfe der Schlankkörpertheorie modelliert. Nach der „Methode der asymptotischen angepassten Entwicklungen“ werden anhand einer entsprechenden Skalierungsanalyse die schiffsnaher Strömung und die Fernfeldströmung asymptotisch verknüpft. So ergibt sich die mittlere transversale Geschwindigkeitskomponente aus der asymptotischen Außenentwicklung der Nahfeldlösung für das Fernfeld:

$$\bar{v}\Big|_{y \rightarrow 0^\pm} = \mp \frac{V}{2h} S_x(x), \quad (2.6)$$

siehe z.B. Mei and Choi (1986). Diese Beziehung wurde von Chen und Sharma (1995) wie folgt verbessert

$$\bar{v}\Big|_{y \rightarrow 0^\pm} = \mp \frac{1}{2(h + \zeta)} [S(x, t)(V - \bar{u})]_x. \quad (2.7)$$

Es hat sich gezeigt, dass eine vereinfachte Berechnung der Spantflächen gemäß

$$S(x, t) = S_0(x) + [z_V + x \sin \theta + \zeta] B(x) \quad (2.8)$$

zu ungenau ist. Die Spantflächen werden deshalb aus der dreidimensional beschriebenen Schiffsgometrie bei der Berechnung der Schwimmelage ermittelt.

Nach jedem Iterationsschritt wird die Schwimmelage des Schiffes neu berechnet. Hierbei müssen das Kraftgleichgewicht in vertikaler Richtung und das Momentengleichgewicht um die Querachse erfüllt sein. Trägheitseffekte werden dabei vernachlässigt. Es gelten also

$$\nabla = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} S(x) dx \quad (2.9)$$

und

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} S(x)x dx = 0. \quad (2.10)$$

Diese beiden Gleichungen werden iterativ gelöst, wobei die lokale Wellenerhebung in die Berechnung der Spantflächen mit eingeht. Die berechneten Spantflächen gehen dann im nächsten Zeitschritt wieder in die Berechnung der Quergeschwindigkeit nach (2.7) mit ein.

Es wurde gezeigt, dass die dynamische Schwimmelage für ein einzeln fahrendes Schiff sehr zuverlässig berechnet werden kann. Der Einfluss der Interaktion zweier passierender Schiffe auf die dynamische Schwimmelage wird weiter unten diskutiert.

Eine zuverlässige Berechnung der Kräfte, die auf den Schiffsrumpf wirken, ist mit dieser Methode nicht möglich.

2.4 Kopplung mehrerer Rechengebiete

BEShiWa wurde entwickelt, um die Ausbreitung von Schiffswellen zu berechnen, die von einem Schiff erzeugt werden. Während es ohne weiteres möglich gewesen wäre, ein zweites Schiff in Form einer weiteren Quell-Senken-Verteilung in das Rechengebiet einzubringen, wurde bei der Erweiterung des Verfahrens ein verallgemeinerter Ansatz gewählt: In einem Rechengebiet befindet sich weiterhin maximal ein Schiff. Mehrere Rechengebiete können aber gekoppelt werden, so dass das gesamte Rechengebiet aus mehreren Teilgebieten zusammengesetzt wird. Diese Technik eröffnet die Möglichkeit, die einzelnen Schiffe mit Ihren Teilgebieten nicht nur entlang der x -Richtung fahren zu lassen, sondern auf beliebigen Bahnen. Außerdem kann das Gesamtproblem auf mehreren Prozessoren parallel gelöst werden.

Damit die Kopplung funktioniert, müssen sich die benachbarten Gebiete überlappen. Diese Bereiche werden „Kopplungszonen“ genannt. Es ist aber durchaus auch möglich, dass sich ein kleines Teilgebiet vollständig innerhalb eines großen Gebiets befindet.

Die Kopplung erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt werden die Strömungsgleichungen innerhalb jedes Teilgebiets für den aktuellen Zeitschritt getrennt gelöst. Es ergibt sich daraus die Feldgröße für den neuen Zeitschritt. In den Kopplungszonen werden dann im zweiten Schritt die Feldgrößen zwischen den beteiligten Teilgebieten

mit einer Gewichtung interpoliert, die mit zunehmendem Abstand vom Teilgebiet immer kleiner wird. Es ist Voraussetzung für dieses Verfahren, dass die Breite der Kopplungszone größer ist als der Weg, den eine Störung innerhalb eines Zeitschritts zurücklegen kann. Störungen sind in diesem Fall die Wasserwellen, deren Geschwindigkeit auf \sqrt{gh} begrenzt ist. Die eigentliche Kopplung, d.h. der Informationsaustausch zwischen den Teilgebieten, erfolgt dadurch, dass die Feldgrößen innerhalb der Kopplungszonen selbst als Randbedingung für die Teilgebiete dienen. Es gilt hier zwei Kopplungstechniken zu unterscheiden. Bei der „weichen“ Kopplung werden nur die Feldgrößen in den Teilgebieten durch die Größen aus den Kopplungszonen überschrieben, während innerhalb des Zeitschritts die eigentlichen Feldgleichungen gelöst werden. Bei der „harten“ Kopplung dienen die Feldgrößen in den Kopplungszonen direkt als Randbedingung. In den hier vorgestellten Berechnungen wird immer mit der weichen Kopplung gearbeitet.

2.5 Kopplung mit ANSYS-CFX

Im Gegensatz zur interaktiven Kopplung mehrerer Rechengebiete innerhalb von BESHiWa, war die Kopplung mit dem RANSE-Löser CFX nicht interaktiv. Zuerst wurde mit BESHiWa der Rechenfall solange simuliert, bis sich ein stationärer Zustand eingestellt hatte. In diesem stationären Zustand wurden die dynamischen Schwimmlagen beider Schiffe ermittelt. Die Geometrie der freien Oberfläche wurde in eine STL-Datei geschrieben, die in CFX als eine das Rechengebiet nach oben begrenzende Fläche importiert wird. Die Schiffe werden entsprechend der aus BESHiWa ermittelten dynamischen Schwimmlage vertrimmt im Rechengebiet positioniert.

2.6 Rechenfälle

Zwei beispielhafte Fälle sollen zunächst die Eignung von BESHiWa zum Berechnen solcher Manöver demonstrieren. Zuerst überholt ein typisches Binnengüterschiff mit einer Länge von 110 m mit 20,2 km/h ein Fahrgastschiff mit einer Länge von 40 m, das 15,1 km/h schnell fährt; die Wassertiefe beträgt 5 m. In Abb. 2.1 ist eine Zeitreihe der Wellenbilder dargestellt. Am Anfang ist sehr deutlich die Beschleunigungswelle des großen Güterschiffs zu erkennen. Es bildet sich dann das primäre und sekundäre Wellensystem aus. Das Wellensystem des Fahrgastschiffs ist aufgrund seiner kleineren Geschwindigkeit und seiner geringeren Verdrängung wesentlich schwächer ausgeprägt. Während des Überholens wird das Fahrgastschiff vom Wellensystem des Güterschiffs voll erfasst. Im zweiten Beispiel begegnen sich die beiden Schiffe, wobei das Fahrgastschiff jetzt 20,2 km/h und das Güterschiff 17,6 km/h fährt. Das Wellensystem des Güterschiffs ist entsprechend schwächer ausgeprägt, das des Fahrgastschiffes umso stärker. Beide Wellensysteme durchdringen sich beim Begegnen und beide Schiffe durchfahren damit auch die Wellensysteme des jeweils begegnenden Schiffs.

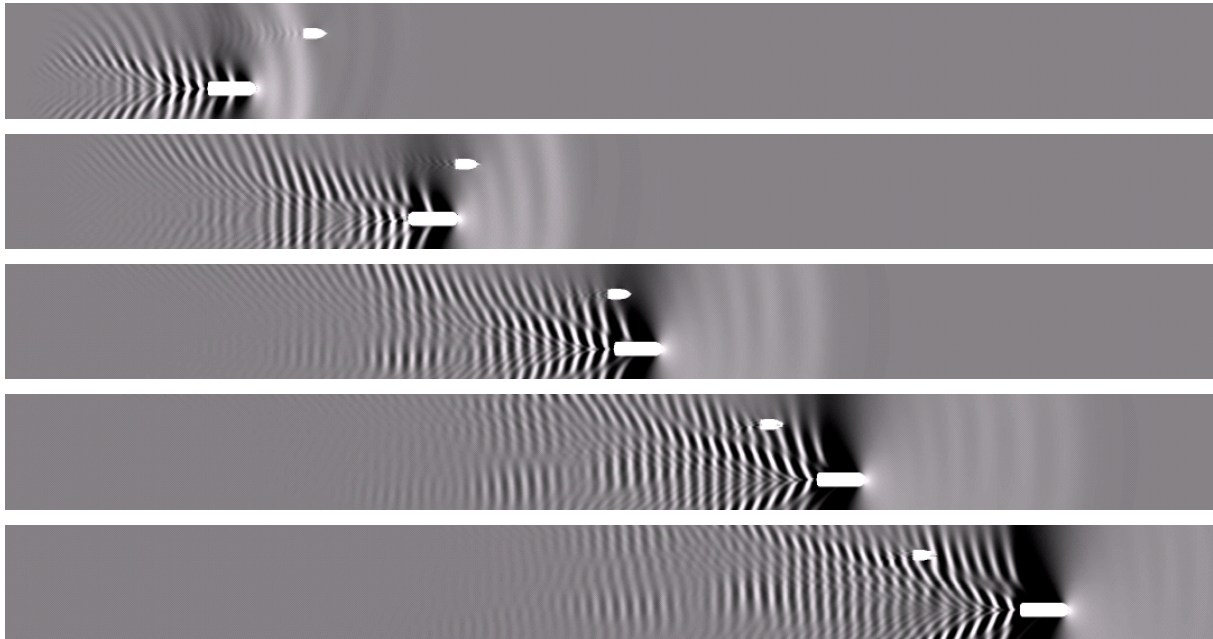


Abb. 2.1 Ein Güterschiff überholt ein Fahrgastschiff

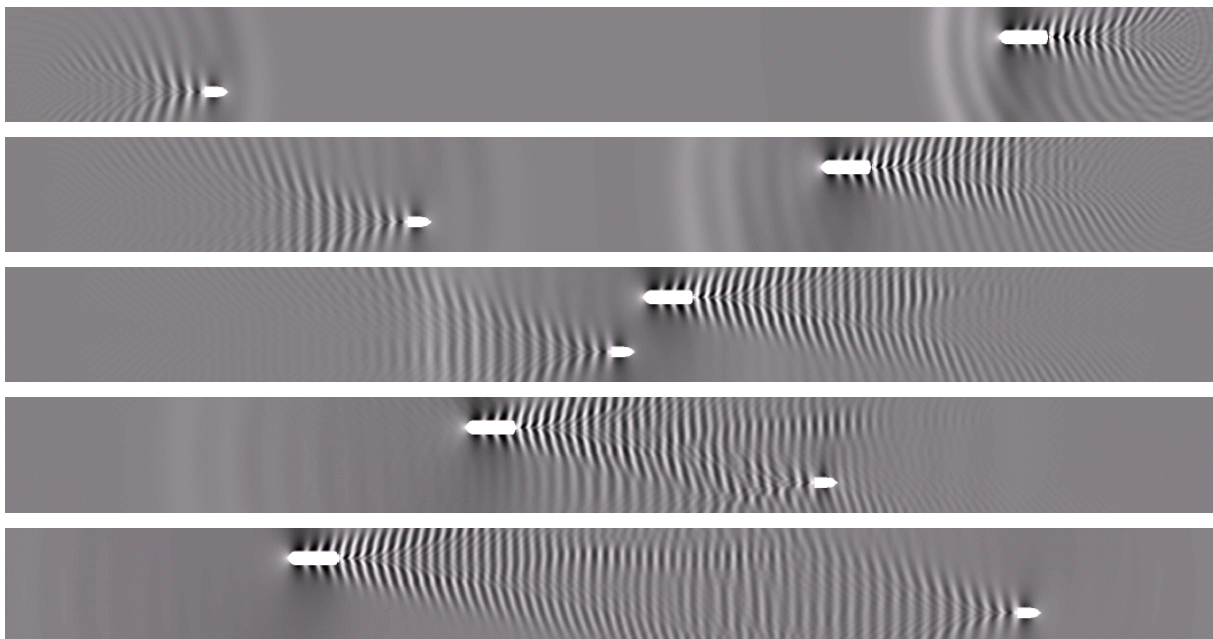


Abb. 2.2 Ein Güterschiff und ein Fahrgastschiff begegnen sich

Innerhalb dieses Forschungsvorhabens wurde eine ausgedehnte Reihe verschiedener Konfigurationen experimentell untersucht. Drei davon wurden mit BEShiWa numerisch untersucht.

2.6.1 Zwei Leichter

Die erste Konfiguration besteht aus zwei Leichtern, die sich überholen und begegnen. Dabei wurden die Geschwindigkeiten und die Passierabstände variiert. Die gleichen Manöver wurden mit BESH*i*Wa berechnet. Im Folgenden werden Trimm und Absenkung aus den Berechnungen und aus den Versuchen gegenübergestellt.

2.6.1.1 Überholen

Die Kurven für Trimm und Absenkung in Abb. 2.3 zeigen eine qualitative Übereinstimmung zwischen den Berechnungen (Linien) und den Messungen (Kreissymbole). Die nicht ganz zufrieden stellenden Ergebnisse sind in dem engen Passierabstand begründet, der eine unzureichend schmale Kopplungszone erforderlich macht. Das Verfahren bleibt numerisch zwar stabil, jedoch ist in der Zeitreihe der Wellenbilder in Abb. 2.4 zu erkennen, dass sich die Wellensysteme kaum in das jeweils andere Teilgebiet ausdehnen. Die gleiche Problematik zeigt sich zunehmend für höhere Geschwindigkeiten auch in den nächsten beiden Fällen, in denen der Abstand ebenfalls 2,5 m betrug.

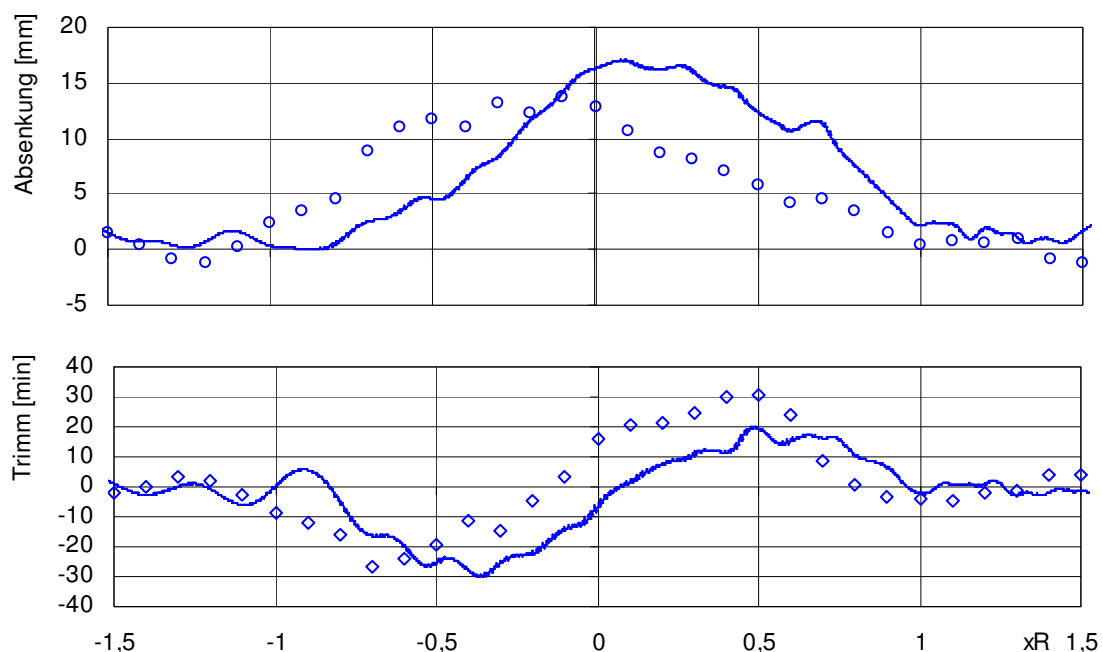


Abb. 2.3 Trimm und Absenkung des überholten Leichters aufgetragen über der dimensionslosen Relativposition. Der Überholer fährt mit 13,4 km/h, der überholte Leichter mit 6 km/h. Der Abstand zwischen den Bordwänden beträgt 2,5 m.

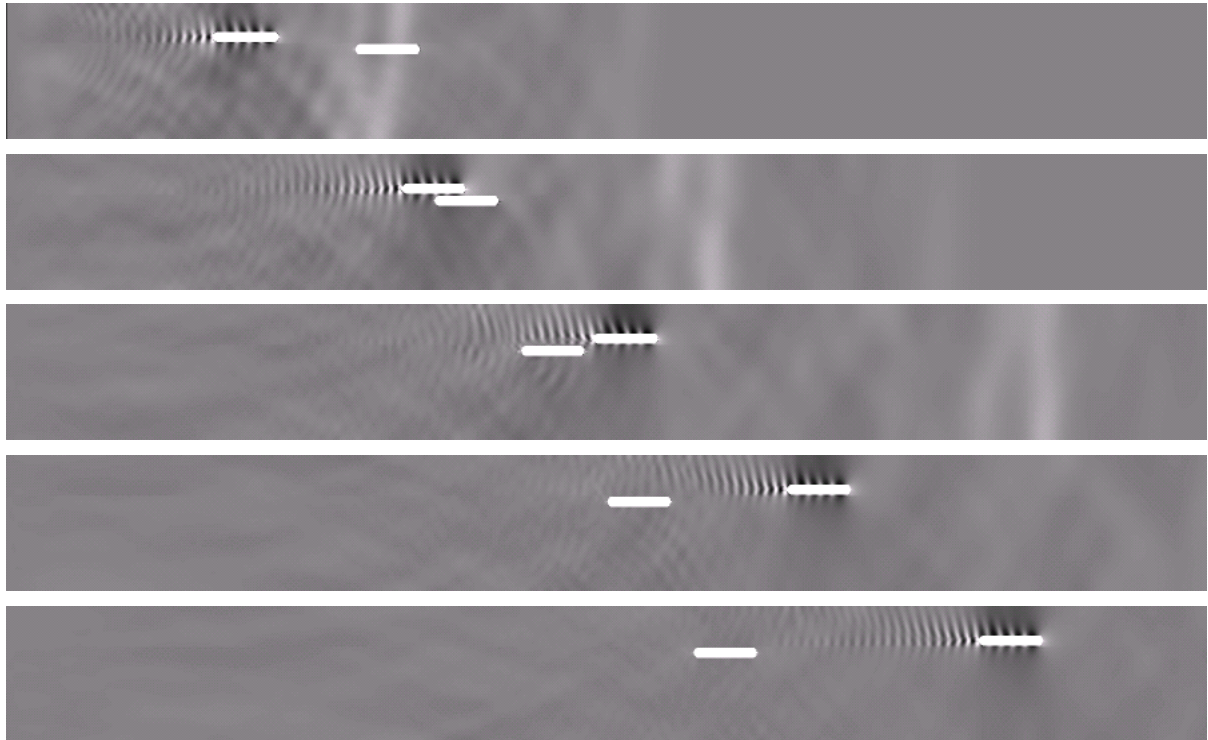


Abb. 2.4 Zeitreihe der Wellenbilder (zu Abb. 2.3) im Intervall von 60 s



Abb. 2.5 Darstellung des Teilgebiets für den Überholer (zu Abb. 2.4)

Mit zunehmendem Abstand zwischen den Leichtern zeigt sich eine bessere Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Werte für Trimm und Absenkung. In den Wellenbildern in Abb. 2.10 zeigt sich dementsprechend auch eine verbesserte Ausbreitung der Wellensysteme über die Kopplungszone hinweg.

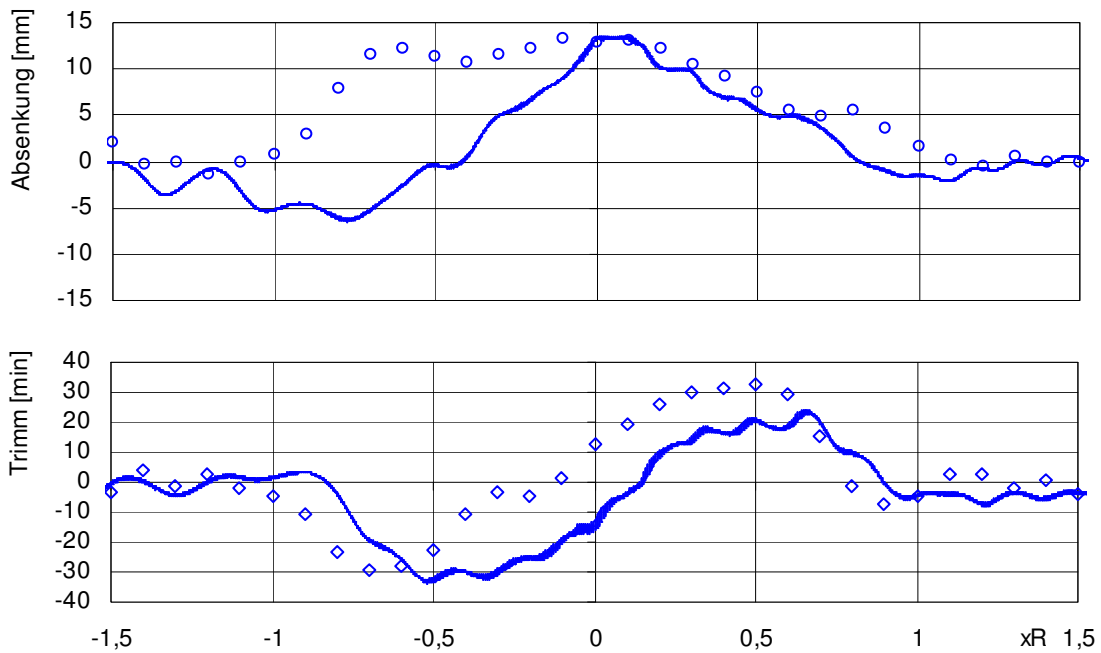


Abb. 2.6 Trimm und Absenkung des überholten Leichters aufgetragen über der dimensionslosen Relativposition. Der Überholer fährt mit 13,4 km/h, der überholte Leichter mit 9 km/h. Der Abstand zwischen den Bordwänden beträgt 2,5 m.

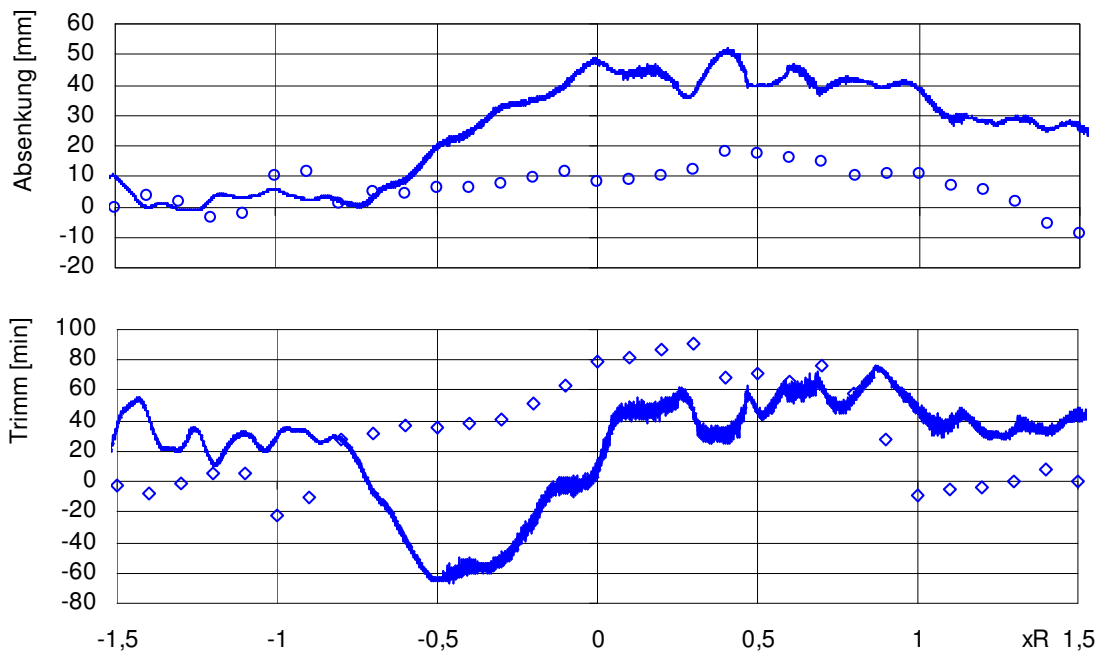


Abb. 2.7 Trimm und Absenkung des überholten Leichters aufgetragen über der dimensionslosen Relativposition. Der Überholer fährt mit 13,4 km/h, der überholte Leichter mit 13 km/h. Der Abstand zwischen den Bordwänden beträgt 2,5 m.

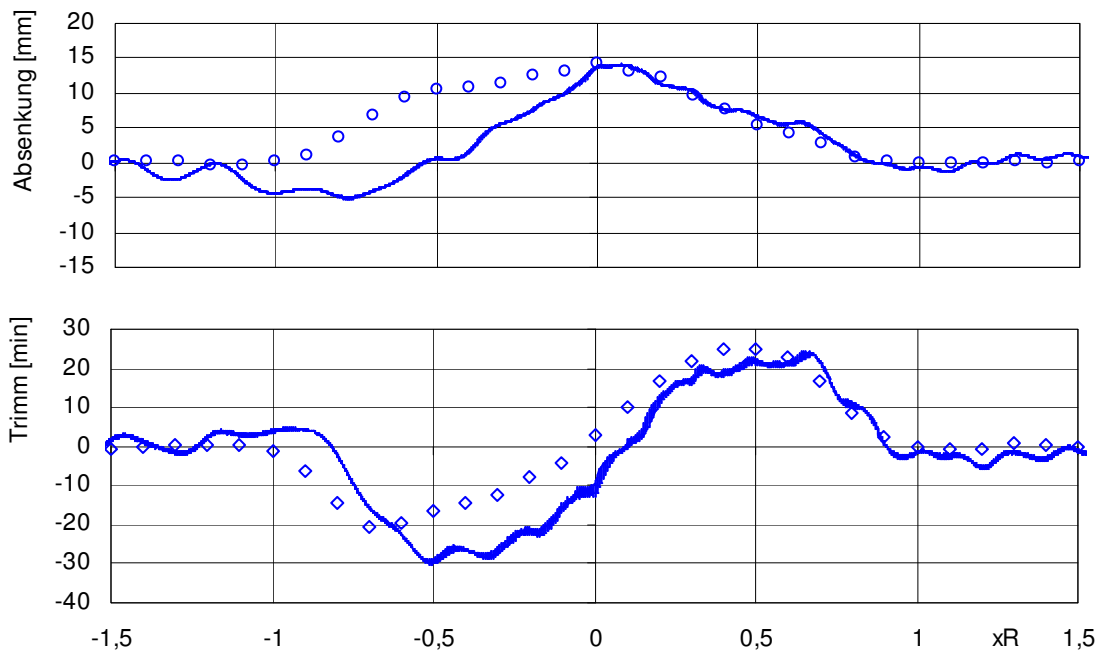


Abb. 2.8 Trimm und Absenkung des überholten Leichters aufgetragen über der dimensionslosen Relativposition. Der Überholer fährt mit 13,4 km/h, der überholte Leichter mit 9 km/h. Der Abstand zwischen den Bordwänden beträgt 5 m.

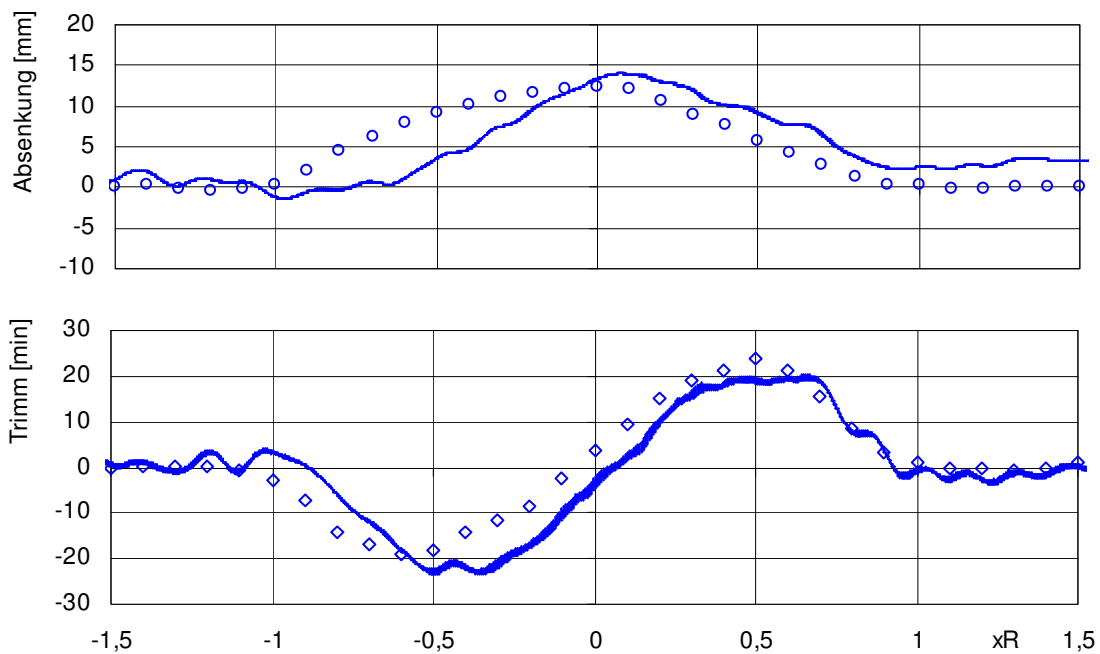


Abb. 2.9 Trimm und Absenkung des überholten Leichters aufgetragen über der dimensionslosen Relativposition. Der Überholer fährt mit 13,4 km/h, der überholte Leichter mit 9 km/h. Der Abstand zwischen den Bordwänden beträgt 10 m.

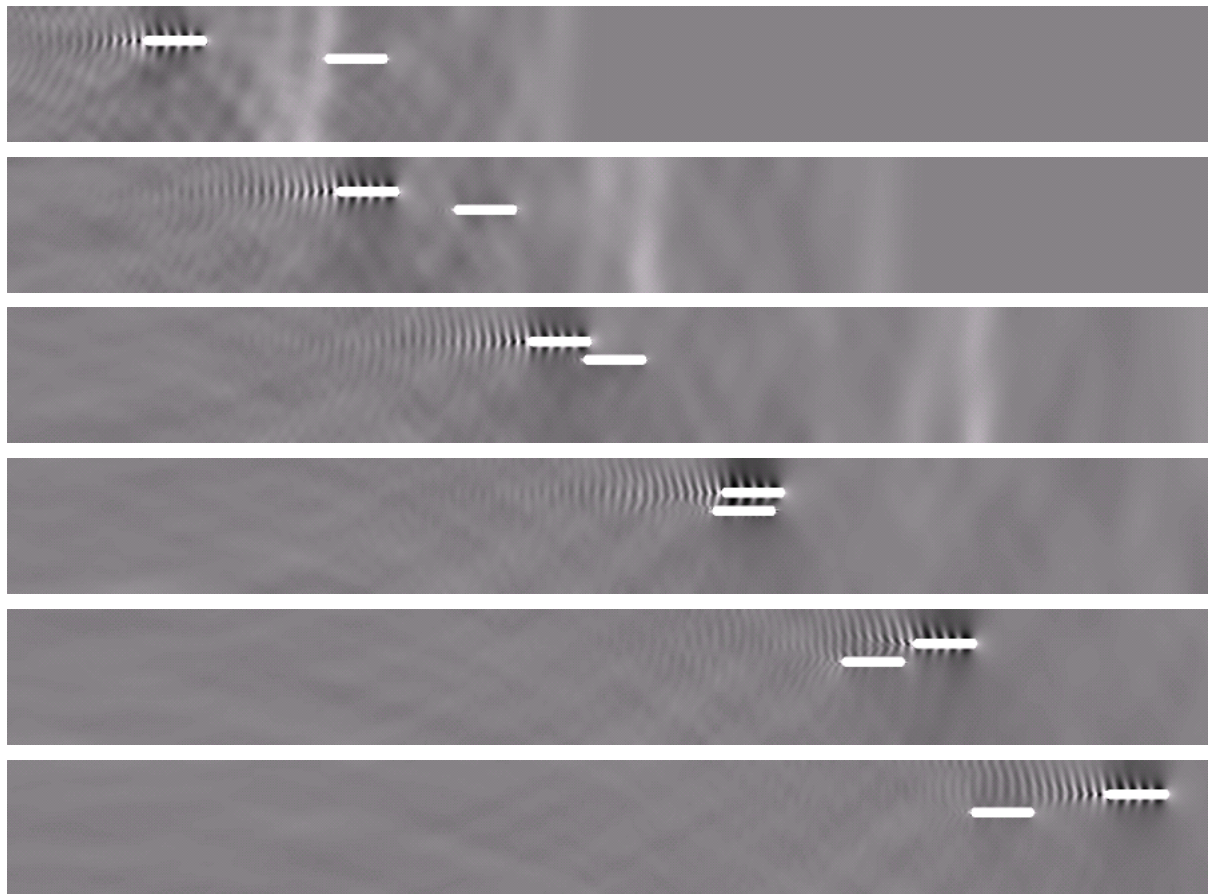


Abb. 2.10 Zeitreihe der Wellenbilder (zu Abb. 2.9) im Intervall von 60 s

2.6.1.2 Begegnen

Neben den Überholmanövern wurde auch das Begegnen numerisch untersucht. Die folgenden Abbildungen zeigen Trimm und Absenkung aufgetragen über der dimensionslosen Relativposition. Es zeigt sich dabei eine gute Übereinstimmung zwischen Berechnungen und Versuch. Besonders beim Überholen fallen hochfrequente Schwingungen in den Zeitschrieben der Berechnung auf. Diese rühren daher, dass das Schiff innerhalb des Gitters von Gitterpunkt zu Gitterpunkt springt und sich nicht kontinuierlich bewegt. Der Sprung findet – abhängig von Geschwindigkeit und Zeitschrittdauer – ca. alle vier Zeitschritte statt. Da die Berechnung von Trimm und Absenkung aber nach jedem Zeitschritt erfolgt, entstehen hier die dargestellten Schwingungen. Die könnten aber auch ohne Fehler zeitlich gemittelt und damit geglättet werden.

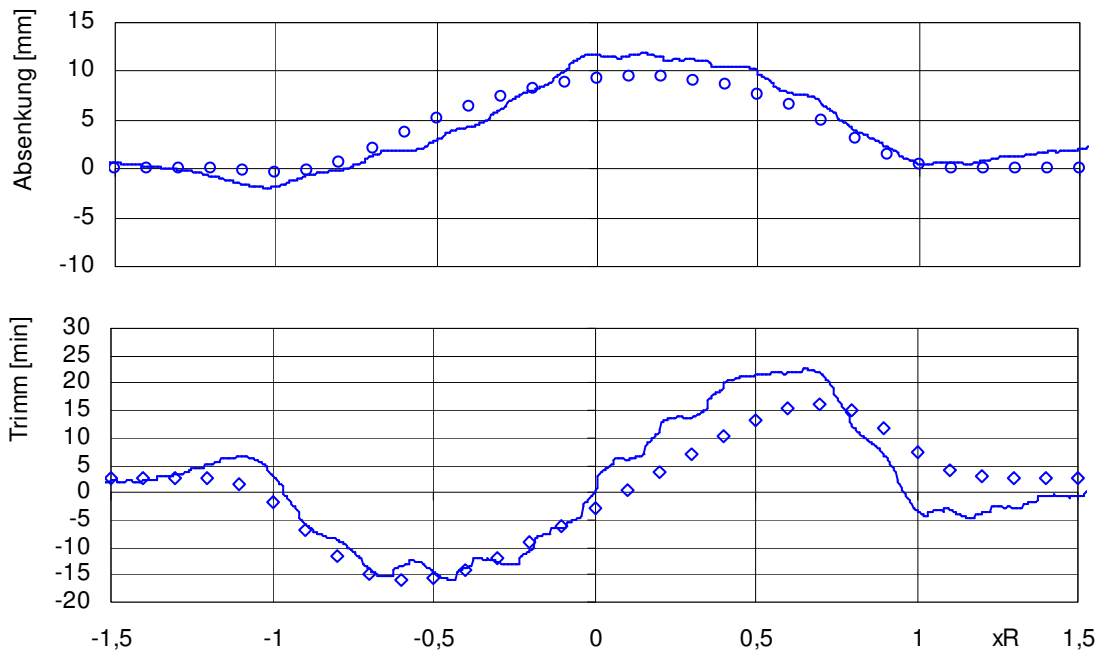


Abb. 2.11 Trimm und Absenkung des langsameren Leichters beim Begegnen aufgetragen über der dimensionslosen Relativposition. Der erste Leichter fährt mit 13,4 km/h, der zweite mit 6 km/h. Der Abstand zwischen den Bordwänden beträgt 2,5 m.

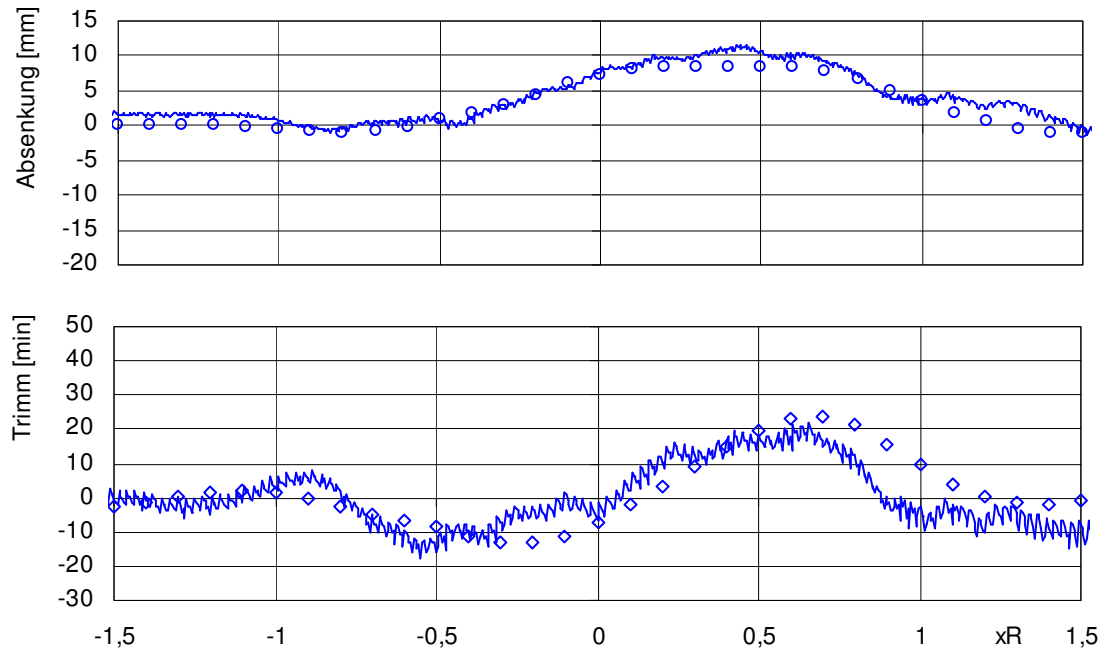


Abb. 2.12 Trimm und Absenkung des langsameren Leichters beim Begegnen aufgetragen über der dimensionslosen Relativposition. Beide Leichter fahren mit 13,4 km/h. Der Abstand zwischen den Bordwänden beträgt 2,5 m.

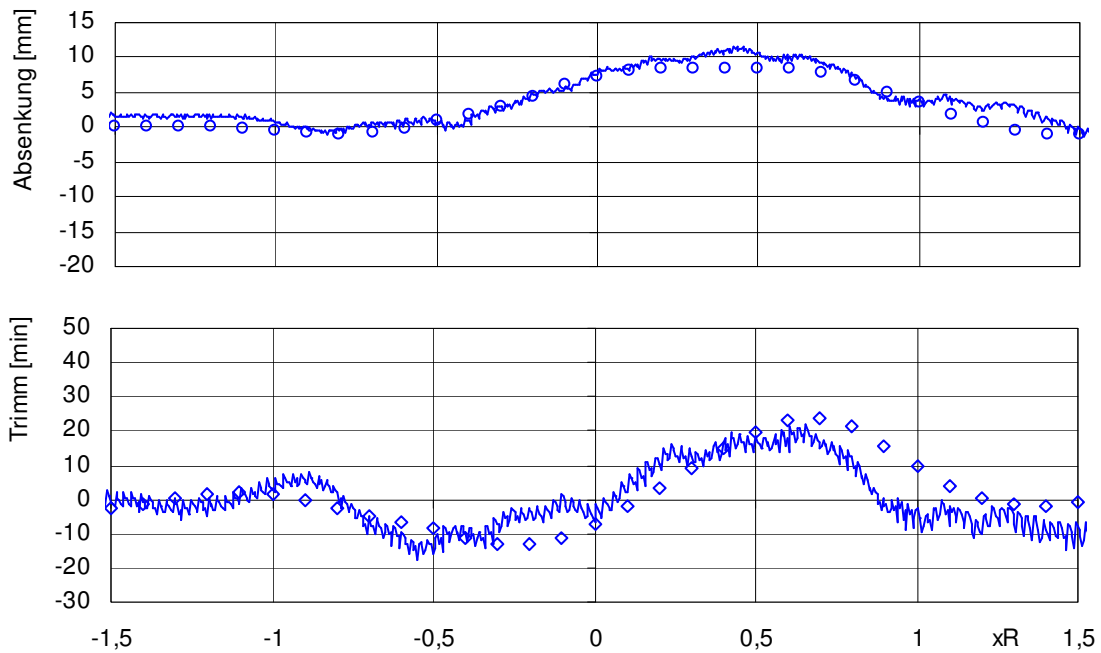


Abb. 2.13 Trimm und Absenkung des langsameren Leichters beim Begegnen aufgetragen über der dimensionslosen Relativposition. Beide Leichter fahren mit 15,1 km/h. Der Abstand zwischen den Bordwänden beträgt 2,5 m.

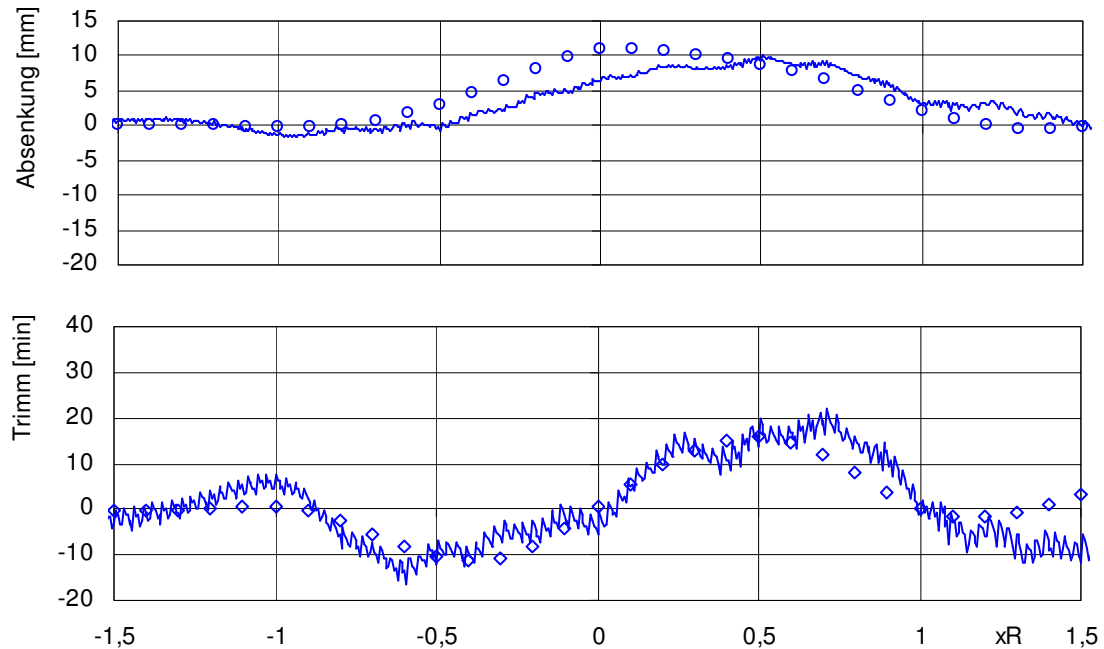


Abb. 2.14 Trimm und Absenkung des langsameren Leichters beim Begegnen aufgetragen über der dimensionslosen Relativposition. Beide Leichter fahren mit 13,4 km/h. Der Abstand zwischen den Bordwänden beträgt 5 m.

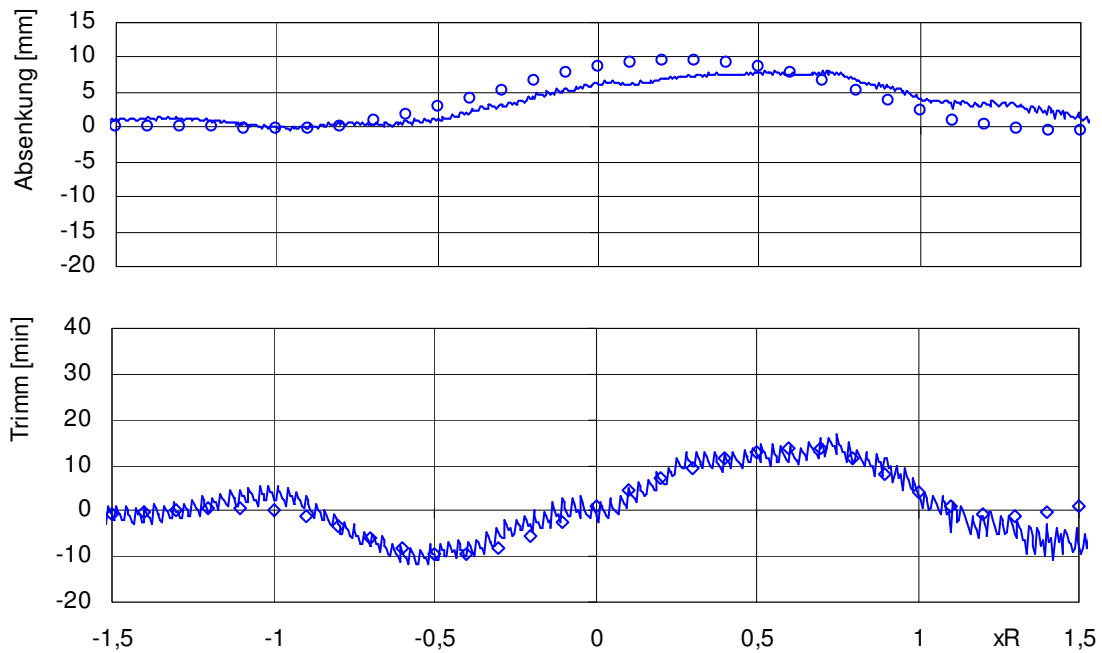


Abb. 2.15 Trimm und Absenkung des langsameren Leichters beim Begegnen aufgetragen über der dimensionslosen Relativposition. Beide Leichter fahren mit 13,4 km/h. Der Abstand zwischen den Bordwänden beträgt 10 m.

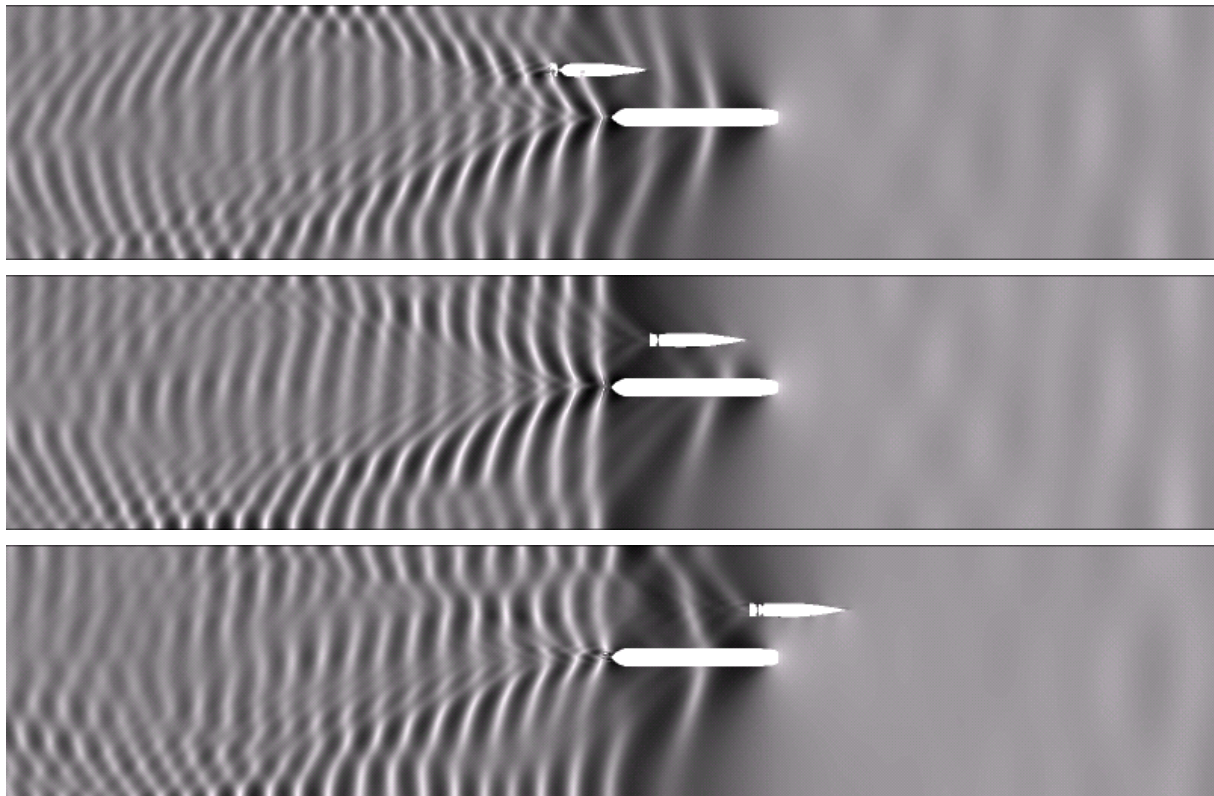


Abb. 2.16 Wellenbilder beim Überholen eines Güterschiffs durch ein Fahrgastschiff
($h = 4\text{m}$, $V = 18\text{ km/h}$)

2.6.2 Fahrgastschiff überholt Güterschiff

Eine weitere Konfiguration, die mit BESHwa berechnet wurde, ist das Überholmanöver eines Fahrgastschiffes. Diese Berechnungen dienen nur dazu, die dynamische Schwimmlage und die freie Oberfläche zu ermitteln, um sie anschließend im RANSELöser CFX als Vorgaben zu verwenden. Damit wurden im zweiten Schritt die hydrodynamischen Kräfte, die auf die Schiffe wirken, berechnet. Aus diesem Grund wurde die Berechnung quasistationär durchgeführt: Beide Schiffe fahren mit gleicher Geschwindigkeit, allerdings in verschiedenen Relativpositionen. Die folgenden Abbildungen zeigen die dabei berechneten Wellenbilder.

2.6.3 Containerschiff-Feeder

Die dritte Konfiguration, die untersucht wurde, ist ein Überholmanöver eines Containerschiffs im flachen Wasser. Hier überholt ein großes Containerschiff ein kleines Feederschiff. Die Berechnung wurde ebenfalls quasistationär bei einer Geschwindigkeit von 15 kn berechnet, mit dem Ziel, die freie Oberfläche und die dynamischen Schwimmlagen beider Schiffe als Vorgabe in CFX zu verwenden.

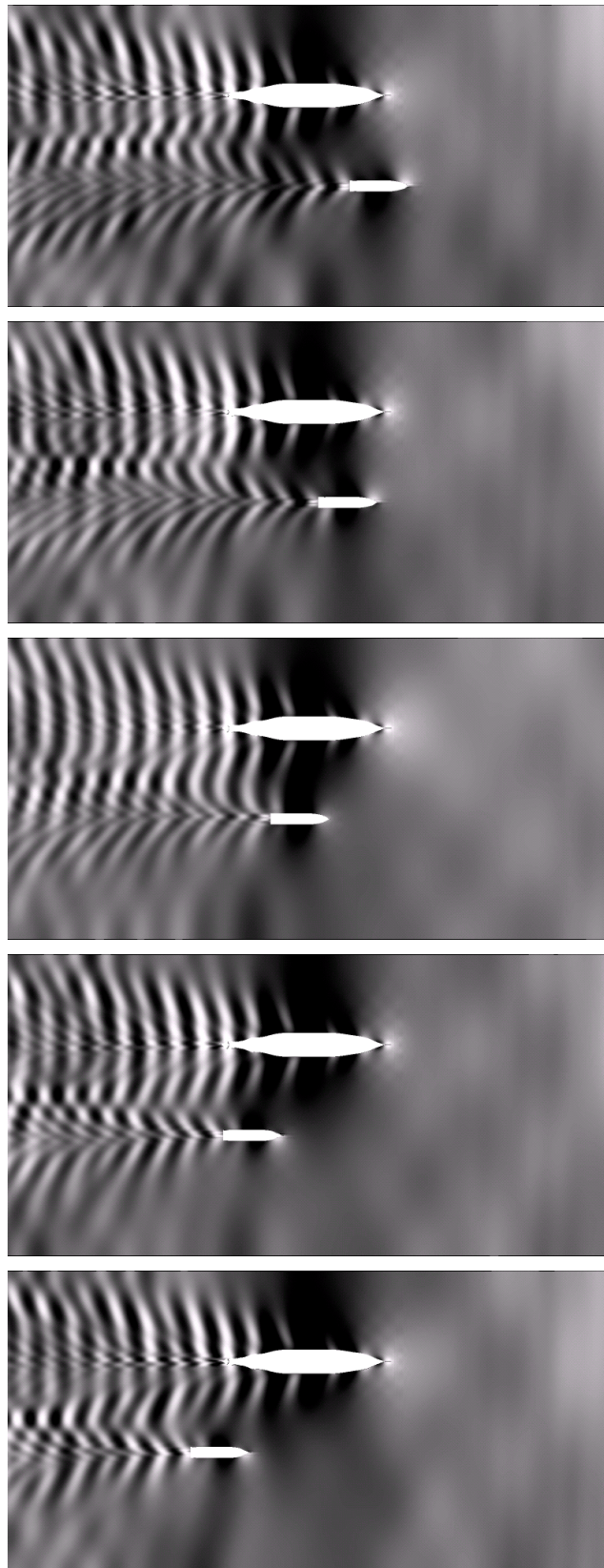


Abb. 2.17 Wellenbilder aus der quasistationären Berechnung des Überholens eines Feederschiffs durch ein Containerschiff ($h = 14,4 \text{ m}$, $V = 15 \text{ kn}$)

3 Potenziallöser UNOPAM

3.1 Grundlagen

Der Programmname ist eine Abkürzung für „Unsteady NOnlinear PAnel Method“. Das Programm dient zur Berechnung der Strömung um Schiffe, die auf tiefem oder flachem Wasser fahren. Es beachtet die nichtlinearen Randbedingungen an der Wasseroberfläche. Das Programm setzt ideale Flüssigkeit voraus und benutzt die Potenzialmethode. Bei der Berechnung des Schiffswiderstands werden viskose Effekte durch einen empirischen Reibungsbeiwert abgeschätzt.

Weiterführende Details zum Programm UNOPAM sind im DST-Bericht 1854 „Berechnung von Überholvorgängen mit UNOPAM“.

3.2 Koordinatensystem

Es wird ein kartesisches Koordinatensystem benutzt, dessen x -Achse parallel zur Schnittlinie zwischen Mittschiffsebene und ungestörter Wasseroberfläche ist; die y -Achse ist horizontal und senkrecht zur x -Achse nach Backbord gerichtet; die z -Achse zeigt vertikal nach oben. Es wird empfohlen, den Koordinaten-Nullpunkt auf die Schiffs-Symmetrieebene und die Wasseroberfläche etwa im Bereich des Hauptspants zu legen. Das Koordinatensystem folgt dem Schiff bezüglich der Manövrierbewegungen (Längsgeschwindigkeit nach vorn u , Quergeschwindigkeit nach Backbord v , Giergeschwindigkeit Bug nach Backbord r), aber nicht bezüglich der übrigen drei Freiheitsgrade: Vertikalgeschwindigkeit w (+ nach oben), Rollgeschwindigkeit p (+ oben nach Steuerbord) und Stampfgeschwindigkeit q (+ Bug nach unten). Dies ist die für Manövrierbewegungen bewährte Art des Koordinatensystems; für Bewegungen im Seegang sind dagegen andere Koordinatensysteme gebräuchlich.

Ein Punkt $\vec{x} = (x, y, z)$ mit zeitunabhängigen Koordinaten x, y, z bewegt sich relativ zum Untergrund mit der "Koordinatengeschwindigkeit"

$$\vec{V}_k = (u, v, 0) + (0, 0, r) \times (x, y, z) = (u - ry, v + rx, 0). \quad (3.11)$$

Im Falle einer Drehbewegung des Schiffes hat dies Geschwindigkeitsfeld kein Potenzial.

Ein schiffsfester Punkt bewegt sich relativ zum Koordinatensystem mit der "Schiffsgeschwindigkeit"

$$\vec{V}_s = (0, 0, w) + (p, q, 0) \times (x, y, z) = (qz, -pz, w + py - qx). \quad (3.12)$$

3.3 Zu lösendes Randwertproblem für nicht brechende Wellen

Das Wasser sei weit vom Schiff entfernt gegenüber dem Untergrund in Ruhe. Durch die Bewegung des Schiffes wird eine Wassergeschwindigkeit (Störgeschwindigkeit) bewirkt, die das Geschwindigkeitspotenzial $\phi(\vec{x}, t)$ habe.

Es soll ein Strömungspotenzial $\phi(\vec{x}, t)$ berechnet werden, das im gesamten Flüssigkeitsgebiet die Laplacegleichung

$$\Delta\phi = 0 \quad (3.13)$$

erfüllt; dies sichert die Massenerhaltung für inkompressible Flüssigkeit. Das Potenzial muss folgende Randbedingungen erfüllen:

1. Es strömt nichts durch die Körperoberfläche:

$$(\nabla\phi - \vec{v}_k)\vec{n} = \vec{v}_s\vec{n} \quad (3.14)$$

auf der getauchten Körperoberfläche. Dabei ist \vec{n} der Normalenvektor auf der Körperoberfläche.

2. Es strömt nichts durch die Wasseroberfläche (kinematische Bedingung). Bezeichnet man die Höhe der Wasseroberfläche mit $\zeta(x, y, t)$, so muss auf der Fläche $z = \zeta$ gelten:

$$\zeta_t + (\nabla\phi - \vec{v}_k)\nabla\zeta = \phi_z. \quad (3.15)$$

Führt man den Normalenvektor auf der freien Oberfläche

$$\vec{n} = (-\zeta_x, -\zeta_y, 1) \quad (3.16)$$

ein, so lässt sich (3.15) auch in der Form

$$(\nabla\phi - \vec{v}_k)\vec{n} - \zeta_t = 0 \quad (3.17)$$

schreiben.

3. Der Druck auf der Wasseroberfläche ist gleich dem Luftdruck (dynamische Bedingung). Mit der Bernoulli-Gleichung ergibt sich so die ebenfalls auf $z = \zeta$ geltende Randbedingung

$$g\zeta = -\phi_t + \vec{v}_k\nabla\phi - \frac{1}{2}(\nabla\phi)^2 \quad (3.18)$$

mit $g =$ Erdbeschleunigung. $\phi_t - \vec{v}_k\nabla\phi$ ist dabei die Zeitableitung des Potentials an einem erdfesten Punkt.

4. An einem ebenen Wasserboden $z = -H$ gilt die Bodenbedingung

$$\phi_z = 0. \quad (3.19)$$

Sie wird durch Spiegelung des Potentials am Boden erfüllt. Bei unendlicher Wassertiefe gilt stattdessen

$$\lim_{z \rightarrow -\infty} \nabla \phi = 0. \quad (3.20)$$

5. Bei symmetrischem ungekrängtem Körper (Schiff) und symmetrischer Strömung (Geradeausfahrt) gilt an der Ebene $y = 0$ die Randbedingung

$$\phi_y = 0; \quad (3.21)$$

sie wird ebenfalls durch Spiegelung des Potentials an der Ebene $y = 0$ erfüllt.

6. Bei stationärer Strömung gilt eine Strahlungsbedingung: Wellen treten nur hinter, nicht vor dem Schiff auf. Bei instationärer Strömung gilt stattdessen eine Anfangsbedingung: Das Wasser ist zu Beginn der Simulation in Ruhe.

3.4 Bodenbedingung bei unebenem Boden; Strömung

Es soll auch der Fall eines festen, unebenen, wasserundurchlässigen Bodens behandelt werden. Seine Tiefe sei

$$z = g(x_0, y_0). \quad (3.22)$$

Dabei sind (x_0, y_0) erdfeste Koordinaten. Die Schiffsbewegung über Grund wird hier als geradlinig in x -Richtung mit der konstanten Geschwindigkeit U vorausgesetzt. Daher gilt:

$$x_0 = x + Ut; \quad y_0 = y. \quad (3.23)$$

Die Randbedingung am Boden (für $z = g$) besagt, dass ein am Boden befindliches Wasserteilchen am Boden bleibt:

$$\frac{D}{Dt}(z - g) = 0 \quad (3.24)$$

mit der substanziellen Zeitableitung

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} \Big|_{x_0, y_0 \text{ konstant}} + \vec{v} \cdot \left(\frac{\partial}{\partial x_0}, \frac{\partial}{\partial y_0}, \frac{\partial}{\partial z} \right). \quad (3.25)$$

Dabei ist \vec{v} die Wassergeschwindigkeit relativ zur Erde. So ergibt sich als Randbedingung am Boden:

$$\vec{v} \cdot (-g_{x_0}, -g_{y_0}, 1) = 0. \quad (3.26)$$

\vec{v} ist die Summe aus der Strömungsgeschwindigkeit \vec{v}_s , d.h. der Wassergeschwindigkeit in Abwesenheit des Schiffes, und der Störung durch das Schiff, die durch das Störpotential ϕ beschrieben wird:

$$\vec{v} = \vec{v}_s(x_0, y_0, z) + \nabla\phi(x, y, z, t). \quad (3.27)$$

3.5 Ansatz für das Potenzial

Das Potenzial ϕ wird nach der Patchmethode (Söding, Ship Technology Research Heft 4 1993) als Überlagerung der Strömung durch Punktquellen approximiert:

$$\phi(\vec{x}) = \sum_{j=1}^n q_j G(\vec{x}, \vec{\xi}_j) \quad (3.28)$$

mit der Greenfunktion (Senke der Stärke 4π)

$$G(\vec{x}, \vec{\xi}_j) = \frac{1}{|\vec{x} - \vec{\xi}_j|}, \quad (3.29)$$

folglich

$$\nabla G(\vec{x}, \vec{\xi}_j) = -\frac{\vec{x} - \vec{\xi}_j}{|\vec{x} - \vec{\xi}_j|^3}. \quad (3.30)$$

Die Quellstärken q_j werden so bestimmt, dass die kinematischen Randbedingungen (kein Durchfluss durch Körper- und Wasseroberfläche) im Mittel über eine große Anzahl von Flächenstücken (Patches) erfüllt sind, die auf der jeweiligen Randfläche angeordnet werden. Auf der getauchten Körperoberfläche werden dreieckige Flächenstücke benutzt, auf der Wasseroberfläche in einem ausreichend großen Bereich um den Körper herum Vierecke. Quellpunkte $\vec{\xi}_j$ werden innerhalb des Körpers dicht hinter den Mittelpunkten der Körper-Dreiecke angeordnet sowie oberhalb der Wasseroberfläche im Abstand von etwa einer Vierecksseite über den Mitten der meisten Vierecke. Nur über der vordersten Reihe von Vierecken fehlen Quellpunkte; stattdessen werden Quellpunkte oberhalb der Wasseroberfläche eine Viereckslänge hinter der hintersten Reihe von Vierecks-Mittelpunkten angeordnet. Diese versetzte Quellanordnung führt dazu, dass die für stationäre Strömung gültige Strahlungsbedingung erfüllt wird (vgl. Jensen, Söding, Mi, Symp. on Naval Hydrod. 1986).

Die in Abschnitt 3.3 genannten Spiegelungen des Potenzials werden erreicht, indem zu jedem der oben angegebenen "Original-Quellpunkte" spiegelbildlich liegende Quellpunkte angesetzt werden. Je nach Symmetriebedingungen gibt es zu jeder Originalquelle also 0 gespiegelte Quellpunkte (wenn keine Symmetrie vorliegt), 1 (bei einer Symmetriebedingung) oder 3 (bei zwei Symmetrie-Ebenen $y=0$ und $z=-H$). Die Quellstärken der gespiegelten Quellen sind gleich denen der zugehörigen Originalquelle.

Zur Erfüllung der Bedingung für große Wassertiefe wird ein weiterer Quellpunkt etwa eine halbe Körperlänge oberhalb der Wasseroberfläche über der Körpermitte angesetzt. Dies hat sich insbesondere bei instationären Strömungen als notwendig erwie-

sen. Als weitere Bedingung wird angesetzt, dass die Summe aller Quellstärken gleich 0 ist.

Die dynamische Randbedingung an der Wasseroberfläche wird durch Ansatz der Viereckspunkte in der Höhe entsprechend (3.18) erfüllt.

3.6 Körpernetz

Auf dem Körper wird ein Dreieck-Netz erzeugt, das die gesamte benetzte Oberfläche bedeckt. Die anfängliche Wasserlinie wird dabei manuell vorgegeben und kann von der Ruhewasserlinie abweichen, um die Konvergenz zu beschleunigen. Die tatsächliche Wasserlinie ergibt sich im Verlauf der Berechnung. Das Netz auf der Körperoberfläche wird immer an den Verlauf der aktuellen Wasserlinie angepasst. Die Auflösung und Dichteverteilung kann durch Parameter gesteuert werden.

3.7 Netz auf der Wasseroberfläche

Das Viereck-Netz auf der Wasseroberfläche hat einen rechteckigen Außenrand. Der Bereich innerhalb der Wasserlinie des Körpers ist ausgespart. Die Zellen seitlich vom Körper sind dazu schmaler als die Zellen vor dem Körper. Hinter einem eintauchenden Spiegel wird ein rechteckiges "Spiegelnetz" generiert.

Die Vierecke vor und hinter dem Körper sind nahezu quadratisch. Die Netzfeinheit wird durch zwei vorzugebende Längen bestimmt: eine Netzlänge im und hinter dem Körperbereich und eine zweckmäßig etwas größer gewählte Länge vor dem Körper. Die Vorausgeschwindigkeit u des Körpers erzeugt mittig hinter dem Körper Querwellen (Wellenkämme quer zur Fahrtrichtung), die auf tiefem Wasser etwa (linearisiert) die Wellenlänge $2\pi u^2/g$ haben. Für genaue Berechnungen des Wellenwiderstands sollten die Vierecke neben und hinter dem Körper eine Länge von höchstens 1/10 dieser Wellenlänge haben. Auf flachem Wasser vergrößert sich die Wellenlänge und damit die zulässige Vierecksgröße.

3.8 Gleichungssystem für die Quellstärken

3.8.1 Bedingungen an der Wasseroberfläche

Der Fehler der Gleichung (3.17) integriert über ein Viereck i des Oberflächennetzes wird als Residuum r_i bezeichnet:

$$r_i = \int_i [(\nabla\phi - \vec{v}_k)\vec{n} - \zeta_i] da. \quad (3.31)$$

Darin bezeichnet $\int_i \dots da$ das Integral über das i -te Viereck. Die zeitliche Höhenänderung ζ_i wird durch eine zeitliche Rückwärts-Differenz zwischen der mittleren Höhe ζ_i des Vierecks im aktuellen Zeitschritt und ζ_i^* im vorhergehenden Zeitschritt approximiert:

$$r_i = \int_i (\nabla \phi - \vec{v}_k) \vec{n} da - \frac{A_3}{\Delta t} (\zeta_i - \zeta_i^*). \quad (3.32)$$

Dabei bedeuten A_3 die Vierecks-Grundfläche und Δt die Zeitschrittweite. Die Ausdrücke $\int_i \nabla \phi \vec{n} da$ lassen sich einfach auswerten (Details sind in Söding, STR 1993 angegeben): Das Integral wird entsprechend (3.28) als Summe der Beiträge aller Quellen gebildet. Jede Quelle j liefert den Beitrag Quellstärke q_j mal Raumwinkel, unter dem das Viereck vom Quellpunkt aus gesehen wird. Zur Berechnung des Raumwinkels wird das Viereck in zwei Dreiecke zerlegt.

Bei einer Änderung der j -ten Quellstärke q_j um Δq_j ändert sich das Residuum r_i um zwei Anteile: Einer ergibt sich bei unveränderter Lage und Größe des Dreiecks aus der Änderung von $\nabla \phi$ entsprechend (3.28), der zweite folgt aus der Höhenänderung des Vierecks-Rands, vor allem aus der veränderten Neigung des Vierecks um die Querachse. Numerische Versuche haben gezeigt, dass man dazu am besten die Höhenänderungen der Mittelpunkte der vorderen ($e=1$) und der hinteren ($e=2$) Querseite des Vierecks benutzt:

$$\frac{dr_i}{dq_j} = \int_i \nabla G(\vec{x}, \vec{\xi}_j) \vec{n} da - \sum_{e=1}^2 \left(\frac{\partial}{\partial \zeta_e} \int_i (\nabla \phi - \vec{v}_k) \vec{n} da - \frac{A_3}{2\Delta t} \right) \frac{d\zeta_e}{dq_j}. \quad (3.33)$$

Diese Näherung setzt voraus, dass die Strömungsgeschwindigkeit $\nabla \phi - \vec{v}_k$ ungefähr in Richtung der Längsseiten des Vierecks verläuft. Die Ableitung nach ζ_e des zweiten Integrals auf der rechten Seite ergibt sich näherungsweise als \pm Vierecksbreite mal Längsgeschwindigkeit der Flüssigkeit. Der Faktor $d\zeta_e/dq_j$ ergibt sich aus (3.18) und (3.28) zu

$$\frac{d\zeta}{dq_j} = -\frac{1}{g} \left((\nabla \phi - \vec{v}_k) \nabla G(\vec{x}, \vec{\xi}_j) + G(\vec{x}, \vec{\xi}_j) / \Delta t \right). \quad (3.34)$$

Um ein Residuum r_i zu Null zu machen, sind Quellstärkenänderungen Δq_j anzubringen, die folgender Gleichung genügen:

$$\sum_j \frac{dr_i}{dq_j} \Delta q_j + r_i = 0. \quad (3.35)$$

3.8.2 Weitere Gleichungen

Die Körperwandbedingung (3.14) wird ebenfalls im Mittel über jedes Körperdreieck erfüllt:

$$r_i = \int_i (\nabla \phi - \vec{v}_k - \vec{v}_s) \vec{n} da. \quad (3.36)$$

Die Ableitungen des Residuums werden approximiert als

$$\frac{dr_i}{dq_j} = \int_i \nabla G(\bar{x}, \bar{\xi}_i) \bar{n} da. \quad (3.37)$$

Dabei bleiben die Verschiebungen des Dreiecks, die sich durch die Squat-Änderung und die Änderung der Wasserlinie als obere Grenze des Dreiecksnetzes ergeben, unberücksichtigt.

Nach den Gleichungen für den Durchfluss durch die Oberflächen-Vierecke und vor den Gleichungen für den Durchfluss durch die Körper-Dreiecke wird die Gleichung „Summe aller Quellstärken = 0“ in das Gleichungssystem eingefügt.

3.8.3 Lösung des Gleichungssystems

Für alle i ergibt sich aus (3.32) bis (3.36) ein lineares Gleichungssystem für die erforderlichen Quellstärkenänderungen. Weil die zu erfüllenden Randbedingungen nichtlinear sind und weil die oben angegebenen Ableitungen nur Näherungen sind, ist eine Iteration erforderlich. Die berechneten Quellstärkenänderungen Δq_j werden mit einem Unter-Relaxationsfaktor r zwischen 0 und 1 multipliziert und das Produkt zu q_j addiert. Zu Beginn der Iteration werden alle q_j zu Null angesetzt. Wegen der nur angenähert richtigen Ableitungen nach q_j ist eine Verringerung des Residuums nur um 2 bis 3 Größenordnungen möglich. Dies reicht aus, um das Wellenfeld und den Widerstand genau zu berechnen.

3.8.4 Brechende Wellen

Wenn die vom fahrenden Schiff erzeugten Wellen steil sind, brechen sie. Dabei vermischen sich Luft und Wasser. Die zuvor angegebenen Bedingungen, die eine scharfe Trennfläche zwischen Luft und Wasser voraussetzen, lassen sich dann nicht erfüllen. Dies zeigt sich bei der Berechnung daran, dass die Iteration nicht konvergiert; allerdings kann das Divergieren der Iteration auch andere Ursachen haben. Der Ansatz eines Strömungspotenzials ist bei brechenden Wellen nicht korrekt, da bei und hinter brechenden Wellen die Rotation des Geschwindigkeitsfeldes dicht unter der Wasseroberfläche ungleich 0 ist.

Trotzdem sollen brechende Wellen wenigstens näherungsweise mit dem vorliegenden Paneelverfahren erfasst werden. Dazu wird die kinematische Randbedingung (3.17) so geändert, dass $\nabla \phi - \vec{v}_k$ an einer anderen Stelle als \bar{n} ausgewertet wird:

$$[\nabla \phi(\bar{x} - \vec{d}) - \vec{v}_k(\bar{x} - \vec{d})] \bar{n}(\bar{x}) - \zeta_t(\bar{x}) = 0. \quad (3.38)$$

Dabei ist \vec{d} ein Vektor in x -Richtung von passend zu wählender Länge $d = |\vec{d}|$.

Zum Verständnis der Wirkung dieser Modifikation werden zunächst ebene, flache (zwecks Linearisierung) Potenzialwellen untersucht, die stationär sind in einem mit der Geschwindigkeit u in x -Richtung fahrenden Koordinatensystem; d.h. es wird $\vec{V}_k = (u, 0, 0)$ und $\zeta_t = 0$ angesetzt. Setzt man für das Potenzial

$$\phi = \operatorname{Re}(ae^{ikx}e^{kz}) \quad (3.39)$$

an, so ergibt sich aus der dynamischen Oberflächenbedingung die linearisierte Wasserspiegelhöhe

$$\zeta = \operatorname{Re}(uaik/g \cdot e^{ikx}). \quad (3.40)$$

Einsetzen dieser Ausdrücke in die modifizierte kinematische Oberflächenbedingung (3.38) mit räumlich und zeitlich konstantem d liefert die Beziehung (der zweite Teil gilt für kleines kd)

$$k = \frac{g}{u^2} e^{-ikd} \approx \frac{g}{u^2} \left(1 - i \frac{gd}{u^2} \right). \quad (3.41)$$

Der Realteil von k entspricht der üblichen Bedingung für die Wellenzahl flacher Schwerewellen; der negative Imaginärteil von k bewirkt, dass die Wellen nach hinten (in negative x -Richtung) abnehmen; dies entspricht einer Wellendämpfung.

Bei der ursprünglichen Aufgabe, von einem fahrenden Schiff erzeugte brechende Wellen zu berechnen, wird die modifizierte Randbedingung (3.38) mit räumlich veränderlichem d angesetzt. Auf Grund von Testberechnungen zweidimensionaler, von einem getauchten Potenzialwirbel erzeugter Wellen wird d gleich 0 gesetzt, wenn die Wasseroberfläche auf allen vorderen Wellenflanken um weniger als eine Grenze s_g abwärts geneigt ist. Wird s_g dagegen überschritten, so wird in einem Bereich von etwa halber Wellenlänge um den nachfolgenden Wellenberg $d > 0$ angesetzt. Bei einem nachfolgenden Zeitschritt wird die Iteration wieder mit $d = 0$ begonnen, wenn am Iterationsende des vorhergehenden Zeitschritts die Abwärtsneigung der Wellenflanke kleiner als $s_g/2$ war; dadurch kann der Bereich brechender Wellen mit wachsender Simulationszeit wieder abnehmen. Während sich bei den genannten zweidimensionalen Testberechnungen eine Grenzsteigung von $s_g = 0.30$ bewährte, musste bei der Berechnung dreidimensionaler Wellen um fahrende Schiffe s_g kleiner ($=0.20$) gesetzt werden, um Divergenz des Iterationsverfahrens zu vermeiden.

Wird auf einer vorderen Wellenflanke im n -ten Iterationsschritt eine maximale Neigung $s_n > s_g$ berechnet, während die entsprechende Neigung s_{n-1} im $(n-1)$ -ten Iterationsschritt $< s_g$ und $d = 0$ war, so wird die Dämpfungslänge

$$d = (s_n - s_{n-1})/r \cdot 0.08\lambda \quad (3.42)$$

angesetzt; dabei ist r der Relaxationsfaktor, der bei der Iteration zur Berechnung korrigierter Quellstärken benutzt wird; $\lambda = 2\pi u^2/g$ ist die (linearisiert berechnete) Wellenlänge von Querwellen. Der d -Wert nach (3.42) wird im Bereich zwischen 0.4λ hinter und 0.067λ vor der Stelle größter Abwärts-Neigung der Wasseroberfläche angesetzt; im übrigen Bereich bleibt d unverändert (meist also $=0$). Im zweidimensionalen Fall ermöglicht dies Lösungen bis zu mehr als der doppelten Wirbelstärke, für die die Randbedingung (3.17) für nicht brechende Wellen erfüllt werden kann. Im dreidimensionalen Fall sind allerdings im Falle des Wellenbrechens meist kleine Relaxationsfaktoren (um 0,15) zur Konvergenz der Iteration erforderlich.

3.9 Zwei Leichter

Mit Unopam wurde das Überholmanöver zweier Leichter berechnet. Abb. 3.1 zeigt die Form durch die zur Formbeschreibung des Leichters benutzten Längslinien und Spanten.

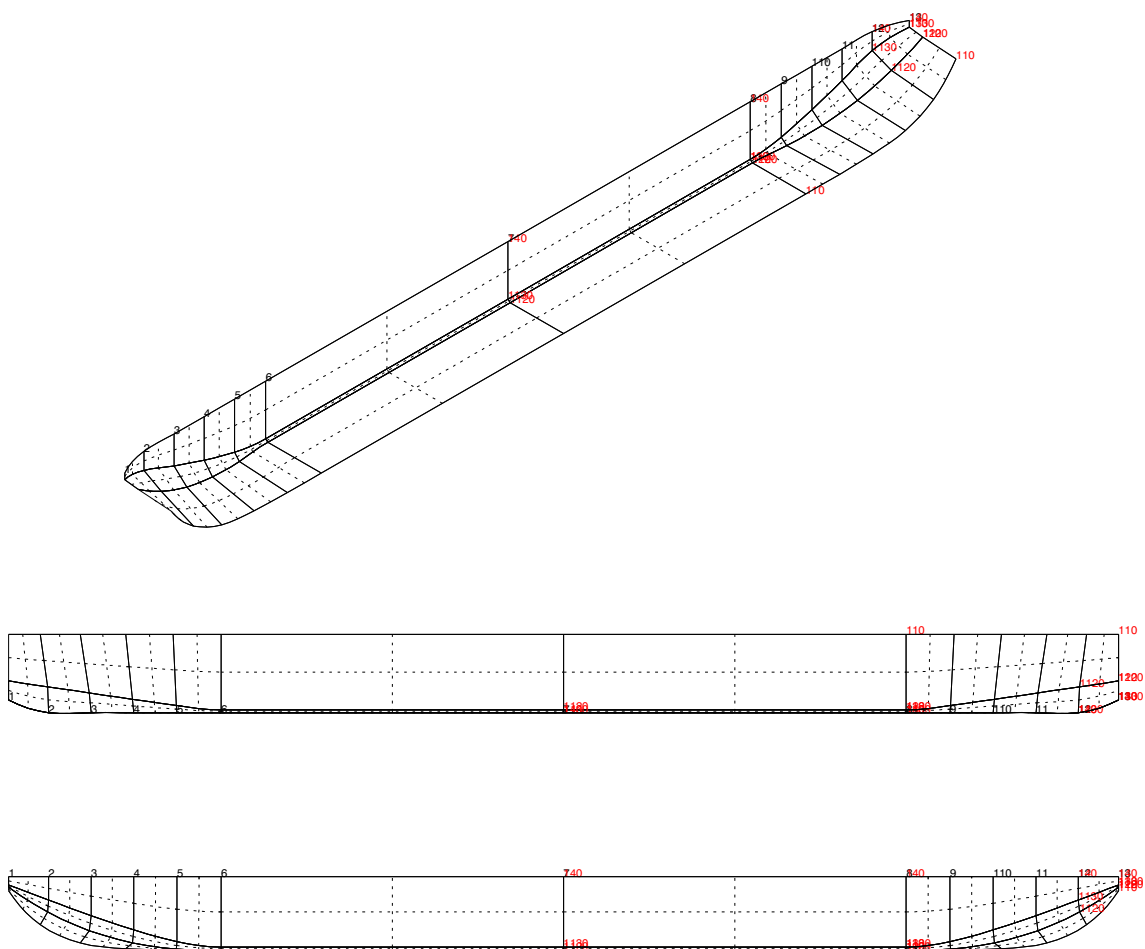


Abb. 3.1 Ursprüngliche Formbeschreibung. Ganz unten Seitenansicht, darüber Draufsicht.

Der am vorderen und am hinteren Schiffsende fast ganz flache, zur Wasserlinie ansteigende Schiffsboden eignet sich aus mehreren Gründen extrem schlecht für Berechnungen mit dem Programm Unopam:

- Die stumpfen Schiffsenden bewirken massive Strömungsablösung im Bereich der vorderen Schultern und im Heck; daher ist die von Unopam benutzte Potenzialmethode für diese Form besonders schlecht geeignet.
- Die Netzgenerierung an der Wasseroberfläche geht davon aus, dass die Wasserlinie vorn spitz ist.
- Unopam setzt voraus, dass die Wasserlinie am hinteren Ende entweder spitz ist, oder dass das Schiff einen Spiegel hat, d.h. eine geometrisch definierte Ablöselinie der Strömung vom Rumpf. Beides ist bei der vorliegenden Schiffsforn nicht der Fall.

Zur Verbesserung wurde zunächst am Hinterende der Bereich hinter Spant 2 entfernt; am Spant 2 wurde ein Spiegel angenommen. Dies ermöglichte erst die Anwendung des Programms. Das zunächst gänzlich ungeeignete Netz an der Wasseroberfläche im Bereich des Hecks erhielt dadurch einen viel glatteren Verlauf. Die Änderung erscheint auch nicht ganz unphysikalisch, weil sich die Strömung etwa im Bereich von Spant 2 von dem Rumpf ablösen dürfte. Mit dem so geänderten Schiff war eine erste Berechnung für die Geschwindigkeit 13,4 km/h auf einer Wassertiefe von 4 m erfolgreich.

Für die anschließenden Berechnungen wurden aber noch weitere Änderungen an der Formbeschreibung vorgenommen:

Unopam verschiebt die Knotenpunkte des Körper-Paneelnetzes, die auf der Wasserlinie liegen, bei Änderungen der berechneten Wasserlinie in Richtung der Spanten der Oberflächenbeschreibung. Da alle Spanten nahezu vertikal verlaufen, verschieben sich die Netzpunkte daher annähernd vertikal. Bei dem flach auflaufenden Boden im Bugbereich führt das leicht dazu, dass bei einer Verschiebung der Wasserlinie nach unten (im Vergleich zu der zunächst angesetzten Höhe der Wasserlinie beim Netzgenerieren) der Fußpunkt eines Spants austaucht. Dies führt zu einem Fehlerstop des Programms. Wenn sich die Wasserlinie dagegen gegenüber dem ersten Ansatz nach oben verschiebt, verschiebt sich der vorderste Netzpunkt nicht, wie bei der Schiffsforn erforderlich wäre, nach oben und vorn, sondern im Wesentlichen nur nach oben, so dass der zusätzlich eintauchende vorderste Rumpfteil fehlt. Auch das führt zu Problemen. Um dies zu korrigieren, wurde der bisherige vorderste Aufmaßspant schräg nach vorn außen geneigt. Um die Form nach vorn abzuschließen, wurde davor ein weiterer Spant angefügt, der entlang dem Vorsteven verläuft. Der sehr stumpfe Bereich zwischen den beiden vordersten Spanten liegt über der Ruhewasserlinie und taucht durch die Bugwelle nur wenig ein, so dass die in diesem Bereich extrem stumpfe Wasserlinie nicht sehr stört. Abb. 3.2 zeigt diese Änderung.

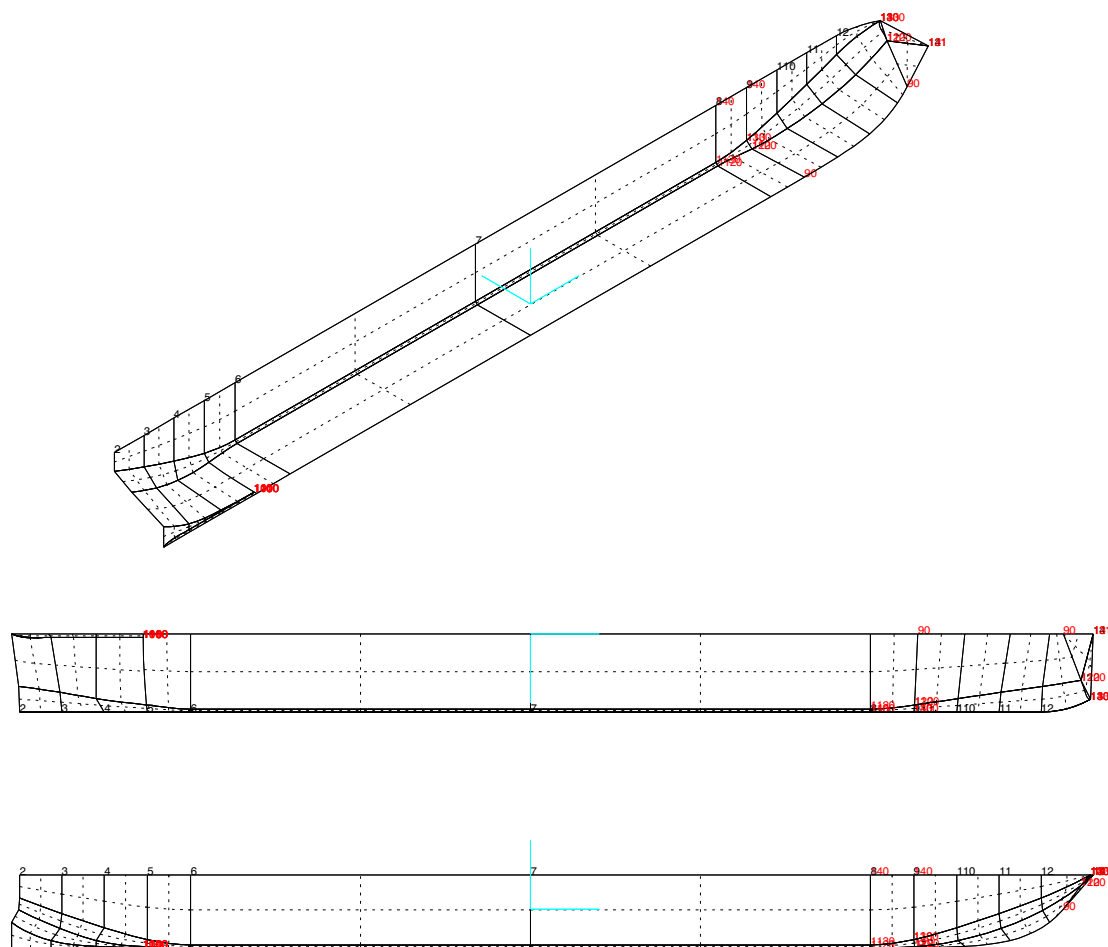


Abb. 3.2 Geänderte Formbeschreibung. Koordinatenkreuz in Höhe der Ruhewasserlinie.

Bei Berechnungen des Überholvorgangs geht es vor allem um die Längs- und Querkraft und das Giermoment, die dabei an den Schiffen auftreten. Die Querkraft wird erheblich größer, wenn das Schiff am Hinterende ein Totholz besitzt. Dies ist sehr wahrscheinlich auch für die Gierstabilität erforderlich. Bei einem Schubleichter wäre wohl kein Totholz notwendig, aber ohne ein Schubboot ist ein gegenseitiges Überholen von Schubleichtern ohnehin nicht denkbar. Deshalb wurde unter dem angehobenen Boden im Heck ein Totholz angebracht, dessen Unterkante in Kielhöhe verläuft und das bis zu dem angenommenen Spiegel reicht (Abb. 3.2).

Für diese Schiffsform wurde ein mäßig grobes Körpernetz mit 526 Paneelen generiert (Abb. 3.3) und durch ein Wasseroberflächennetz ergänzt (Abb. 3.4). Das Wasseroberflächennetz ist recht grob; Testrechnungen mit einem feineren Netz zeigten aber, dass das grobe Netz ausreichend für die hier anstehende Fragestellung erscheint. Denn die Kräfte und Momente beim Überholen werden vor allem durch die lange und breite Mulde erzeugt, die das schnellere Schiff um sich herum erzeugt; die kurzen Wellen (Wellenlänge von der Größenordnung $2\pi u^2/g$), die beide Schiffe auch

erzeugen und die vor allem für den Wellenwiderstand maßgebend sind, können von dem groben Netz nicht ausreichend aufgelöst werden, sind aber für die Überholkräfte und -momente bei der vorliegenden kleinen Froudezahl von geringem Einfluss.

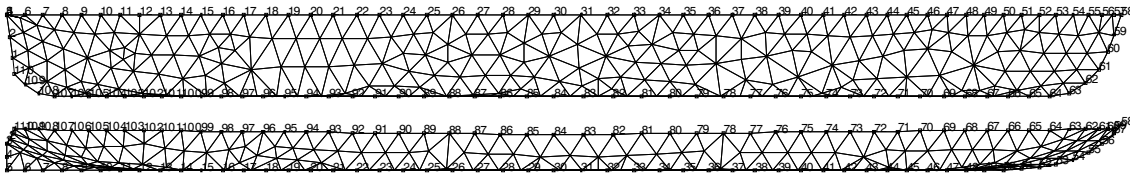


Abb. 3.3 Körpernetz

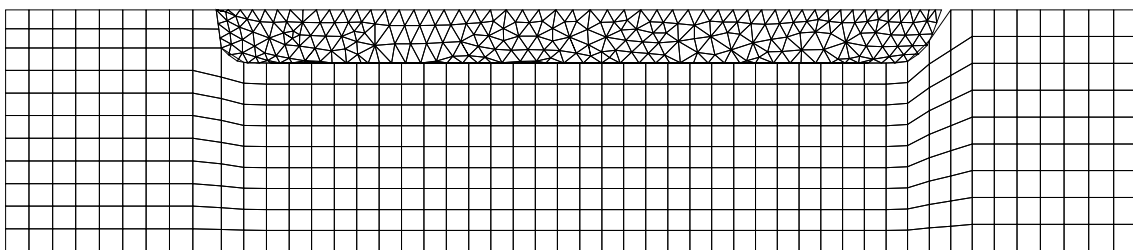
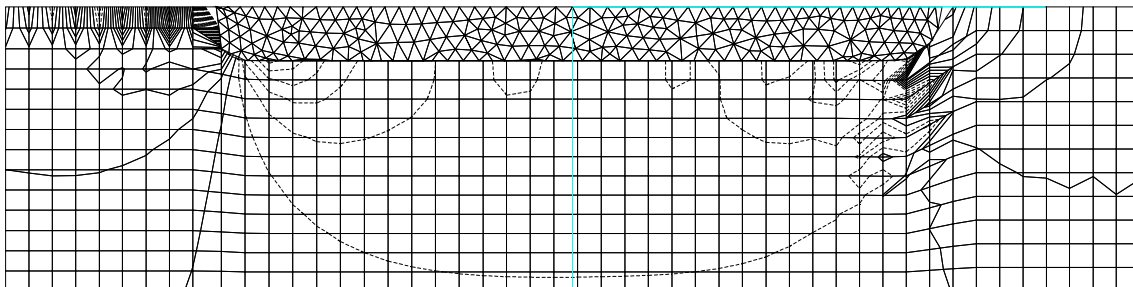


Abb. 3.4 Körper- und Wasseroberflächennetz

Abb. 3.5 zeigt die von Unopam berechnete Wasseroberflächenverformung für die Geschwindigkeit 9 km/h bei 4 m Wassertiefe. Wegen der geringen Geschwindigkeit entstehen extrem steile Wellen an der vorderen Schulter und hinter dem Spiegel. Deshalb mussten ein großer Wellendämpfungsparameter von 0,2 und ein kleiner Relaxationsfaktor von 0,15 angesetzt werden, um Konvergenz zu erreichen. Berechnungen für die höhere Geschwindigkeit von 13,4 km/h, bei der die Konvergenz leichter zu erreichen ist, zeigten aber, dass die großräumige Mulde um das Schiff von dem Wellendämpfungsparameter so gut wie nicht beeinflusst wird. Die Abnahme der Höhe der kurzen Wellen hinter dem Spiegel ist aber von der angesetzten Wellendämpfung beeinflusst.



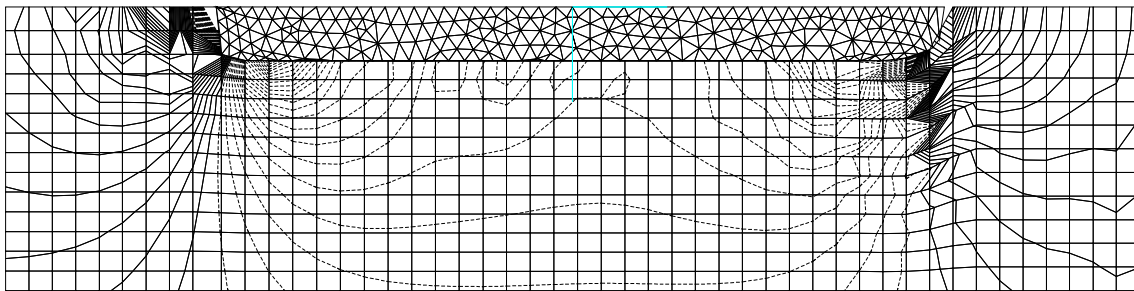


Abb. 3.5 Wasserflächenverformung bei 9 km/h (oben) bzw. 13,4 km/h (unten). Höhenlinienabstand 0,02 m

Anschließend wird der Überholvorgang von zwei gleichen Schiffen mit der zuvor untersuchten Form berechnet. Der lichte Abstand zwischen den Bordwänden wird gleich 40 m gesetzt. Die Berechnung umfasst nur 3 Halbschiffe und 3 zugehörige Netze an der Wasseroberfläche, während bei einer direkten Modellierung der beiden Schiffe 4 Halbschiffe erforderlich wären. Der beschriebene Fall entspricht aber nicht genau dem eigentlich gewollten Fall des Überholens von zwei Schiffen; stattdessen beschreibt er den Fall, dass 3 Schiffe nebeneinander fahren. Die Symmetrie bezüglich des mittleren Schiffs ergibt eine Verringerung des Rechenaufwands. Die beim Überholen auftretenden Kräfte und Momente werden hier nur für die „Außenschiffe“ untersucht. Das an Steuerbordseite fahrende Schiff hat wegen seines großen Abstands von dem an Backbordseite fahrenden Schiff auf dieses kaum Einfluss; das gegenseitig erzeugte Giermoment ist besonders klein, weil beide Schiffe an gleicher Längsposition fahren. Noch geringer wird dieser Einfluss, wenn die „Außenschiffe“ langsamer fahren als das „Mittelschiff“, denn die auf ein Schiff ausgeübten Kräfte hängen quadratisch oder stärker als quadratisch von der Fahrgeschwindigkeit des anderen Schiffs ab. Deshalb ist der untersuchte symmetrische Fall bezüglich der Kräfte und Momente auf die „Außenschiffe“ sehr ähnlich dem wirklichen Überholen von 2 Schiffen.

Natürlich lässt sich der unsymmetrische Fall mit nur 2 Schiffen, also 4 Halbschiffen ebenfalls mit Unopam berechnen, allerdings mit etwa doppelter Rechenzeit pro Fall. Dafür bietet die unsymmetrische Berechnung den Vorteil, dass mit derselben Rechnung die Kräfte und Momente auf beide Schiffe bestimmt werden können, auch wenn die Schiffe einen Längsversatz haben; man spart also gegenüber dem symmetrischen Rechenfall die getrennte Untersuchung von positivem und negativem Längsversatz. Trotzdem wurden hier nur symmetrische Fälle untersucht und angesetzt, dass beide Schiffe gleichschnell fahren, so dass sich eine stationäre Umströmung ergibt.

Um die Unsymmetrie der Umströmung der „Außenschiffe“ zu erfassen, müssen Wirbel definiert werden. Abb. 3.6 zeigt das Körper- und Wasseroberflächennetz. Blau sind freie Wirbellinien (hinter dem Schiff und oberhalb der zunächst angesetzten Wasseroberfläche) geplottet. Die grünen Linien zeigen die Kutta-Dreiecke; für diese wird der Druck auf beiden Schiffsseiten gleich gemacht; daraus ergibt sich die Wir-

belstärke der freien Wirbel. Längs der purpurn dargestellten horizontalen Linien auf der Körperoberfläche wird die am Hinterende des Körpers angesetzte Wirbelstärke auf der Körperoberfläche nach vorn zu allmählich abgemindert; die Linien erstrecken sich über die mit Wirbeln belegte Körperoberfläche.

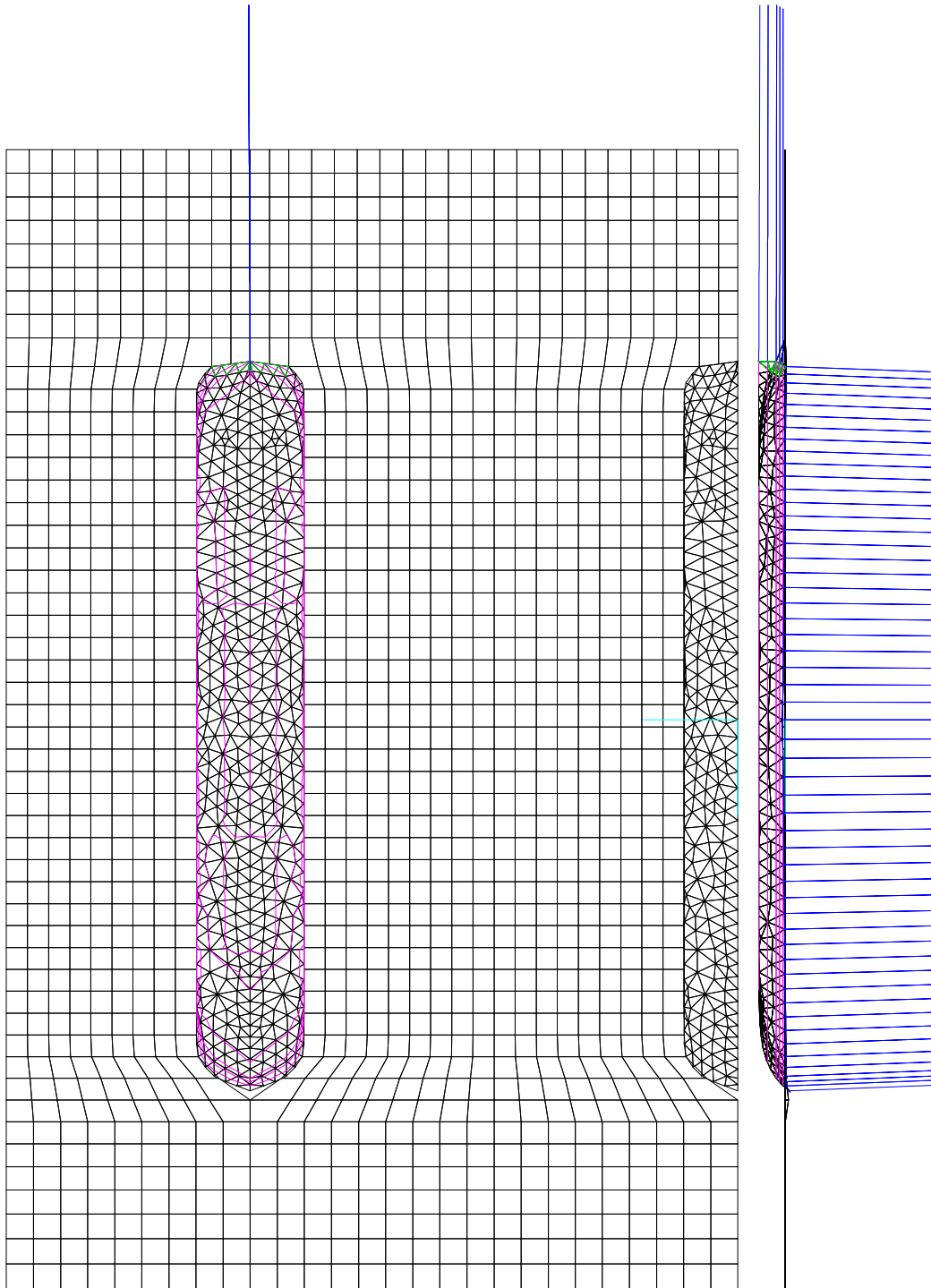


Abb. 3.6 Netz für den symmetrischen Überholfall. Links Ansicht von unten, rechts Ansicht von der Steuerbordseite.

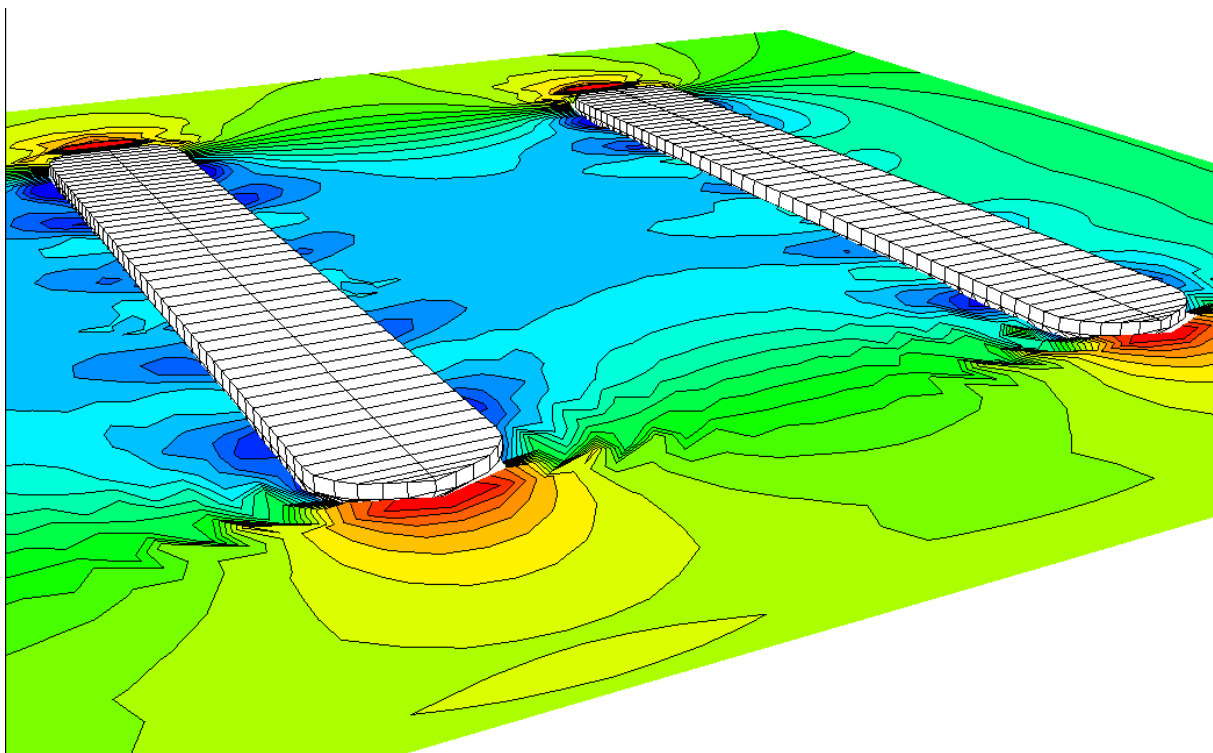


Abb. 3.7 Nebeneinanderfahrt mit gleicher Geschwindigkeit 13,4km/h,
Höhenlinienabstand 0,02m

Abb. 3.7 zeigt das Rechenergebnis für den Fall ohne Längsversatz beider Schiffe. Die Einsenkung (Rinne) der Wasseroberfläche im Nachlauf des Außenschiffes wird verursacht durch die freien Wirbel, die vom Hintersteven ausgehend angesetzt wurden. In Wirklichkeit verlaufen die freien Wirbel nicht geradlinig, sondern sie rollen sich umeinander. Dadurch verlagern sich die oberen Wirbel, die hauptsächlich für die Rinne hinter dem „Außenschiff“ verantwortlich sind, nach unten etwa in Höhe des Schiffsbodens. Deshalb ist die berechnete Rinne in der Wasseroberfläche nicht real. Auf die übrigen Ergebnisse hat dies aber fast keinen Einfluss.

Die entsprechenden Ergebnisse für einen Längsversatz der beiden Schiffe von 20 m und 40 m zeigt Abb. 3.8. Bei dem Längsversatz -40 m wurde das Netz an der Wasseroberfläche beider Schiffe nach vorn und hinten um je 20 m verlängert und der Relaxationsfaktor wurde von 0,15 auf 0,25 erhöht, wodurch eine schnellere Konvergenz erreicht wurde. Bei noch stärkerem Längsversatz sollte man verschiedene Wasseroberflächennetze um beide Schiffe generieren: Das Wasseroberflächennetz um das „Mittelschiff“ sollte vorn kurz, hinten lang sein; das Netz um die Außenschiffe sollte dagegen vorn lang, hinten kurz sein, um überflüssige Netzbereiche einzusparen und trotzdem eine ausreichend lange Berührungslinie zwischen beiden Netzen zu bekommen.

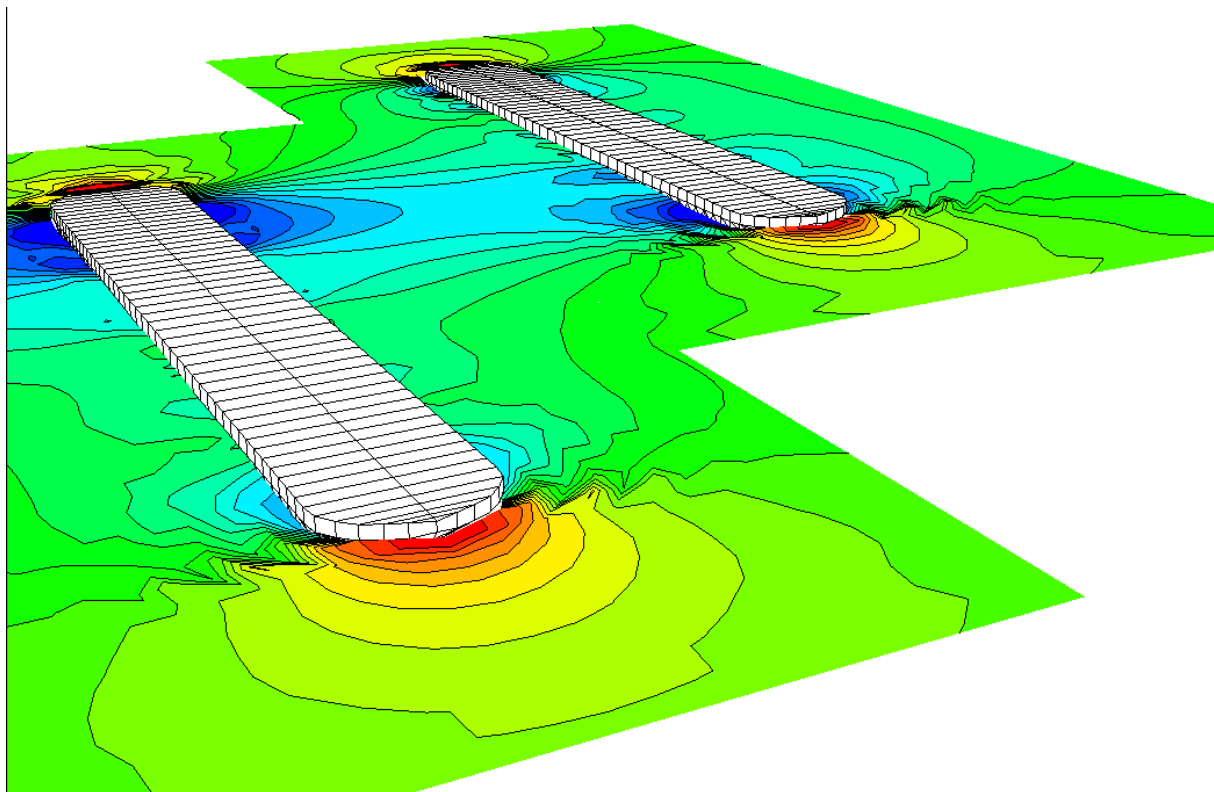
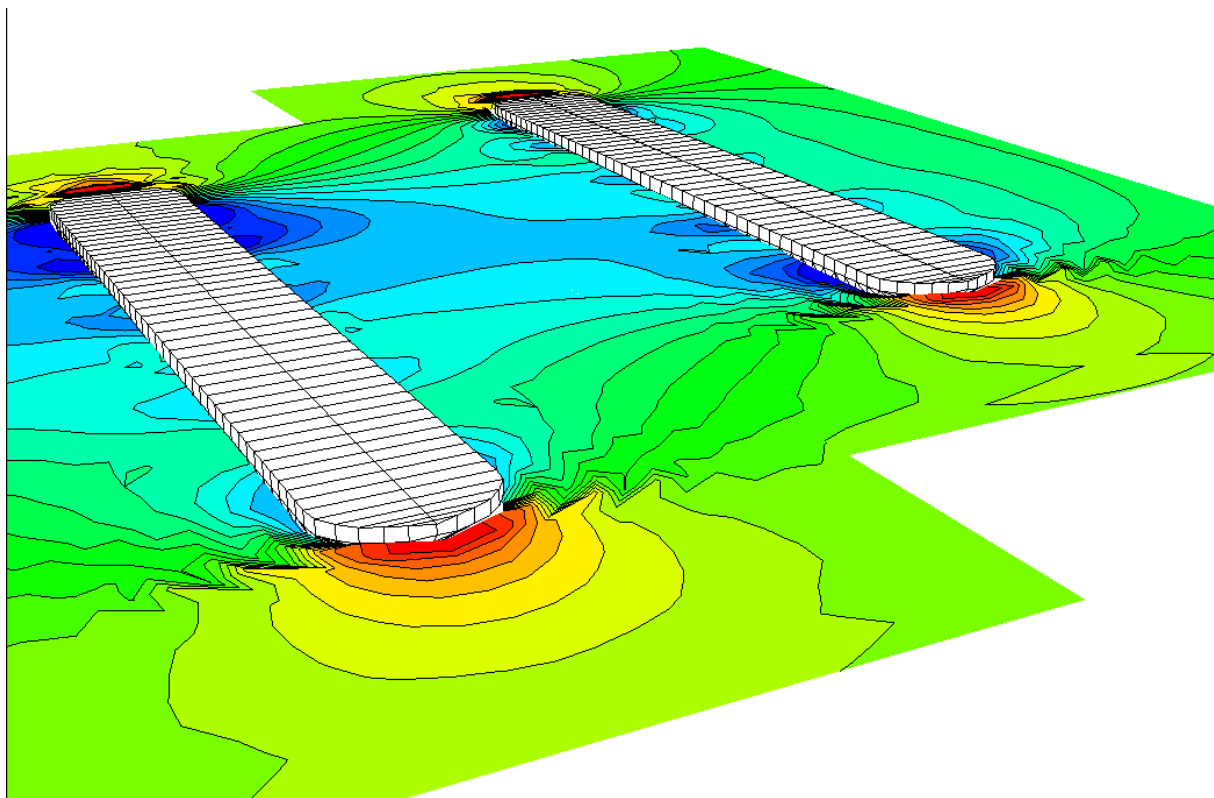


Abb. 3.8 Berechnungen wie in Abb. 3.7, jedoch mit 20 m (oben) und 40 m (unten) Längsversatz

Die wichtigsten Zahlenergebnisse der Berechnungen nach Abb. 3.7 und Abb. 3.8 gibt Tabelle 3.1 an. Sie gibt das Giermoment M_z (+ Bug nach außen) und die Austauchung ΔT bezogen auf den Hauptspant des Außenschiffes an. Das Programm gibt

dagegen das Giermoment M_{z0} und die Austauchung ΔT_0 bezogen auf den Nullpunkt des Koordinatensystems an. Deshalb ist eine Umrechnung erforderlich.

Für das Giermoment:

$$M_z = M_{z0} - x_A Y + y_A X \quad (3.43)$$

Dabei sind x_A, y_A die Koordinaten des Hauptspants des Außenschiffes; X, Y sind die beiden Horizontalkomponenten der „Kraft aus Druck und Gewicht“, die vom Programm ausgegeben werden.

Für die Austauchung:

$$\Delta T = \Delta T_0 - x_A \Delta \theta$$

dabei ist $\Delta \theta$ die Vertrimmung (+ vorlastig).

Tabelle 3.1: Zahlenergebnisse für das Außenschiff. Beide Schiffe haben 13,4 km/h Geschwindigkeit

x_A [m]	R_T [kN]	Y [kN]	M_z [kNm]	ΔT [m]	$\Delta \theta$ [°]
–	80	0	0	-0,294	0,017
0	84	-55	466	-0,298	-0,001
-20	62	-41	-816	-0,256	0,280
-40	39	-26	-1585	-0,163	0,435

3.9.1 Wasseroberflächennetz für kleine Geschwindigkeiten

Durch numerische Versuche wurde eine notwendige Bedingung für Stabilität der Wasseroberflächenberechnung gefunden: Ist l die größte Länge von Zellen an der Wasseroberfläche, so muss etwa gelten: $F_{nz} = ul/\sqrt{gl} > 0.55$ für einen Wellendämpfungsparameter von 0.08, und $F_{nz} > 0.47$ für einen Wellendämpfungsparameter von 0.20.

Natürlich ist dies keine hinreichende Bedingung für die Konvergenz des gesamten Verfahrens. Die Einhaltung dieser Grenze sichert auch nicht die Genauigkeit der berechneten Ergebnisse.

Zunächst wurden verschiedene Wellendämpfungsparameter wdp untersucht für den Fall, dass ein Schubleichter allein auf 4 m Wassertiefe mit der Geschwindigkeit $v = 13,4$ km/h fährt. Ausgehend von $wdp = 0.08$ wurden kleinere Werte angesetzt, wobei die Iteration jeweils von den konvergierten Ergebnissen des vorhergehenden

Falles fortgesetzt wurde. Im Fall $wdp = 0$ konvergierte die Berechnung nicht. Die Ergebnisse für die übrigen untersuchten Fälle zeigt Tabelle 3.2. Für $wdp \leq 0.04$ hängen die Ergebnisse nicht wesentlich von wdp ab. Allerdings ist zu beachten, dass der Wellenwiderstand wegen der kurzen Fahrtwellen ($2\pi v^2/g = 8.87 \text{ m}$) durch das Wasseroberflächennetz mit 2,5 m Netzlänge nicht korrekt berechnet wird.

Tabelle 3.2: Einfluss verschiedener Wellendämpfungsparameter wdp auf den Gesamtwiderstand R_T , die Austauschung ΔT und die vorlastige Vertrimmung infolge Fahrt $\Delta\theta$

wdp	R_T [kN]	ΔT [m]	$\Delta\theta$ [°]
0,08	79,0	-0,293	0,018
0,04	84,3	-0,298	0,006
0,02	85,6	-0,299	0,001
0,01	85,2	-0,298	0,001

Für den Fall $wdp = 0.08$ wurden dann die Abmessungen des Netzes an der Wasseroberfläche verändert, die x -Koordinaten des hinteren und vorderen Netzendes x_h und x_v und die Breitenkoordinate der Netz-Außenkante y . Das Ergebnis (Tabelle 3.3) zeigt, dass die benutzten Standard-Abmessungen des Netzes voll ausreichend sind.

Tabelle 3.3: Einfluss der Abmessungen des Netzes an der Wasseroberfläche auf den Gesamtwiderstand R_T , die Austauschung ΔT und die vorlastige Vertrimmung $\Delta\theta$ infolge Fahrt

x_h	x_v	y	R_T [kN]	ΔT [m]	$\Delta\theta$ [°]
-60	60	30	79,0	-0,293	0,018
-60	60	40	79,8	-0,300	0,016
-60	80	30	77,9	-0,295	0,023
-80	60	30	80,2	-0,295	0,014

Weiter wurde die Netzweite des Wasseroberflächennetzes variiert. Der Wellendämpfungsparameter wurde hierbei gleich 0,04 gesetzt; die hintere Netzkoordinate $x_h = -80 \text{ m}$. Für Netze mit Weiten $\leq 1.8 \text{ m}$ wurde keine Konvergenz erreicht. Ursache sind die steilen Wellen an der vorderen Schulter. Für die konvergierten Fälle zeigt Tabelle 3.4 die Ergebnisse. Der Squat wird anscheinend schon durch das grobe Netz

weitgehend korrekt berechnet; der Widerstand wird dagegen mit dem feineren Netz deutlich größer berechnet.

Tabelle 3.4: Einfluss der Netzweite h an der Wasseroberfläche auf den Gesamtwiderstand R_T , die Austauschung ΔT und die vorlastige Vertrimmung $\Delta\theta$ infolge Fahrt

h [m]	R_T [kN]	ΔT [m]	$\Delta\theta$ [°]
2,5	85,7	-0,300	0,001
2,2	85,0	-0,282	-0,004
2,0	89,4	-0,300	-0,008

Fälle mit der Geschwindigkeit 2,5 m/s (9 km/h) sind wesentlich schwieriger zu berechnen: Netzweiten h unter 2 m lösen die stark brechende Welle an der vorderen Schulter so genau auf, dass keine Konvergenz erreichbar ist; wesentlich größere Werte h sind wegen der Mindest-Netzweiten-Froudezahl instabil. Abb. 3.9 zeigt das Wellenfeld für $h=2.0$ für einen Wellendämpfungsparameter $w_{dp}=0.12$. Die starke Wellendämpfung beseitigt die seitlich vom Bug und Heck ausgehenden Diagonalwellen vollständig. Das mit dem Schiff mitlaufende Wellensystem (Wellenberg am Bug und Heck, Wellental dazwischen) dürfte trotzdem weitgehend korrekt berechnet werden. Ein Vergleich mit Versuchsergebnissen wäre aber hilfreich.

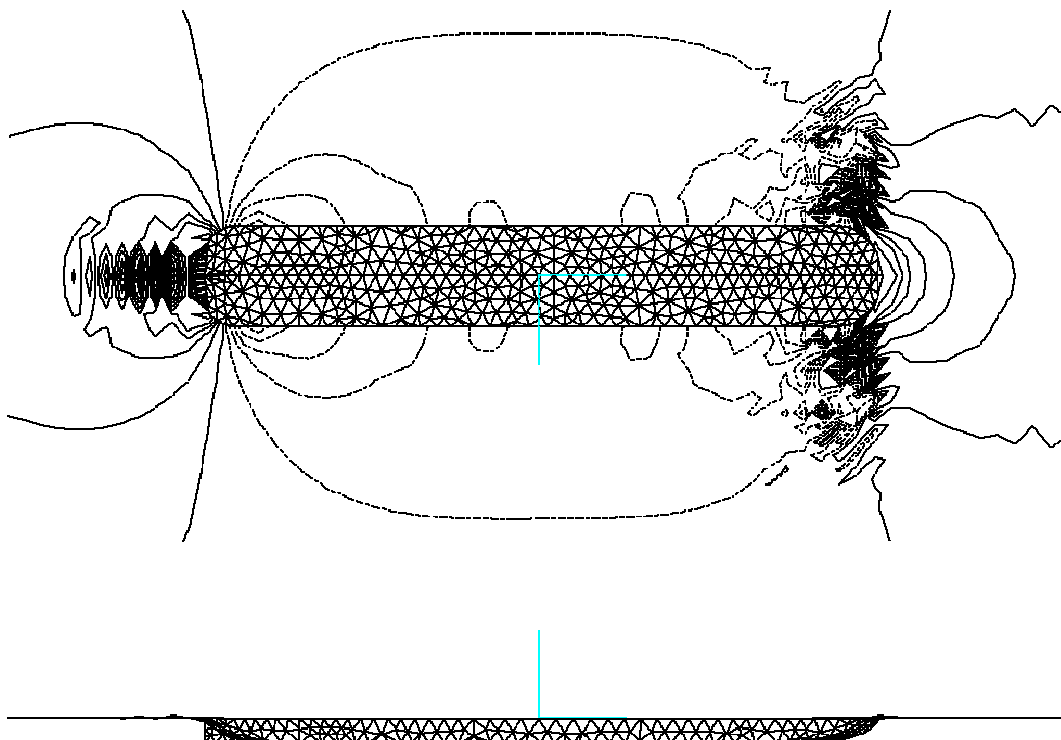


Abb. 3.9 Wellenbild des allein fahrenden Leichters bei 9 km/h. Die seitlich ablaufenden Wellen wurden weggedämpft. Höhenlinien alle 2cm.

Die folgenden Untersuchungen des Überholvorgangs werden mit $h = 2.2$ m und $w_{dp} = 0.12$ durchgeführt. Hier wurden nicht beide Leichter gleichzeitig gerechnet, sondern es wird ein quasi-instationäres Verfahren angewandt, das auch für die Containerschiffe zum Einsatz kam: Zunächst wird der überholende Schubleichter für sich allein bei 13,4 km/h Geschwindigkeit berechnet. Die Quellen (Körper- und Wasseroberflächenquellen), welche die Störströmung (Abweichung von der parallelen Anströmung) um diesen Leichter darstellen, werden dann in einer zweiten Rechnung für den überholten Leichter als zusätzliche, bekannte Quellen angesetzt. Sie werden entsprechend dem Seitenabstand zwischen beiden Leichtern um 51,33 m seitlich versetzt (dies entspricht 40 m lichtem Abstand zwischen den Bordwänden) sowie anfangs um -13,97 m nach hinten. Während der instationären Berechnung des Überholvorgangs werden diese Quellen dann jeweils um den Betrag Zeitschrittweite (5 s) mal Geschwindigkeitsdifferenz zwischen beiden Schiffen (1,222 m/s) nach vorn versetzt. Die große Anfangsverschiebung der Quellen nach hinten ist erforderlich, weil zunächst mit einem Zeitschritt von 1000 s gerechnet wird, um nach diesem Zeitschritt stationäre Verhältnisse, noch fast ohne Wechselwirkung zwischen den Leichtern, zu bekommen. Alle folgenden Zeitschritte betragen dann 5 s.

Dieses Verfahren stellt eine Annäherung an die wirklichen Verhältnisse dar. Es vernachlässigt, dass die Quellstärken, die den Überholer repräsentieren, auch von der Umströmung des überholten Leichters beeinflusst werden. Eine direkte Berechnung beider Schiffe gemeinsam würde nicht nur umfangreiche Programmweiterungen erfordern, sondern erscheint vorläufig auch zu zeitaufwändig: Schon nach dem hier angewendeten Verfahren dauerte die Berechnung des Überholvorgangs etwa 12 Stunden. Bei einer gemeinsamen Berücksichtigung beider Schiffe würde sich die Rechenzeit nahezu verachtfachen.

Weil das langsamere Schiff mehr Gefahr läuft, „aus dem Ruder zu laufen“ (d.h. das auftretende Giermoment nicht mit dem Ruder ausgleichen zu können) und auf die Geschwindigkeit des Überholers beschleunigt zu werden, sind die Kräfte und Momente am überholten Leichter wichtiger als die am überholenden Leichter. Hier werden deshalb nur die Kräfte und Momente am überholten Leichter bestimmt. Diese sind auch weniger durch die hier vernachlässigten Effekte beeinflusst, weil die das schnellere Schiff repräsentierenden Quellen stärker sind als die des überholten, langsameren Schiffes.

Wegen der Unsymmetrie der Umströmung mussten beide Seiten des überholten Leichters paneeliert und mit einem Netz auf der Wasseroberfläche umgeben werden. Außerdem wurde die Kutta-Bedingung an der Hinterkante des hinten angefügten Totholzes erfüllt, indem freie Wirbel hinter dem Totholz und oberhalb der Wasserlinie

angesetzt werden sowie eine Wirbelverteilung auf der benetzten Oberfläche des Leichters. Der überholende Leichter wurde dagegen als symmetrisch umströmt berechnet.

Abb. 3.10 bis Abb. 3.12 zeigen die am überholten Leichter auftretenden Kräfte und das Giermoment abhängig vom Längsversatz des überholenden Leichters gegenüber dem überholten Leichter. Der Längsversatz ist zu Beginn des Überholvorgangs negativ und wird 0, wenn beide Leichter genau nebeneinander fahren. Die Abbildungen zeigen das für Überholvorgänge typische Verhalten des Gesamtwiderstands, der Querkraft und des Giermoments.

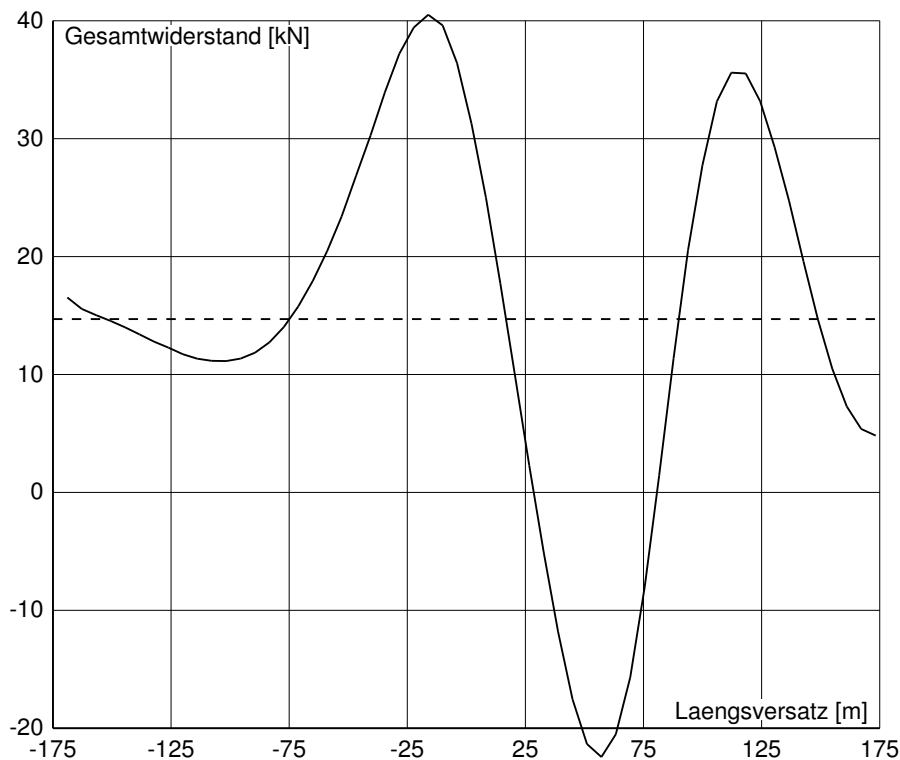


Abb. 3.10 Abhängigkeit des Gesamtwiderstands des überholten Leichters (einschl. Wechselwirkung) vom Längsversatz beider Leichter

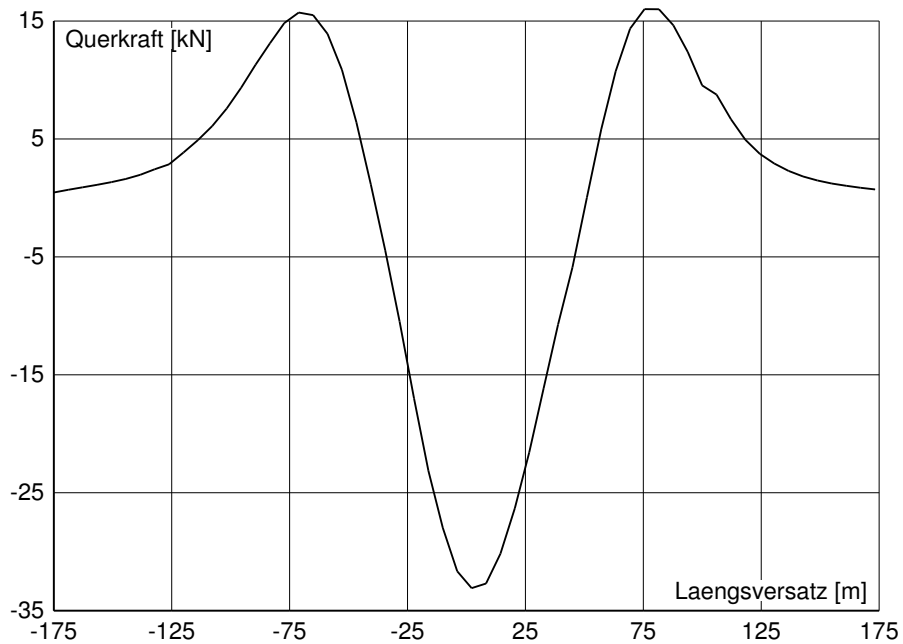


Abb. 3.11 Abhängigkeit der Seitenkraft (+ weg vom Überholer) am überholten Leichter vom Längsversatz beider Leichter

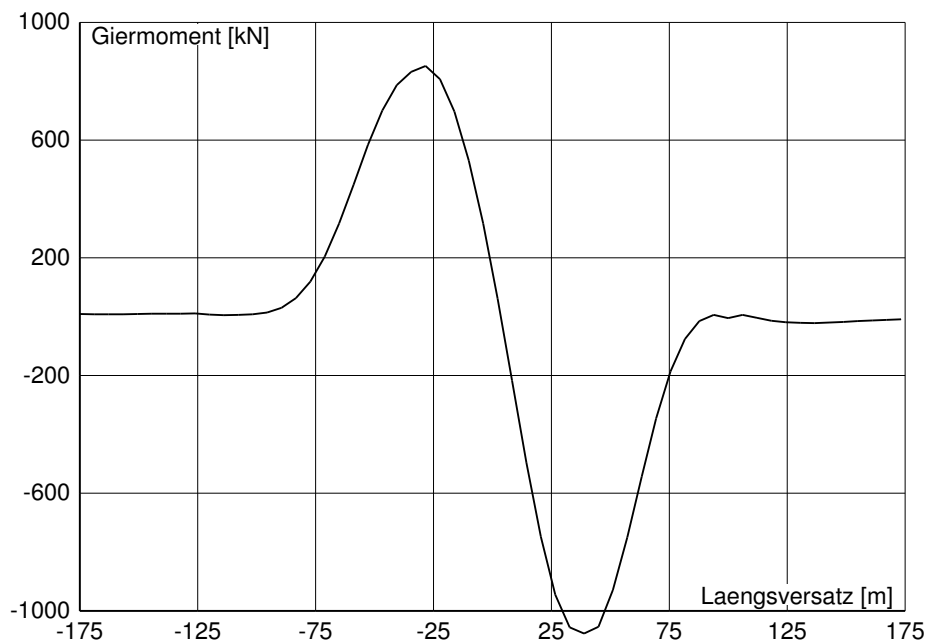


Abb. 3.12 Abhängigkeit des Giermoments am überholten Leichter (+ dreht Bug weg vom Überholer) vom Längsversatz beider Leichter

Mit den Ansätzen dieser Berechnung (Wasseroberflächen-Netzweite 2,2 m, Wellendämpfungparameter 0,12) ergibt sich für den einzelnen mit 9 km/h fahrenden Leichter ein Gesamtwiderstand von 14,7 kN. Dieser Wert ist gestrichelt in Abb. 3.10 eingezeichnet.

Während Y und N bei Längsversetzungen >175 m praktisch gleich 0 sind, oszilliert der Widerstand R_T noch weiter: Auf das Minimum bei 180 m Längsversatz folgt noch ein Maximum von 17,1 kN bei 235 m und ein weiteres Minimum von 14,2 kN bei 302 m Längsversatz.

Für die Längsversetzungen 0 m, 20 m und 40 m lassen sich die hier berechneten Werte R_T, Y, N interpolieren und mit denen der Tabelle 3.1 vergleichen. Die dort angegebene Größe x_A ist gleich dem negativen Längsversatz. Diese Tabelle gilt für den Fall, dass beide Leichter mit 13,4 km/h fahren, während hier der überholte Leichter mit 9 km/h fährt. Deshalb wird in Tabelle 3.5 nicht der Widerstand, sondern die Widerstandsänderung gegenüber dem Fall ohne Wechselwirkung verglichen.

Tabelle 3.5: Vergleich der Widerstandsänderung ΔR_T , der Seitenkraft Y (+ vom anderen Leichter weg) und des Giermoments N (dreht Bug vom anderen Leichter weg) am überholten Leichter mit den Ergebnissen der stationären Berechnung (dort beide Leichter 13,4 km/h)

Längsversatz [m]	ΔR_T [kN]		Y [kN]		N [kNm]	
	quasi- instationär	stationär	quasi- instationär	stationär	quasi- instationär	stationär
0	18,4	4	-32,6	-55	153	466
20	-4,7	-18	-26,3	-41	-749	-816
40	-27,6	-41	-9,8	-26	-1071	-1585

Zwar sind die Vorzeichen und die ungefähren Größen der Wechselwirkung in beiden Fällen meist gleich, aber im Fall dass der überholte Leichter langsamer fährt als der überholende ergeben sich doch deutlich kleinere unsymmetrische Wechselwirkungen Y, N und um etwa 14 kN verschiedene Widerstandsänderungen. Die instationären Druckanteile dürften nur eine geringe Rolle spielen; wesentlich erscheint die im Bericht 2 erhöhte Geschwindigkeit des überholten Schiffes.

Der hier behandelte Fall zeigt die Grenzen des Verfahrens Unopam: Nur in einem engen Bereich der Netzweite und des Wellendämpfungsparameters konnte Konvergenz erreicht werden. Bei noch geringeren Froudezahlen des überholten Schiffes als dem hier vorliegenden Wert $F_n = 0.089$ ist es nicht mehr anwendbar. Für den hier behandelten Fall wird erwartet, dass die Wechselwirkungskräfte einigermaßen kor-

rekt berechnet werden, nicht aber der Wellenwiderstand. Sehr viel genauer dürfte das Verfahren dagegen für Froudezahlen über 0,18 und für schlankere Schiffe sein.

Zum Vergleich mit Abb. 3.9 zeigt Abb. 3.13 das Wellenfeld für den Überholfall für einen Längsversatz von 2,2m.

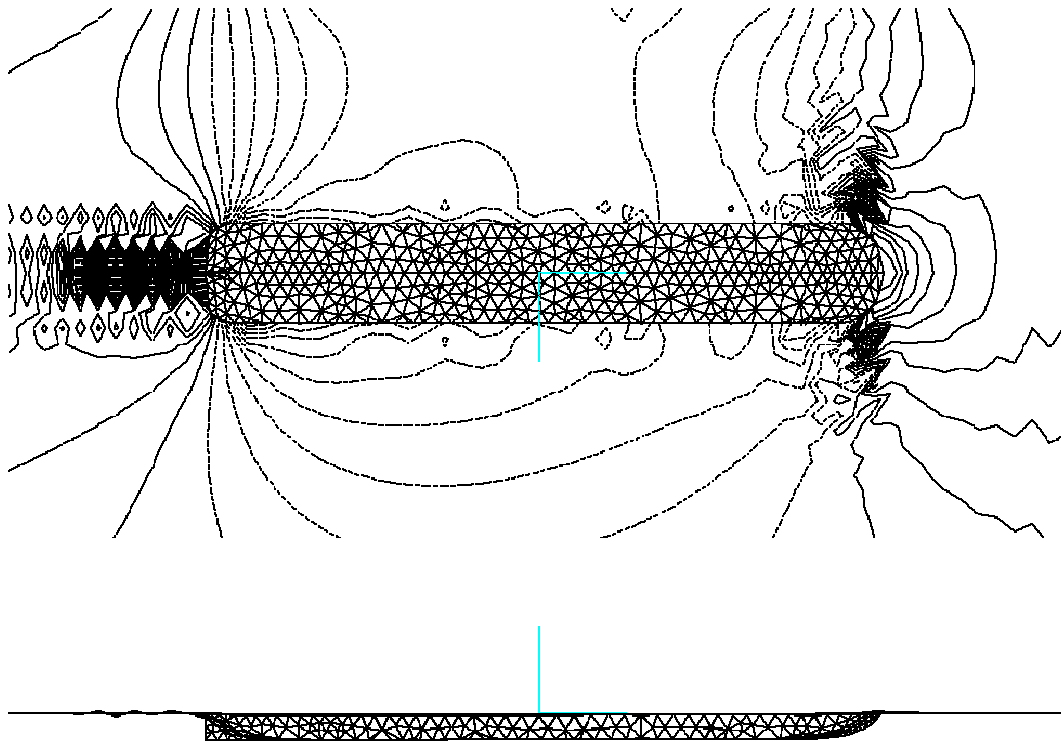


Abb. 3.13 Wellenfeld um den überholten Leichter bei einem Längsversatz von 2,2 m. Höhenlinien im Abstand von 2 cm. Der Überholer befindet sich oberhalb des oberen Bildrandes.

Zuletzt werden die Höhen- und Trimmänderung des überholten Leichters beim Überholen dargestellt. Im Programm Unopam werden diese beiden Ergebnisse ausgegeben, allerdings relativ zu der für den Iterationsanfang gegebenen Schwimmelage. Diese entspricht aber normalerweise weder der Schwimmelage des Schiffes bei der Geschwindigkeit 0 (statische Schwimmelage) noch der Schwimmelage vor Beginn oder nach dem Ende des Überholvorgangs für das fahrende Schiff (Schwimmelage mit Squat). Hier wird die Schwimmelage relativ zur statischen Schwimmelage bestimmt, also die Summe aus dem Squat für das einzeln fahrende Schiff und dem Einfluss des Überholers.

Dazu muss zunächst die statische Schwimmelage berechnet werden, bei der das Schiffsgewicht und der Auftrieb sowie die Trimmmomente dieser beiden Kräfte im Gleichgewicht sind. Wegen der relativ groben Paneelierung (sie wurde ausreichend für die Strömungseffekte, nicht im Hinblick auf die statische Schwimmelage gewählt) weicht die statische Schwimmelage für das Paneelmodell der Schiffsförm etwas ab von der wirklichen Schwimmelage, die sich für sehr feine Paneelierung ergeben wür-

de. Deshalb muss die statische Schwimmage für das verwendete Paneelmodell der Form berechnet werden. Unopam lieferte den folgenden Unterschied zwischen der Gleichgewichtsschwimmage und der gewählten Anfangs-Schwimmage: Austauchung $-0,083$ m; vorlastige Vertrimmung $0,050^\circ$. Diese Werte werden von den berechneten Schwimmageänderungen abgezogen. Das Ergebnis zeigen Abb. 3.14 und Abb. 3.15.

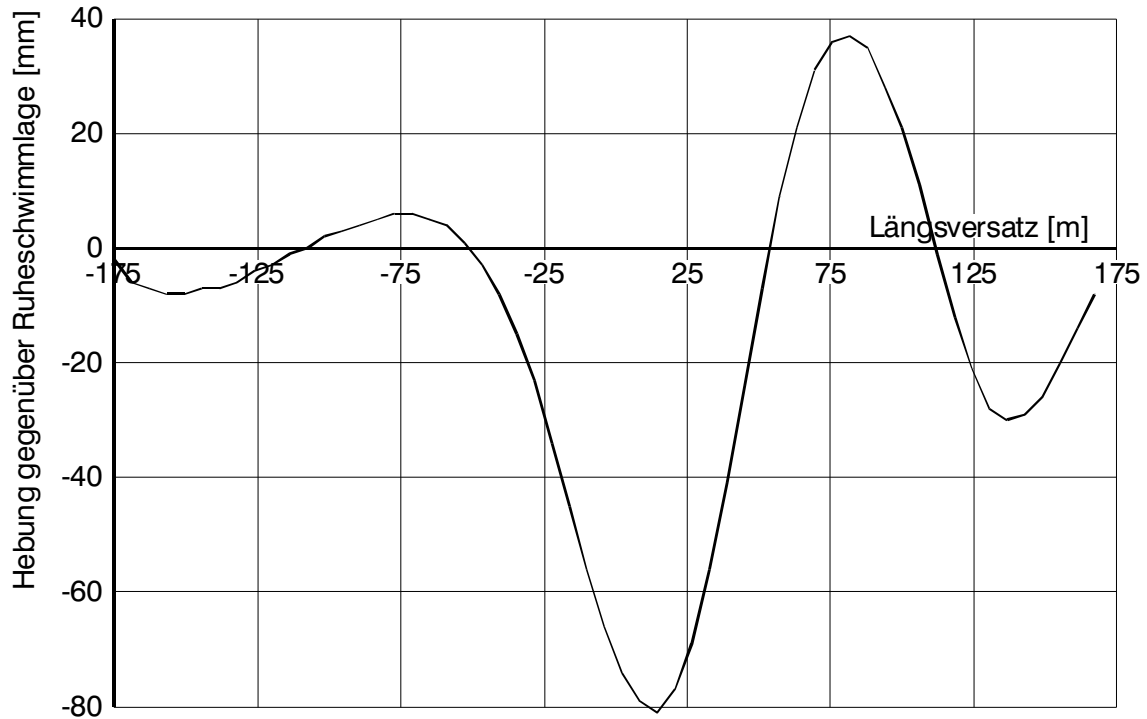


Abb. 3.14 Anhebung des Schiffes während des Überholvorgangs. Geschwindigkeiten 9 km/h bzw. 13,4 km/h; Wassertiefe 4 m

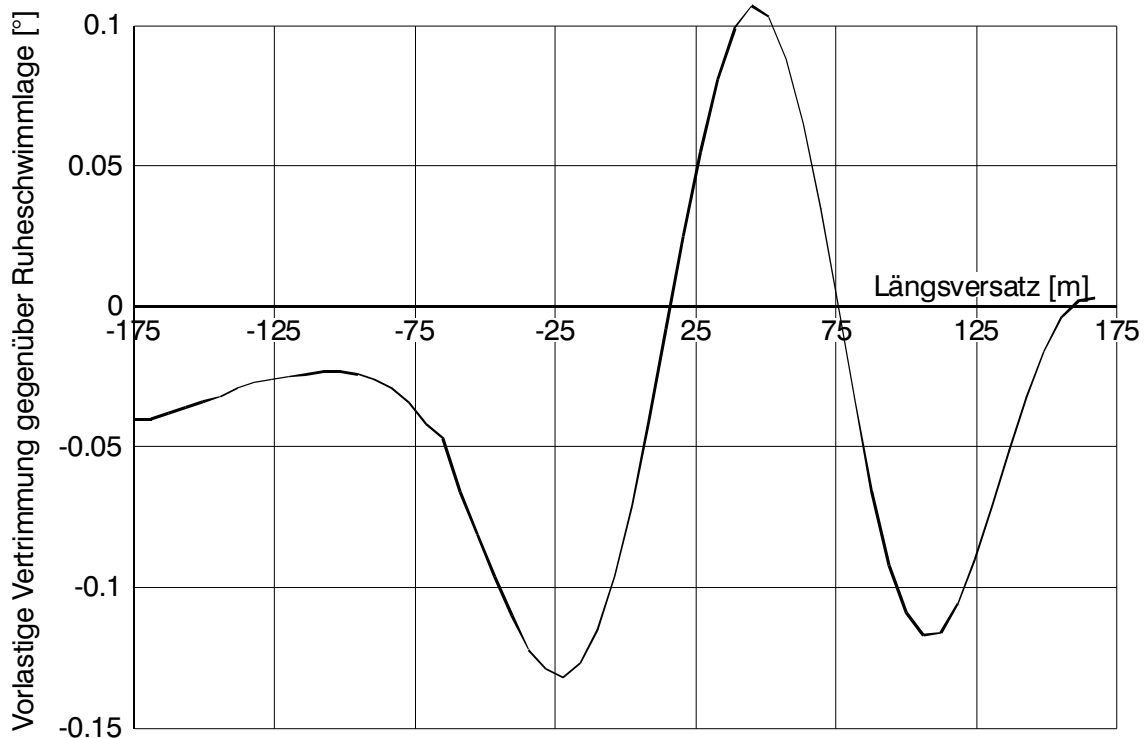


Abb. 3.15 Vorlastige Vertrimmung während des Überholvorgangs.
Geschwindigkeiten 9 km/h bzw. 13.4 km/h; Wassertiefe 4 m

Die Änderung der Vertrimmung während des Überholvorgangs entspricht weitgehend der in Abb. 3.10 angegebenen Änderung des Widerstands; allerdings unterscheiden sich die beiden Änderungen um einen negativen Proportionalitätsfaktor. Nimmt man an, dass die Trimmänderung gleich der mittleren Neigung der Wasseroberfläche gegenüber der Horizontalen im Bereich des überholten Leichters ist, so ergäbe sich die Widerstandsänderung gleich der „Hangabtriebskraft“ $mg/\Delta\theta$. Diese Beziehung wird von den berechneten Daten nur in etwa erfüllt: Aus Abb. 3.10 ergibt sich die Differenz zwischen maximalem und minimalem Widerstand zu 63 kN, während sich aus der Hangabtriebskraft mit dem entsprechenden Trimmunterschied von $0,237^\circ$ nach Abb. 3.15 eine Widerstandsänderung von 86 kN ergibt.

3.10 Containerschiff–Feeder

Als zweite Untersuchung wurden mit Unopam Berechnungen zu einem Überholvorgang zwischen zwei Containerschiffen durchgeführt.

Der Überholer ist ein Containerschiff (M1805/A) mit den Hauptabmessungen

$$L = 230.77m, \quad B = 32.20m, \quad T = 10.12m.$$

Aus dem Spantenriss wurde eine für das Programm ASS (Mutterprogramm von Unopam) geeignete numerische Beschreibung der Schiffsform erstellt (Abb. 3.16). Abb. 3.17 zeigt das dazu generierte Paneelnetz mit 640 Dreiecken auf einer Schiffshälfte.

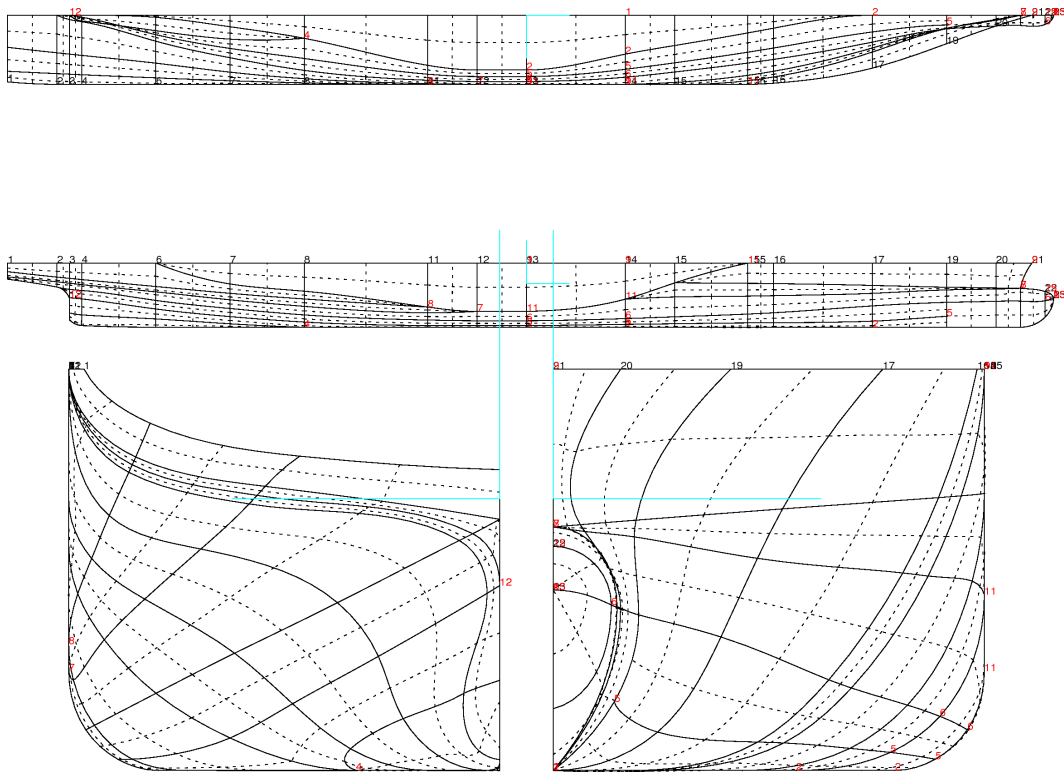


Abb. 3.16 Numerische Formbeschreibung des Überholers

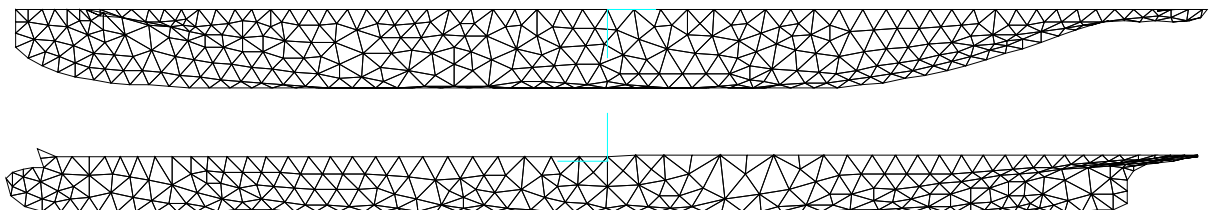


Abb. 3.17 Paneelnetz des Überholers

Für den Überholer allein wurde eine Berechnung des Wellenbildes und des Widerstands bei 15 kn Geschwindigkeit auf 15 m Wassertiefe in Seewasser durchgeführt. Abb. 3.18 zeigt das Wellenbild. Der Druckwiderstand ergab sich zu 53 kN, der Gesamtwiderstand zu 540 kN.

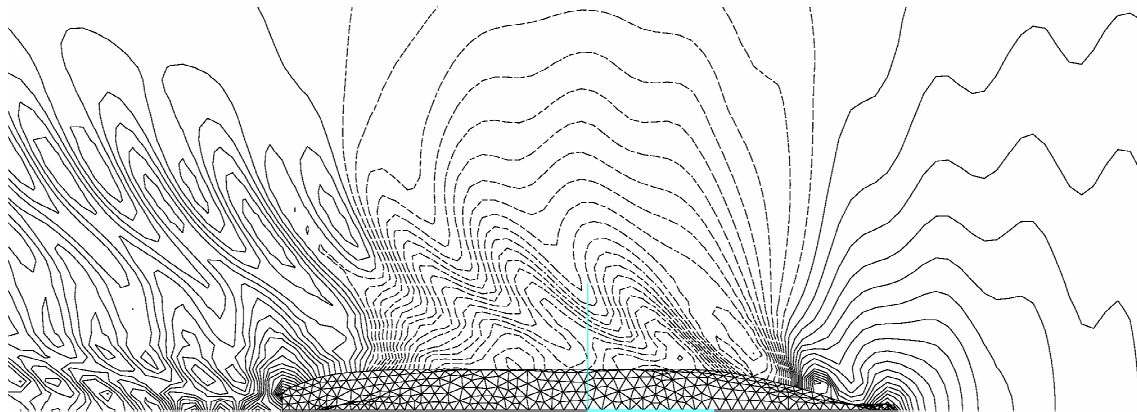


Abb. 3.18 Wellenbild des Überholers bei 15 kn Geschwindigkeit in 15 m tiefem Wasser. Der vertikale Abstand der Höhenlinien beträgt 5 cm, die Achslänge 50 m.

Das überholte Schiff ist ein Feeder-Containerschiff (M1807) mit den Hauptabmessungen

$$L = 126m, \quad B = 21.3m \quad T = 7.40m.$$

Aus dem Spantenriss wurden die in Abb. 3.19 dargestellte numerische Beschreibung der Schiffsform und ein Paneelnetz mit 600 Paneelen auf einer Seite der getauchten Schiffsoberfläche (Abb. 3.20) erzeugt.

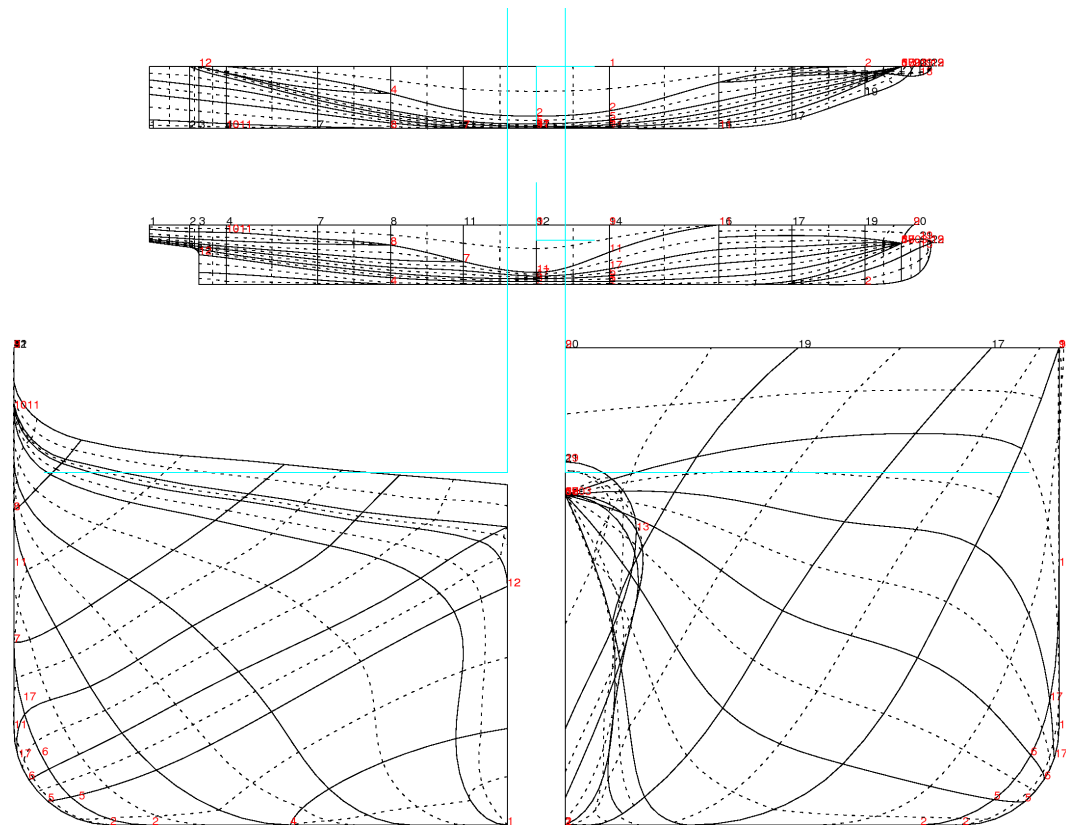


Abb. 3.19 Numerische Formbeschreibung des Feederschiffes

Eine Berechnung des Widerstands für dieses Schiff allein bei 12 kn Geschwindigkeit auf 15 m Wassertiefe in Seewasser ergab einen Druckwiderstand von 27 kN und einen Gesamtwiderstand von 150 kN.

Der Überholvorgang sollte für den Fall berechnet werden, dass der Überholer mit 15 kn, das überholte Schiff mit 12 kn Geschwindigkeit auf 15 m Wassertiefe auf parallelem Kurs mit einem seitlichen Abstand von 150 m fahren. Der Abstand wurde wie auch in anderen Fällen interpretiert als Abstand zwischen den Bordwänden beider Schiffe; die Schiffsmitten haben dann einen seitlichen Versatz von 176,75 m. Wie zuvor wurde mit Seewasser gerechnet. Haupt-Rechenergebnis sind die am überholten Schiff auftretende Längskraft, die Querkraft und das Giermoment.

Für den Überholvorgang kommt es auf die Kräfte und Momente am überholten Schiff an, denn nur das überholte Schiff läuft Gefahr, den Kurs nicht halten zu können oder auf die Geschwindigkeit des Überholers beschleunigt zu werden, so dass der Überholvorgang nicht abgeschlossen werden kann. Die Wirkung des überholten Schiffes auf den Überholer ist klein; die Rückwirkung dieses Einflusses vom Überholer auf das überholte Schiff erscheint noch wesentlich kleiner und damit vernachlässigbar. Deshalb wird diese Rückwirkung zur Verringerung des numerischen Aufwands vernachlässigt.

Zur Berechnung des Einflusses des Überholers auf das überholte Schiff wird die Quellverteilung, die die Störströmung (Abweichung von der parallelen Anströmung) um den Überholer darstellt, für den Überholer allein berechnet und dann für die Berechnung der Strömung um das überholte Schiff als gegeben angesetzt. Dies umfasst die Körperquellen und die Quellen oberhalb der Wasseroberfläche und unterhalb des Wasserbodens an beiden Seiten des Überholers. Die Quellverteilung wird aus der Datei 'dumpfile' des Überholers gelesen. Anschließend werden die Quellen in Längs- und Querrichtung versetzt, wie es dem Zustand zur Zeit $t=0$ entspricht. Ein weiterer Längsversatz der Quellen um den Betrag Zeitschrittweite mal Differenzgeschwindigkeit wird vom Programm automatisch zu jedem Zeitschritt vorgenommen.

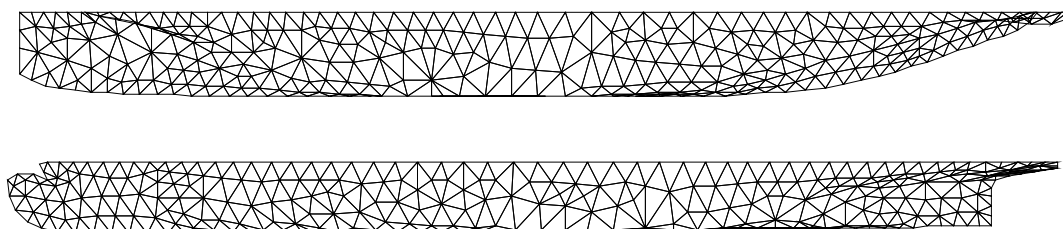


Abb. 3.20 Paneelierung einer Hälfte des Feederschiffes

Um die Querkraft und das Giermoment am überholten Schiff berechnen zu können, muss die Unsymmetrie der Strömung zur Mittschiffsebene beachtet werden. Um diese zu erfassen, mussten beide Schiffsseiten und die Wasseroberfläche zu beiden Seiten des Schiffes paneeliert werden. Außerdem wurde an der Hinterkante des

Rumpfes unterhalb der Gillung eine Kutta-Bedingung angesetzt. Sie wird erfüllt durch eine Wirbelverteilung auf der benetzten Schiffsoberfläche sowie durch freie Wirbel, die vom Heck nach hinten und von der Wasserlinie nach oben abgehen. Das Ruder des Feederschiffs wurde nicht berücksichtigt.

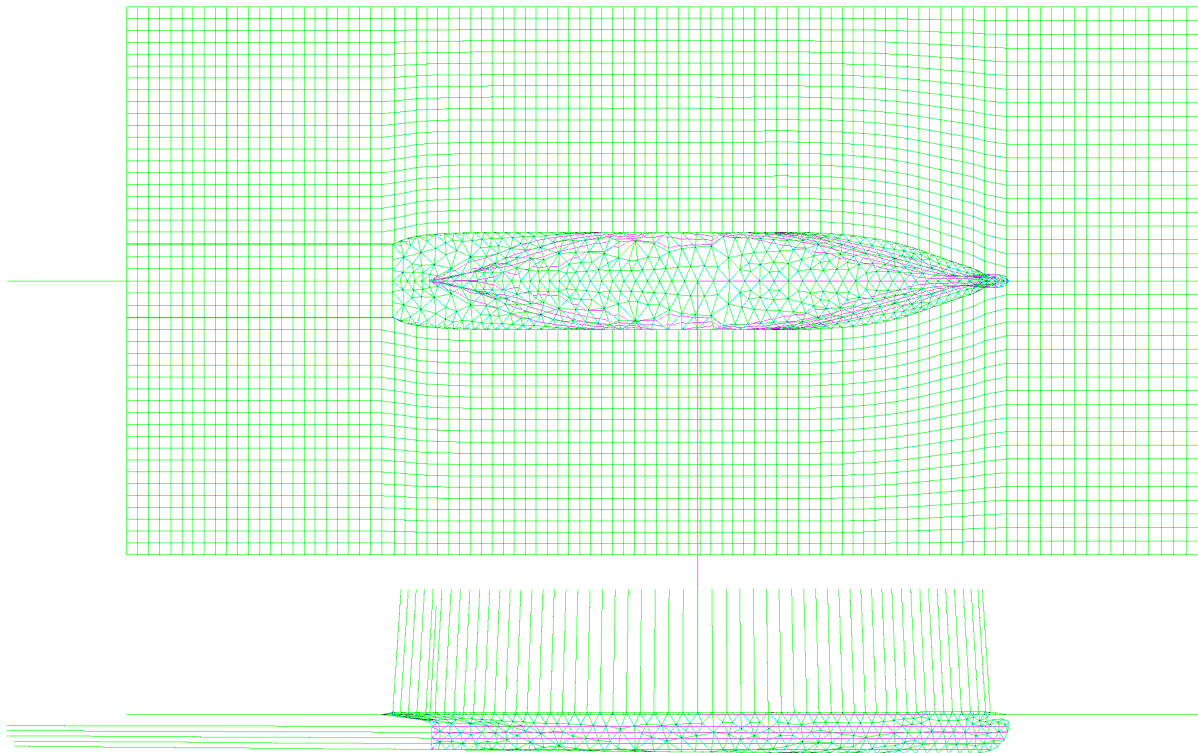


Abb. 3.21 Körper- und Wasseroberflächennetz auf dem Feederschiff einschließlich der freien Wirbel (abgekürzt geplottet)

Es zeigte sich, dass die Berechnungen unter Ansatz der Quellverteilung des Überhollers zunächst nicht konvergierten. Ursache waren die diffizilen Verhältnisse am Bug und Heck: Oberkante Wulstbug und Unterkante Spiegel des Feederschiffs lagen so dicht bei der Wasseroberfläche, dass sie bei einigen Iterations- und Zeitschritten eintauchten, bei anderen aber austauchten. Diese Fälle kann das Programm Unopam nicht behandeln. Deshalb wurde die Masse des Feederschiffs, die ursprünglich zu etwa 12200 t angesetzt war, auf 13000 t erhöht. Dies entspricht einer Tiefertauchung von etwa 0,32 m. (Die Masse und die Lage ihres Schwerpunkts sollen, möglicherweise abweichend von den wirklichen Schiffsdaten, so angesetzt werden, dass die paneelierte Schiffsform statisch die korrekte Schwimmage annimmt.) Außerdem wurde der Massenschwerpunkt gegenüber der Position, die zu unvertrimmtem Schiff ohne Fahrt führen würde, um 0,2 m nach hinten verschoben, um die Spiegeltauchung auf Kosten der Wulsttauchung etwas zu vergrößern.

Bei einer instationären Berechnung wird zum Zeitpunkt 0 die Flüssigkeit als vom Schiff ungestört angenommen. Am Ende des ersten Zeitschritts werden dagegen die

Randbedingungen erfüllt, insbesondere also kein Durchfluss durch das Schiff zugelassen. Das führt bei kurzem Zeitschritt zu einer starken Beschleunigung des Wassers in Schiffslängsrichtung vor allem am Bug und Heck. Dies hat eine hohe Bugwelle und ein Wellental am Heck zur Folge, was zu starker Vertrimmung des Schiffes und zum Austausch des Spiegels und damit wieder zu Konvergenzproblemen führt. Um diese zu vermeiden, wird die Berechnung mit einem Zeitschritt von 1000 s Dauer begonnen; die Wasserbeschleunigung und die Wellenbildung sind dementsprechend klein. Danach wird die Berechnung mit einem Zeitschritt von 5 s Dauer fortgesetzt, wie er für die Auflösung der instationären Strömung beim Überholvorgang angemessen erscheint. (Das voll implizite Verfahren kennt keine Beschränkung des Zeitschritts aus Stabilitätsgründen.)

Die Berechnung des instationären Überholvorgangs begann – wenn man den ersten Zeitschritt von 1000 s Dauer weglässt – mit einem Längsversatz zwischen den Hauptspanten beider Schiffe von -350 m; negative Werte bedeuten, dass der Überholer noch hinter dem zu überholenden Schiff ist. Abb. 3.22 zeigt als ein Beispiel die Wellenbildung um das überholte Schiff bei einem Längsversatz von $-195,7$ m. Dabei ist der Einfluss des Überholers noch klein. Der Überholer befindet sich im Bild oberhalb von der Mittellinie des überholten Schiffes. (Die Ausdrücke Backbord und Steuerbord können zu Fehldeutungen führen, weil die Abbildung das Schiff von unten, nicht wie gewohnt von oben gesehen zeigt.)

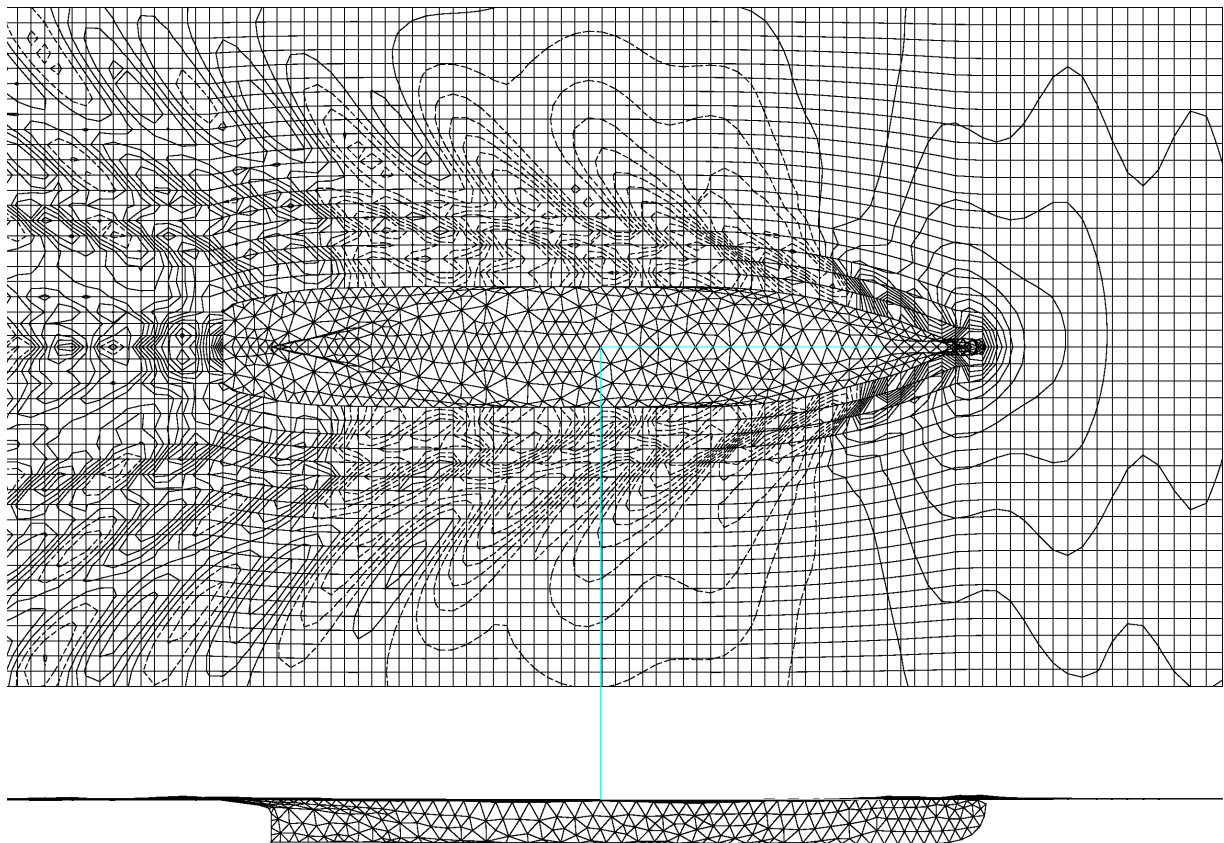


Abb. 3.22 Wellenbild um das Feederschiff beim Längsversatz $-195,7$ m.
Höhenlinien alle 5 cm.

Tabelle 3.6 zeigt als Ergebnis der Berechnung abhängig vom Längsversatz s : Widerstand R_T (einschließlich Reibungswiderstand; + nach hinten) einschließlich der Wechselwirkung mit dem Überholer, Seitenkraft Y (+ vom Überholer weg) und Giermoment N (+ dreht Bug vom Überholer weg)

Tabelle 3.6: Widerstand, Seitenkraft und Giermoment am Feederschiff abhängig vom Längsversatz

s [m]	R_T [kN]	Y [kN]	N [kNm]	s [m]	R_T [kN]	Y [kN]	N [kNm]	s [m]	R_T [kN]	Y [kN]	N [kNm]
-342,3	141,9	36,2	898	-87,7	340,6	21,4	12005	166,9	39,3	23,7	-9201
-334,6	138,1	40,4	936	-80	349,8	-8,1	12151	174,6	55,5	32,4	-8691
-326,9	134,6	44,2	999	-72,3	355,5	-38,7	12145	182,3	70,5	39,2	-8174
-319,1	130,4	48,5	1065	-64,5	357,4	-69,8	11983	190	84,1	44,3	-7653
-311,4	124,9	52,7	1146	-56,8	354,8	-101,3	11654	197,8	96,4	46,9	-7160
-303,7	118,8	56,8	1231	-49,1	346,5	-132,7	11137	205,5	107,1	49,5	-6652
-296	113,4	61,8	1315	-41,4	335,4	-163,2	10424	213,2	116,1	52,6	-6089
-288,3	109,2	67,4	1412	-33,7	318,7	-193,4	9535	220,9	123,9	51,2	-5610
-280,6	106,6	73,5	1525	-26	297,4	-219,8	8447	228,6	130,5	48,7	-5218
-272,9	105,5	80	1650	-18,2	271,8	-243,2	7225	236,3	135,9	48	-4796
-265,1	106,2	86,8	1799	-10,5	242,5	-263,5	5854	244,1	140,3	46,2	-4405
-257,4	108,4	94,1	1974	-2,8	210,6	-279,9	4378	251,8	143,9	43,8	-4052
-249,7	112,1	101,5	2180	4,9	176,7	-291,7	2836	259,5	146,9	41,2	-3726
-242	116,9	109	2415	12,6	142,1	-303,3	1141	267,2	149,2	38,5	-3433
-234,3	122,6	116,6	2679	20,3	106,9	-300,3	-391	274,9	151	35,7	-3163
-226,6	128,7	124,2	2977	28	72,4	-298,2	-1919	282,6	152,2	32,9	-2923
-218,8	135,2	131,5	3313	35,8	39,1	-288,7	-3274	290,3	152,8	30,1	-2709
-211,1	142	138,4	3685	43,5	9,8	-285,6	-4827	298,1	153,1	27,7	-2511
-203,4	149,2	144,7	4092	51,2	-15,9	-271,3	-6179	305,8	153	25,7	-2317
-195,7	156,8	150,2	4528	58,9	-37,6	-254	-7395	313,5	152,7	23,7	-2137
-188	164,9	154,1	4989	66,6	-54,8	-234,4	-8468	321,2	152	21,5	-1982
-180,3	173,9	157,7	5494	74,3	-67,3	-212,7	-9383	328,9	151,3	19,3	-1845
-172,6	183,8	159,7	6033	82	-75,1	-189,3	-10129	336,6	150,5	17,7	-1715
-164,8	194,9	159,8	6602	89,8	-78,4	-164,8	-10697	344,3	149,7	16,5	-1581
-157,1	207,2	158,1	7195	97,5	-77,5	-139,8	-11093	352,1	149	14,6	-1479
-149,4	220,8	154,1	7807	105,2	-73,5	-115,4	-11324	359,8	148,4	13,8	-1355
-141,7	235,6	146,4	8392	112,9	-66	-92	-11412	367,5	147,8	12,2	-1261
-134	251,5	138,1	9018	120,6	-55,5	-69,8	-11361	375,2	147,3	10,8	-1179
-126,3	267,9	126,5	9634	128,3	-42,7	-49,2	-11191	382,9	146,8	9,6	-1104
-118,6	284,9	110,1	10136	136	-27,9	-30,2	-10914	390,6	146,3	8,6	-1036
-110,8	300,9	94,1	10665	143,8	-11,7	-13,5	-10558	398,3	145,8	7,9	-971
-103,1	315,6	76,8	11329	151,5	5,2	1	-10145	406,1	145,1	7,1	-909
-95,4	329	49,6	11721	159,2	22,4	13,2	-9689	413,8	144,4	6,4	-855
								421,4	143,7	5,7	-808

Abb. 3.23 bis Abb. 3.25 zeigen dieselben Ergebnisse wie Tabelle 3.6. Die Berechnung dauerte auf einem modernen PC rund 60 Stunden. Für jeden Zeitschritt wurden meist 4 bis 6 Iterationsschritte benötigt. Ursache für die lange Rechenzeit sind die

vielen unbekanntem Quell- und Wirbelstärken (5189) und die vielen Zeitschritte (etwa 100). Durch Variation der Zeitschrittweite und des Körper- und Wasseroberflächen-netzes könnte man prüfen, welche Vergrößerungen zur Verminderung der Rechenzeit ohne wesentliche Einbuße an Genauigkeit möglich sind; dies wurde aber bisher nicht getan.

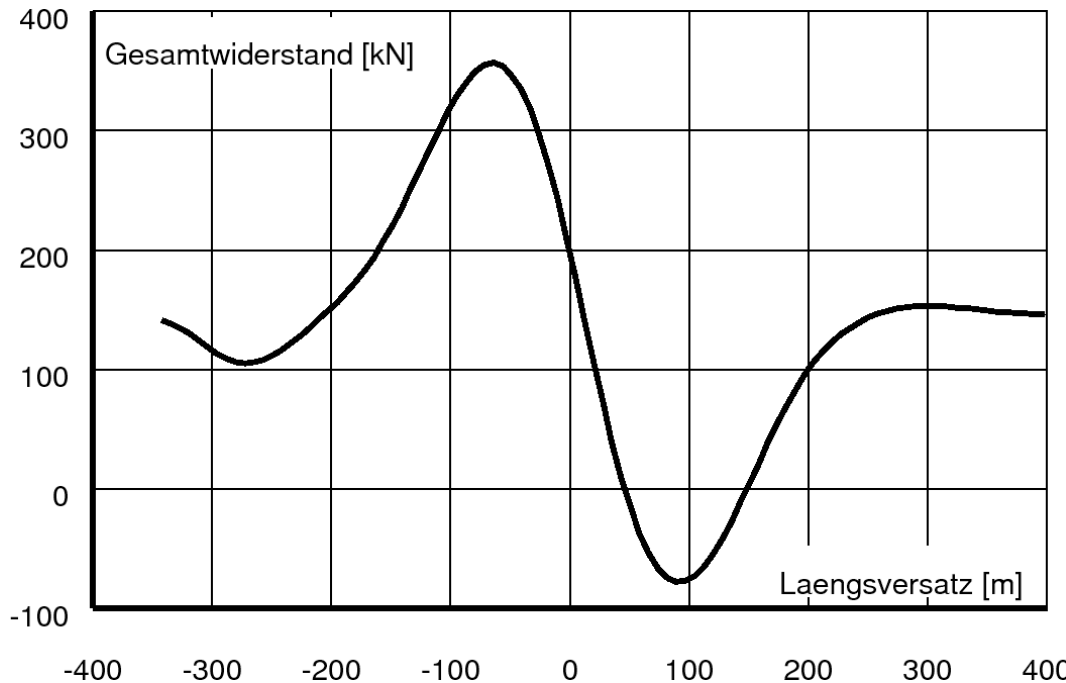


Abb. 3.23 Abhängigkeit des Widerstands des Feederschiffs vom Längsversatz des Überholers

Die in Abb. 3.23 bis Abb. 3.25 dargestellten Kräfte können direkt mit Versuchsergebnissen verglichen werden, bei denen die Modelle der beiden Schiffe auf parallelen Kursen zwangsgeführt werden. Wenn die Schiffe dagegen frei manövrieren, muss am überholten Schiff nicht das negative Wechselwirkungs-Moment $-N$ mit dem Ruder aufgebracht werden, um das Schiff auf Kurs zu halten. Das erforderliche Rudermoment (bezogen auf den Hauptspant) setzt sich aus $-N$ und einem weiteren Moment zusammen, das durch die Abdrift entsteht, welche von der Querkraft Y und von der Ruderkraft bewirkt wird.

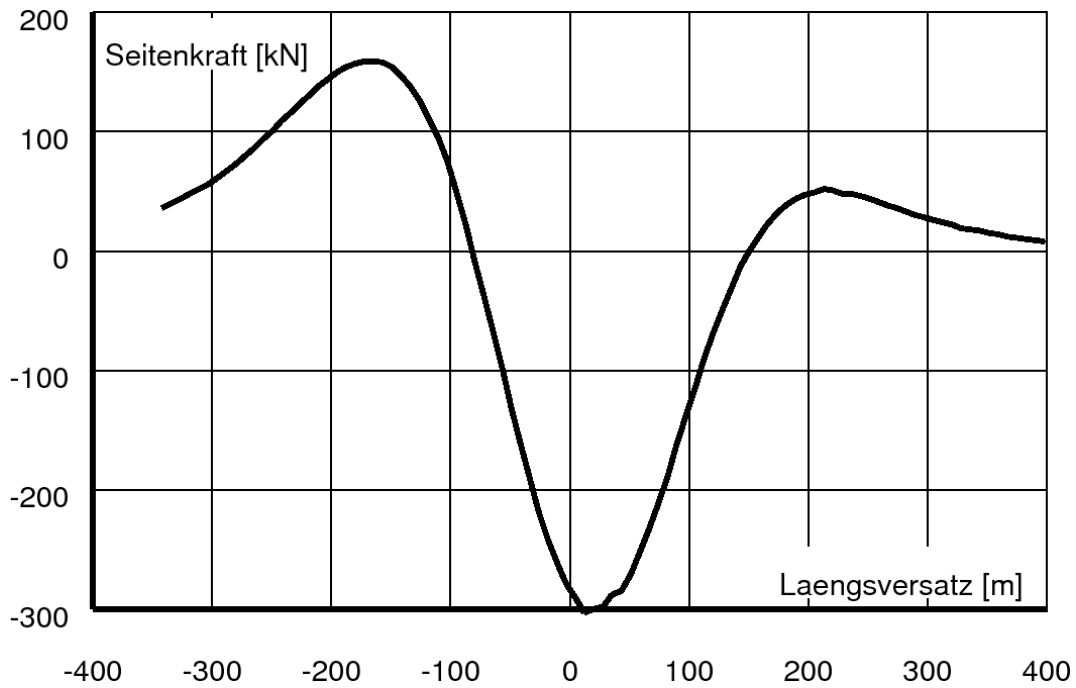


Abb. 3.24 Abhängigkeit der Seitenkraft auf das Feederschiff vom Längsversatz des Überholers. + bedeutet: Kraft weg vom Überholer

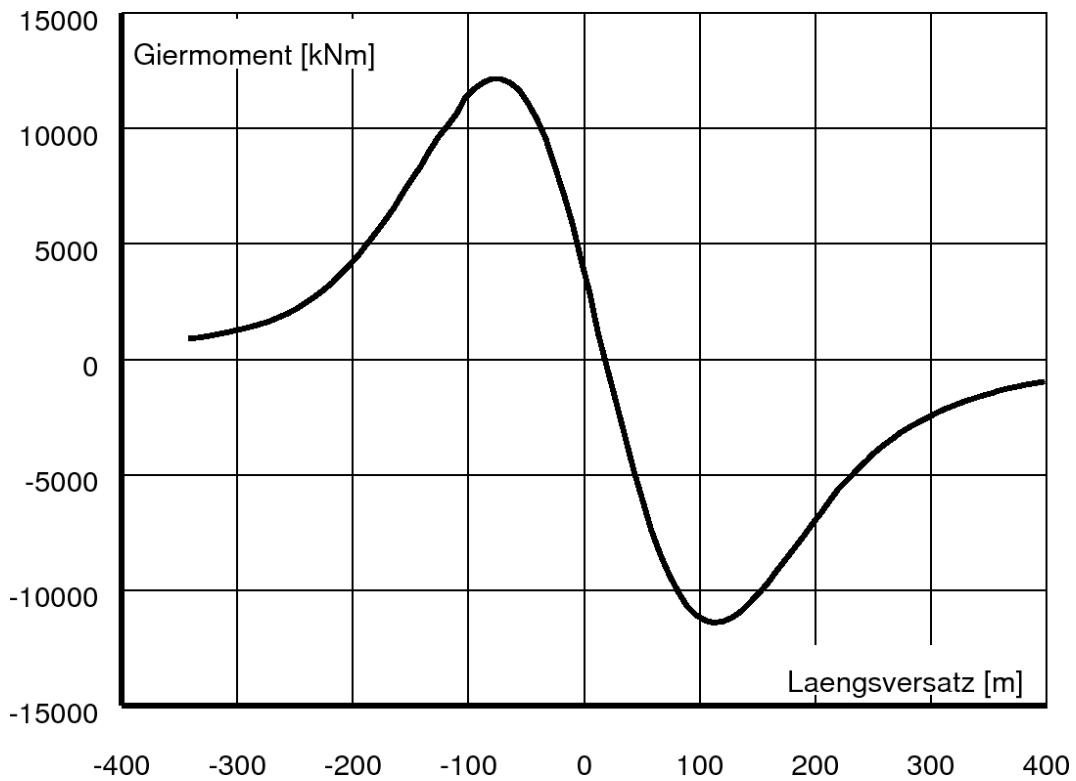


Abb. 3.25 Abhängigkeit des Giermoments am Feederschiff vom Längsversatz des Überholers.+ bedeutet: dreht Bug weg vom Überholer

Unter Ansatz einer linearen Abhängigkeit der Seitenkraft und des Gierrmoments am überholten Schiff von der Driftgeschwindigkeit v und dem Ruderwinkel δ gilt

$$Y_{gesamt} = Y + Y_v v + Y_\delta \delta = 0; \quad (3.44)$$

$$N_{gesamt} = N + N_v v + N_\delta \delta = 0. \quad (3.45)$$

Die Lösung dieses linearen Gleichungssystems für v und δ ergibt

$$\delta = \frac{\begin{vmatrix} Y_v & -Y \\ N_v & -N \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} Y_v & Y_\delta \\ N_v & N_\delta \end{vmatrix}}. \quad (3.46)$$

Als Näherung kann man ansetzen (vgl. z.B. Bericht Nr. 412 des Instituts für Schiffbau von Wolff, Dezember 1981):

$$N_v = 0.45LY_v; \quad N_\delta = -0.48LY_\delta. \quad (3.47)$$

Setzt man dies in (5) ein, so ergibt sich das erforderliche Rudermoment zu

$$N_\delta \delta = 0.52(-N + 0.45LY). \quad (3.48)$$

Der Faktor 0,52 resultiert daraus, dass die Ruderkraft eine zusätzliche Abdrift verursacht, die eine vorn am Rumpf angreifende Querkraft erzeugt; diese verstärkt das (auf den Hauptspant bezogene direkte) Rudermoment $N_\delta \delta$ fast auf das Doppelte.

Der Ausdruck (3.48) ist in Abb. 3.26 aufgetragen.

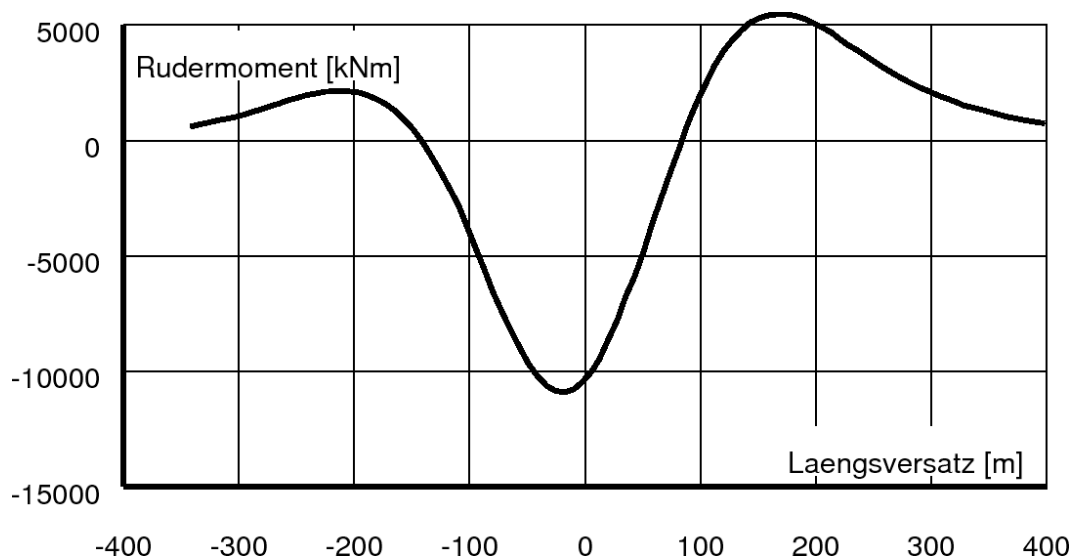


Abb. 3.26 Abhängigkeit des erforderlichen Rudermoments, um das Feederschiff auf Kurs zu halten, vom Längsversatz des Überholers. + bedeutet: dreht Bug weg vom Überholer

Zu Beginn des Überholmanövers muss das Ruder ein Moment aufbringen, das den Bug zum Überholer dreht; sein Betrag ist etwa ebenso groß wie das maximale Wechselwirkungs-Moment, aber das Maximum des Rudermoments tritt später auf als das Maximum des Wechselwirkungs-Moments. Anschließend muss das Ruder den Bug vom Überholer wegdrehen. Auch hier tritt das Maximum des Rudermoments später auf als das Maximum des Wechselwirkungs-Moments. In diesem Fall ist der Betrag des Rudermoments aber nur etwa halb so groß wie der des Wechselwirkungs-Moments.

Zuletzt werden die berechneten Werte für Höhen- und Trimmänderung des überholten Feederschiffs dargestellt. Für das Feederschiff ergab sich der Unterschied zwischen der bei der hydrodynamischen Berechnung angesetzten Ausgangsschwimmlage (Tiefgang 7,6 m, Trimm 0) und der statischen Gleichgewichtsschwimmlage: Austauchung 0,046 m; vorlastige Vertrimmung 0,060°.

Diese Werte wurden von den berechneten Schwimmlageänderungen abgezogen. Das Ergebnis zeigen die Abb. 3.27 und Abb. 3.28.

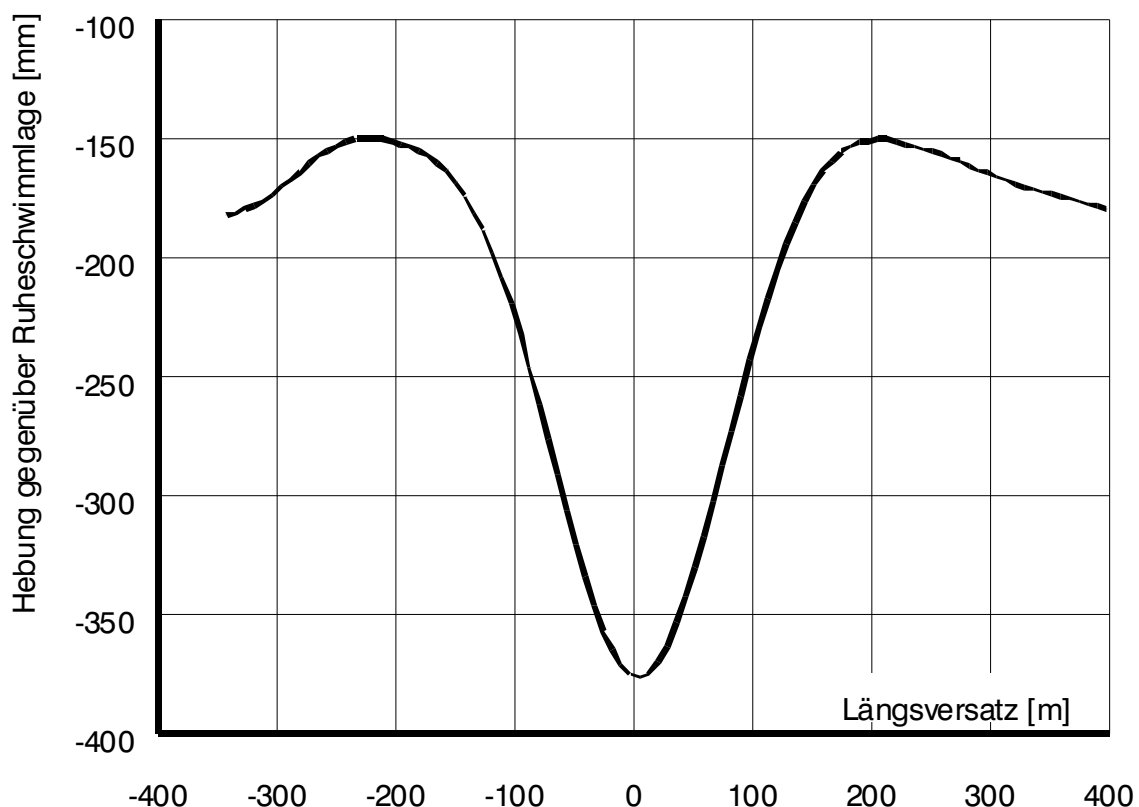


Abb. 3.27 Anhebung des Schiffes während des Überholvorgangs.
Geschwindigkeiten 12 kn bzw. 15 kn; Wassertiefe 15 m

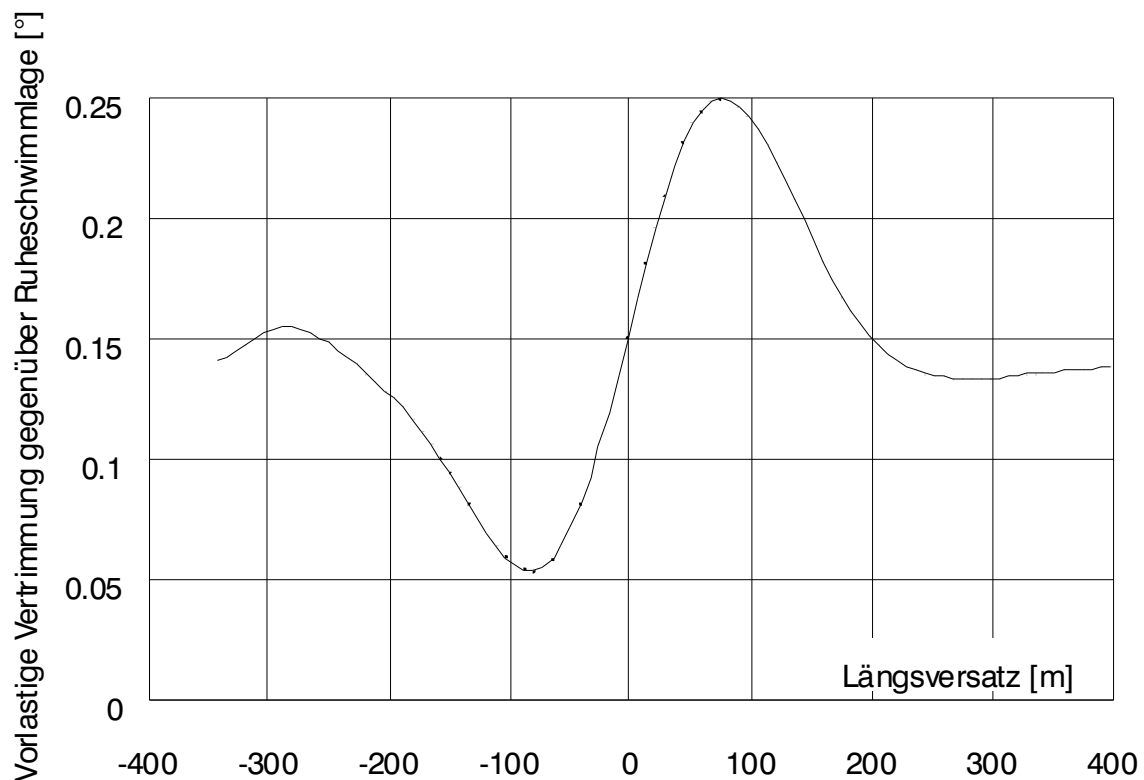


Abb. 3.28 Vorlastige Vertrimmung während des Überholvorgangs.
Geschwindigkeiten 12 kn bzw. 15 kn; Wassertiefe 15 m

Wieder wurde ein Vergleich angestellt zwischen der maximalen Widerstandsänderung und der maximalen Differenz der Hangabtriebskraft $gm\theta$ unter der Annahme, dass die Trimmänderung der Änderung der Neigung der Wasseroberfläche gemittelt über die Feederschiffslänge entspricht. Es ergab sich: maximale Widerstandsänderung 432 kN, maximale Änderung der Hangabtriebskraft 438 kN, also eine sehr gute Übereinstimmung.

4 Kopplung ANSYS-CFX mit BESHwa-Ergebnissen

4.1 Aufgabenstellung

Zur numerischen Optimierung der Schiffsförm unter Berücksichtigung der Reibungseffekte für stationäre Problemstellungen wird im DST der kommerzielle RANSE-Löser ANSYS-CFX eingesetzt. Dabei findet die Wirkung der Verformung der freien Wasseroberfläche auf Grund der dafür notwendigen Rechenzeit im Regelfall keine Berücksichtigung. Die durch die Fahrt des Schiffskörpers induzierten Translationen und Winkelbewegungen des Schiffes, können bei stationären Berechnungen, ohne eine automatische Gitteranpassung während der Laufzeit, nicht erfasst werden. Die Berechnung der Wasseroberflächenverformung, die Vertrimmung und die Absenkung des Schiffskörpers werden mit potentialtheoretischen Verfahren ermittelt.

Unter Nutzung des vorhandenen CFD-Codes (ANSYS-CFX) sollen stationäre Berechnungsfälle untersucht werden, welche Momentaufnahmen eines Überholvorganges zweier Schiffe simulieren. In unterschiedlichen relativen Positionen der Schiffe zueinander, sollen die wirkenden Kräfte und Momente, sowie die Ausbildung der Strömungsverhältnisse in der Nähe der Schiffe erfasst werden.

Durch die Fahrwasserbegrenzung (Wassertiefe, seitliche Begrenzung) in der Binnenschiffahrt treten im Gegensatz zur Fahrt eines Schiffes im tiefen Wasser Effekte auf, die einen wesentlichen Einfluss auf das Fahrverhalten und die Strömungsverhältnisse im Nahbereich des Schiffes haben. Aus diesem Grund können die dynamische Schwimmlagenveränderung der Schiffskörper und die Veränderung der Wasseroberfläche nicht vernachlässigt werden. Zur Realisierung dieser physikalischen Erscheinungen soll die Möglichkeit einer Kopplung der Berechnungsergebnisse aus einer Flachwasserapproximation von Boussinesq (BESHwa) mit dem RANSE-Löser geprüft werden. Mit den Berechnungsergebnissen aus dem Boussinesq-Verfahren sollen die Lösungsgebiete für die RANSE-Berechnungen geometrisch modifiziert werden.

4.2 Verfahren

4.2.1 Erhaltungsgleichungen und Turbulenzmodellierung

Der in diesem Projekt eingesetzte RANSE-Löser ANSYS-CFX ermöglicht die Berechnung von inkompressiblen, reibungsbehafteten und turbulenten Strömungen, die durch die Erhaltungsgleichungen für Masse und die Impulsgleichungen (Navier-Stokes-Gleichung) beschrieben werden. Für turbulente Strömungen gilt, dass sie räumlich und zeitlich transient sind, das heißt, dass sich Geschwindigkeit und Druck unregelmäßig ändern. Um die gesamten turbulenten Erscheinungen vollständig zu erfassen, muss auch die Dauer und die Größe der kleinsten auftretenden Wirbel aufgelöst werden. Dazu muss die Gitterauflösung des Berechnungsgebietes entspre-

chend fein sein. Mit der aktuellen Rechentechnik ist die direkte räumliche und zeitliche Auflösung nur für Problemstellungen bei sehr kleinen Reynoldszahlen möglich und findet bei technischen Problemstellungen keine Anwendung. Zur näherungsweise Erfassung der auftretenden Turbulenzen werden statistische Modelle genutzt. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Strömungsgrößen Druck und Geschwindigkeit in einen zeitlichen Mittelwert und einen Schwankungsanteil aufspalten lassen. Durch Einsetzen in die Navier-Stokes-Gleichungen entstehen zusätzliche Terme (Reynoldsspannungen) mit weiteren Unbekannten. Damit die Anzahl der Unbekannten der Anzahl der Gleichungen entspricht, müssen Turbulenzmodelle eingeführt werden. Diese Modelle stellen den Zusammenhang zwischen den ursprünglichen Strömungsgrößen und den Komponenten des Spannungstensors her. Alle Modelle beschreiben nicht die turbulenten Erscheinungen, sondern nur die Auswirkung der Turbulenz auf das Fluid.

Bei den RANSE-Berechnungen wurde unter anderem das k-Epsilon-Turbulenzmodell eingesetzt. Dieses Zwei-Gleichungsmodell ist weit verbreitet und führt bei Standardberechnungen zu zufrieden stellenden Ergebnissen. Da das k-Epsilon-Modell von einer turbulenten Strömung im gesamten Berechnungsgebiet ausgeht, ist es in Wandnähe nicht gültig. Die wandnahe Strömung muss durch Wandfunktionen beschrieben werden. Weitere Berechnungen werden mit dem k- ω -SST (Shear-Stress-Transport) [Menter 94] durchgeführt. Bei diesem Modell handelt es sich um eine Kombination aus dem k- ϵ - und dem k- ω -Modell in Verbindung mit einer modifizierten Wirbelviskosität zur besseren Berücksichtigung des Transports der turbulenten Spannungsterme in den Grenzschichten.

4.2.2 Diskretisierung

Die analytische Lösung der RANSE-Gleichungen ist für praxisrelevante Problemstellungen nicht möglich. Alle RANSE-Berechnungsverfahren setzen eine Diskretisierung des Lösungsgebietes voraus. Dazu wird der gesamte Berechnungsraum in Volumenelemente aufgeteilt. Das in diesem Vorhaben eingesetzte Berechnungsverfahren CFX löst das gegebene Gleichungssystem mit der Finite-Volumen-Methode. Für das gesamte Lösungsgebiet werden die Erhaltungsgleichungen über die einzelnen Volumenelemente integriert. In Abhängigkeit von den gewählten Randbedingungen werden Druck und Geschwindigkeit für jeden Berechnungspunkt ermittelt.

Für die hier durchgeführten viskosen Berechnungen der Schiffsumströmung wird der RANSE-Löser ANSYS-CFX 10.0 (11.0) eingesetzt. Die Lösung der Massenerhaltungsgleichung und der Impulserhaltungsgleichungen erfolgt gleichzeitig für jede Iteration.

Die Berechnungen können durch den gekoppelten Löser für blockstrukturierte bzw. unstrukturierte Gitter durchgeführt werden. Dabei können die Gitterpunkte nicht-orthogonal und randangepasst im Raum angeordnet werden.

4.3 Numerische Berechnungen

4.3.1 Beschreibung der Berechnungsfälle

4.3.1.1 Überholvorgang Seeschiff-Seeschiff

Um die Wirkung der Vorbeifahrt eines Schiffes auf ein überholtes Schiff zu ermitteln, sollen die Kräfte und Momente am überholten Schiff, sowie die Strömungsverteilung im schiffsnahen Bereich bestimmt werden. Der hier ausgewählte Berechnungsfall stellt eine typische Verkehrssituation auf Binnenwasserstraßen dar. Ein Containerschiff (Schiff A) mit einer Gesamtlänge von ca. 100 m wird von einem 280 m langen Containerschiff (Schiff B) überholt. Der Passierabstand zwischen beiden Schiffen beträgt 150 m, wobei der Abstand sich auf die Mittellängsachse beider Schiffe bezieht. Für die numerischen Untersuchungen wurde eine konstante Wassertiefe von 14,4 m angenommen. Der Tiefgang für Schiff A betrug 6,3 m und für Schiff B 11,4 m.

Die Vorbeifahrt eines Schiffes ist ein instationärer Vorgang, dessen numerische Berechnung mit einem sehr hohen Zeitaufwand verbunden ist. Jedoch ist die Relativgeschwindigkeit beim Überholvorgang zweier Schiffe üblicherweise sehr gering. Aus diesen Gründen wurden die CFD-Untersuchungen mit dem CFX-Löser auf quasistationäre Berechnungsfälle beschränkt. Für beide Schiffe wurde eine konstante Fahrgeschwindigkeit von 15 kn angenommen. Das überholende Schiff (Schiff B) wurde in fünf Längspositionen relativ zum Schiff A angeordnet. Die Positionen sind in Abb. 4.1 dargestellt.

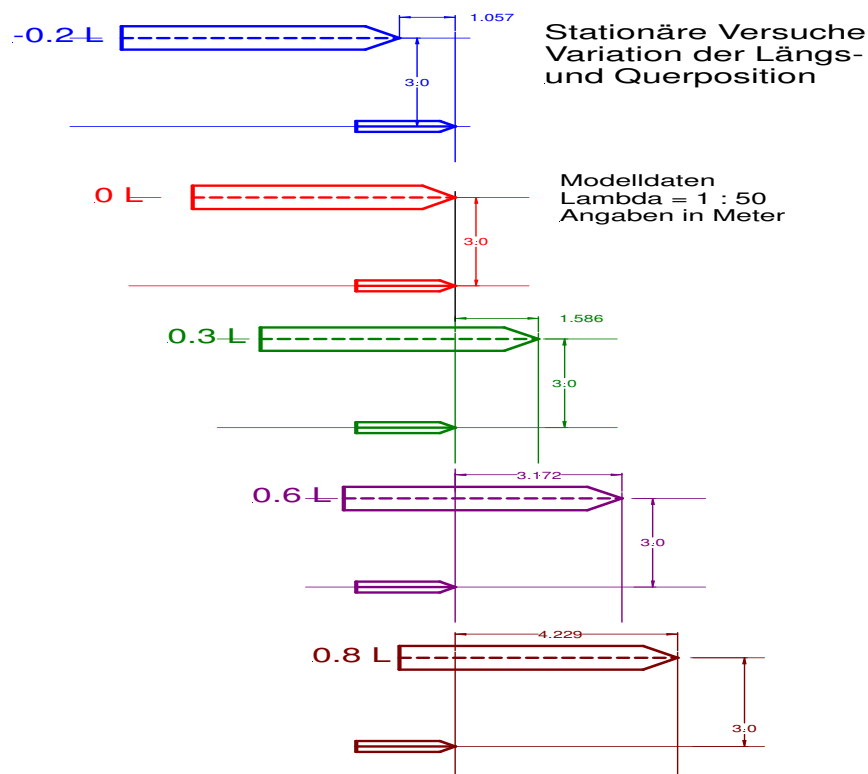


Abb. 4.1 Relativpositionen der Schiffe - Berechnungsfall 1

Es wird davon ausgegangen, dass sich beide Schiffe auf einem parallelen Kurs befinden. Die seitliche Ausdehnung (Breite des Kanals) ist durch den Flachwassertank des DST vorgegeben und beträgt 490 m.

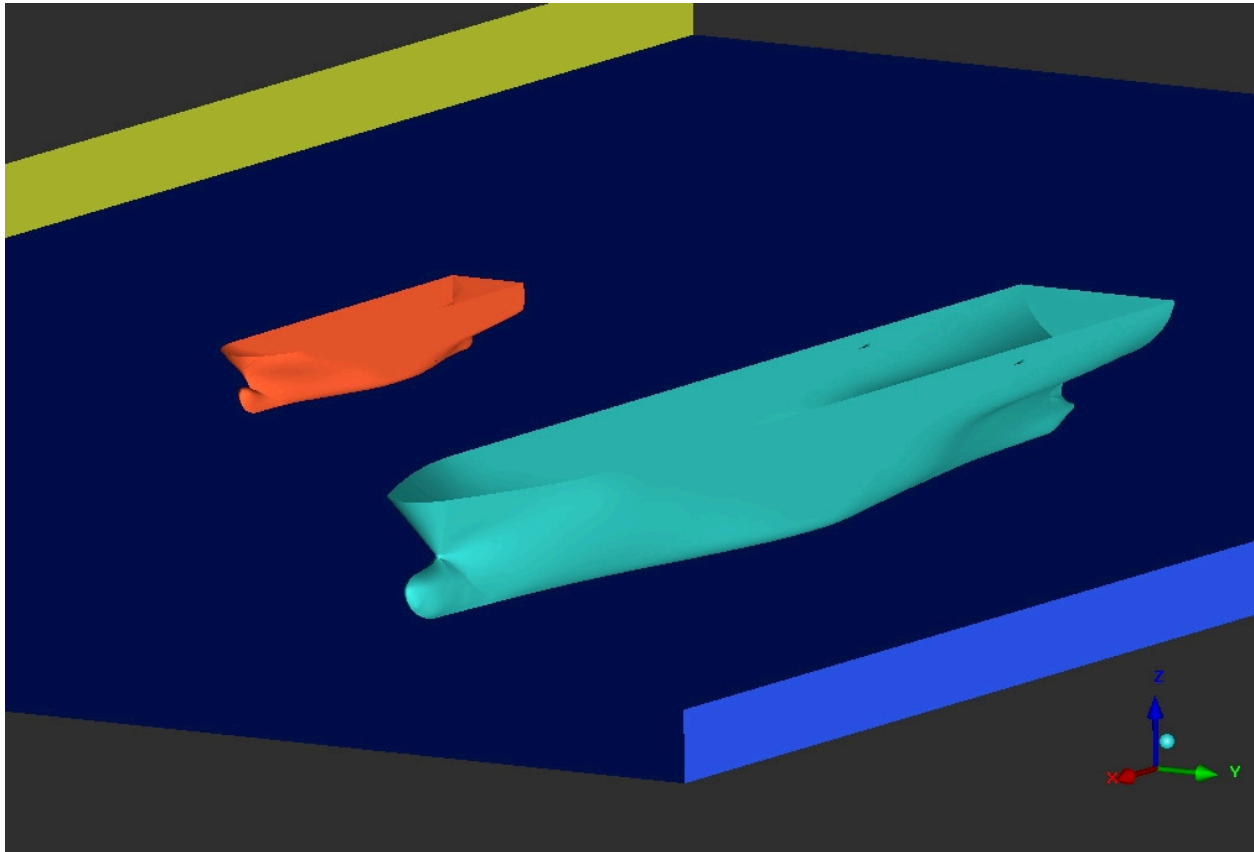


Abb. 4.2 Anordnung der Schiffe

Der Abstand des Schiffes A (orange) von der Kanalwand (gelb) beträgt 180 m. Das Schiff B (grün) ist in einer Entfernung von 150 m zur Berandung (blau) positioniert. Für alle durchgeführten Berechnungen gilt ein Modellmaßstab von 1:50. Auf eine Modellierung der Anhänge (Ruder, Propeller) wurde in diesem Projekt verzichtet, da von Ihnen kein Einfluss auf die Ausbildung des Strömungsfeldes zwischen den Schiffskörpern zu erwarten ist.

Die folgende Tabelle zeigt die Berechnungsparameter für den Überholvorgang:

	Länge [m]	Breite [m]	Tiefgang [m]	h/T	V [kn]	Fnh [-]
Schiff A	101	39,80	6,3	2,28	15	0,65
Schiff B	280	18,20	11,4	1,26	15	0,65

Schiffe, die im Wasser fahren, erzeugen Wellensysteme. An den Staupunkten am Vor- und Hinterschiff entstehen Wellenberge, im Bereich des parallelen Schiffes bildet sich auf Grund der Übergeschwindigkeiten eine Wasserspiegelabsenkung aus. Die Verformung der Wasseroberfläche wird hervorgerufen durch die Veränderung der Druckverteilung am Schiffskörper. Diese Druckänderung ist auch noch in einigem Abstand vom Objekt zu beobachten und hat einen nicht unwesentlichen Einfluss auf andere Schiffe im Nahbereich, insbesondere unter Flachwasserbedingungen.

Für den Überholvorgang Seeschiff-Seeschiff wurden Berechnungen ohne Verformung der Wasseroberfläche und mit vorgegebenem Wellenbild durchgeführt. Bei beiden Untersuchungen wurde die dynamische Schwimmlagenveränderung der Schiffskörper berücksichtigt. Für die CFD-Berechnungen ohne freie Wasseroberfläche wurde die Glattwasseroberfläche um den Wert der Absenkung des überholenden Schiffes (Schiff B) verschoben. In beiden Fällen ist das Schiff „fest eingespannt“ und kann keine Relativbewegungen durch die hervorgerufenen Kräfte und Momente erfahren.

Die Vorgabewerte für Wellenbild, Absenkung und Vertrimmung wurden durch die Flachwasserapproximation BESHiWa berechnet (siehe Abschnitt BESHiWa). Die berechneten Werte für Trimm und Absenkung der Großausführung sind in der nachstehenden Tabelle für die untersuchten Längspositionen zusammengefasst:

Schiffsposition	Schiff A		Schiff B	
	Absenkung [m]	Trimm [mrad]	Absenkung [m]	Trimm [mrad]
-0,2 L	0,70	-7,5	1,26	2,6
0,0 L	1,00	-6,0	1,26	2,8
0,3 L	1,37	7,3	1,31	2,8
0,6 L	1,08	10,9	1,33	2,4
0,8 L	0,80	6,1	1,35	2,3

Negative Werte für den Trimm bedeuten eine kopflastige Schwimmlagenveränderung des Schiffes.

4.3.1.2 Überholvorgang Fahrgastschiff-Motorgüterschiff

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Reihe von experimentellen Untersuchungen mit typischen Binnenschiffskonfigurationen in begrenztem Fahrwasser durchgeführt (siehe Abschnitt Experimente). Aus dem Versuchsprogramm wurden Experimente

ausgewählt, die den Überholvorgang eines Fahrgastschiffes mit einem Motorgüterschiff simulieren. Durch diese CFD-Untersuchungen sollten die ausgewählten Modellversuche unter stationären Bedingungen nachgebildet und durch einen Vergleich mit den gemessenen Kräften und Momenten die Anwendbarkeit dieser Berechnungsmethode überprüft werden.

Die numerischen und experimentellen Modellversuche wurden mit einem Maßstab von 1:16 durchgeführt. Das Fahrgastschiff (M1768) soll das Motorgüterschiff (M1708) in einem Abstand von 30 m (Mitte Schiff – Mitte Schiff) überholen. Dazu wurden Berechnungsfälle mit drei Längspositionen des Modells M1768 aufgesetzt. In Position 1 befindet sich das Fahrgastschiff mit halber Schiffslänge am Bug des Motorgüterschiffes. In Position 2 sind beide Schiffe nebeneinander angeordnet, das heißt der Hauptspant des Fahrgastschiffes ist in der gleichen Längsposition wie der Hauptspant des Motorgüterschiffes. Im dritten Berechnungsfall ist die halbe Schiffslänge des Fahrgastschiffes (Hauptspant) am Heck des Motorgüterschiffes positioniert (Abb. 4.3).

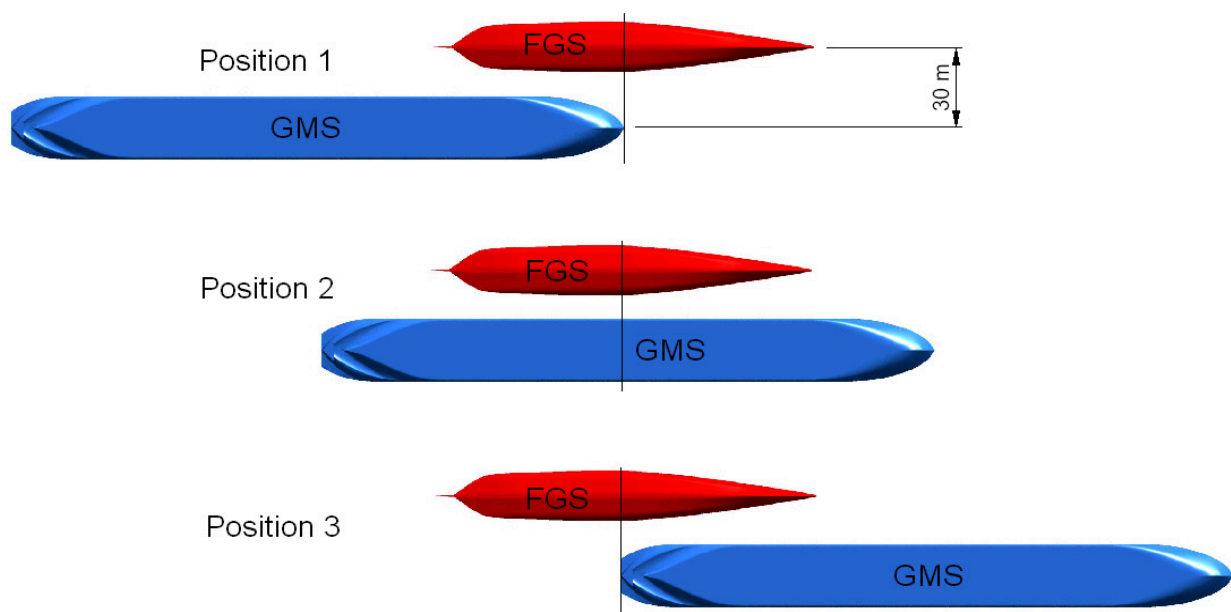


Abb. 4.3 Relativpositionen der Schiffe – Berechnungsfall 2

Im Modellversuch überholte das Fahrgastschiff das Motorgüterschiff mit einer Schiffsgeschwindigkeit von 1,25 m/s (Großausführung GA 18 km/h). Die Differenzgeschwindigkeit zwischen beiden Fahrzeugen betrug 0,208 m/s (GA 3 km/h). Bei stationären CFD-Untersuchungen ist eine Relativgeschwindigkeit zwischen den Schiffen mit dem hier angewandten Verfahren nicht durchführbar. Der echte Überholvorgang kann nur durch instationäre Berechnungen mit bewegten Gittern realisiert werden. Wie im Berechnungsfall 1 (Überholen Seeschiff-Seeschiff) wurden beide Schiffe mit gleicher konstanter Geschwindigkeit des Wassers angeströmt.

Für die Gewässerbreite wurde, entsprechend dem Modellversuch, die Ausdehnung des Flachwassertanks (9,8 m) des DST gewählt. Die Wassertiefe betrug 0,25 m (GA 4 m). In der folgenden Tabelle sind die Großausführungsparameter für die numerischen Untersuchungen aufgelistet:

	Länge [m]	Breite [m]	Tiefgang [m]	h/T	V [km/h]
FGS	60	9,50	1,5	2,66	18
GMS	110	11,4	2,8	1,43	18

Alle Berechnungen wurden jeweils ohne die Berücksichtigung der Verformung der freien Wasseroberfläche durchgeführt. Die dynamische Trimmlagenveränderung und die Absenkung der Schiffe wurden bei allen numerischen Untersuchungen durch Vorgabe aus dem Programmpaket BESHWa realisiert.

Die folgende Tabelle zeigt die berechneten Schwimmlagenveränderungen in den gewählten Längspositionen des Schiffes:

Schiffsposition	FGS (M1768)		GMS (M1708)	
	Absenkung [m]	Trimm [mrad]	Absenkung [m]	Trimm [mrad]
Bug	0,30	-18,0	0,60	-12,6
Hauptspant	0,50	-16,2	0,65	-4,0
Heck	0,34	-3,0	0,50	2,0

Die Beschreibung der verwendeten Modelle ist dem Teilbericht B zu entnehmen.

Da bei den experimentellen Modelluntersuchungen, die diesem Berechnungsfall als Vorlage dienten, nur die Änderungen der Kräfte und Momente ermittelt wurden, mussten der ungestörte Widerstand und die Seitenkraft in ungestörter Strömung für jedes Schiff berechnet werden. Mit diesen Ergebnissen sollten die numerisch ermittelten Kräfte auf den Kraftanteil, der durch den Überholvorgang des Schiffes entsteht, reduziert werden.

4.3.2 Aufbereitung der Geometrie

Für das eingesetzte Finite-Volumen-Verfahren muss ein endliches Berechnungsgebiet definiert werden, welches die vollständige Geometrie des Überholvorganges be-

schreibt. Eine notwendige Voraussetzung ist, dass die Geometrie der eingesetzten Schiffe und die Berandungen des Lösungsgebietes eindeutig durch Oberflächen beschrieben werden. Die geometrische Aufbereitung erfolgte mit dem NAPA-Schiffslinienprogramm und dem Programmpaket ICEM. Auf die detailgetreue Wiedergabe der Schiffsanhänge (Ruder, Düse, Propeller) wurde bei allen Berechnungsfällen verzichtet, da sie keinen wesentlichen Einfluss auf die Beschleunigung der Strömung und die Druckänderung zwischen den Schiffskörpern hat.

Um eine Beeinflussung der Strömungsverhältnisse im Passierbereich der Schiffe auszuschließen, dehnt sich das Lösungsgebiet eine halbe bis ganze Schiffslänge in Fahrtrichtung vor den Schiffen und 1,5 bis 2 Schiffslängen hinter dem Schiffspaar aus. Die seitliche Ausdehnung des Lösungsgebietes ist durch Vorgaben aus dem Modellversuch festgelegt und entspricht der Tankbreite des Versuchskanals. Das für die Berechnung verwendete kartesische Koordinatensystem ist in Abb. 4.4 dargestellt.

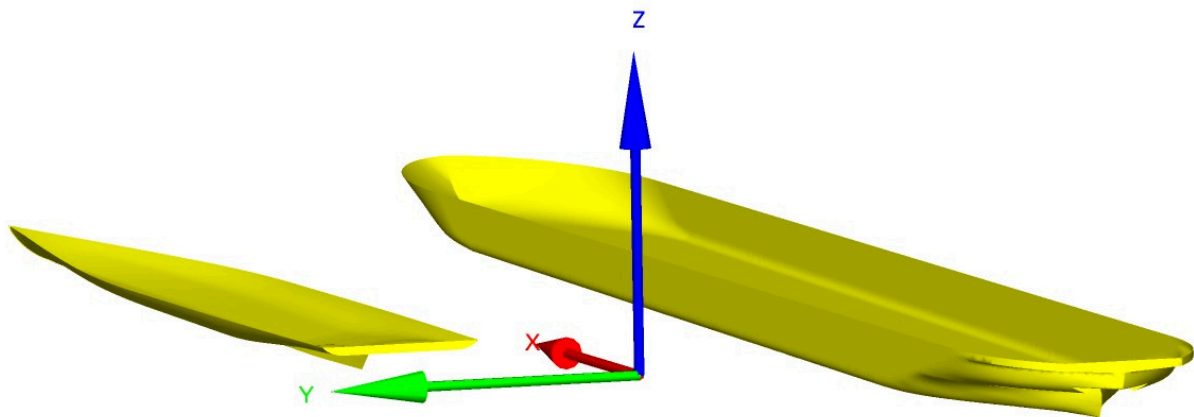


Abb. 4.4 Koordinatensystem

Der Ursprung des Koordinatensystems war für beide Berechnungsgruppen am Austrittsrand des Lösungsgebietes angeordnet.

Die Beschreibung der Wasseroberfläche erfolgte nach 2 unterschiedlichen Methoden. Für die Berechnungsfälle ohne verformten Gewässerspiegel wurde eine glatte reibungsfreie Ebene in Höhe der Wassertiefe definiert, die um den Wert der Absenkung des jeweils größeren Schiffes reduziert wurde. Für diese Berechnungen wurde das Schiff mit dem größerem h/T -Verhältnis in Z -Richtung, entsprechend der Schwimmlagenveränderung des großen Schiffes verschoben. Dadurch konnten die Versuchsbedingungen bezüglich des Tiefgangs für beide Schiffe realisiert werden. Das dadurch veränderte h/T -Verhältnis des kleineren Schiffes hat geringere Auswirkung auf die Berechnungsergebnisse als eine Veränderung des Tiefgangs, der sich direkt auf die Kräfte am Schiffskörper auswirkt.

Die durch die Flachwasserapproximation erhaltene Oberflächenverformung des Gewässers infolge der Fahrt beider Schiffe, wurde im STL-Format bereitgestellt, geo-

metrisch aufbereitet und in die ICEM-Geometriedaten integriert. In Abb. 4.5 ist die Kopplung einer berechneten Oberflächenverformung (grün) dargestellt. Die Berandungen des Lösungsgebietes sind an der roten Einfärbung zu erkennen. Da bei den BESHwa-Berechnungen eine echte Vorbeifahrt simuliert wird, ist die Wasseroberfläche weiter ausgedehnt als für die RANSE-Berechnungen notwendig. Für die Gittergenerierung wurde nur der Teil der Oberfläche berücksichtigt, der innerhalb der roten Berandungen des Lösungsgebietes lag.

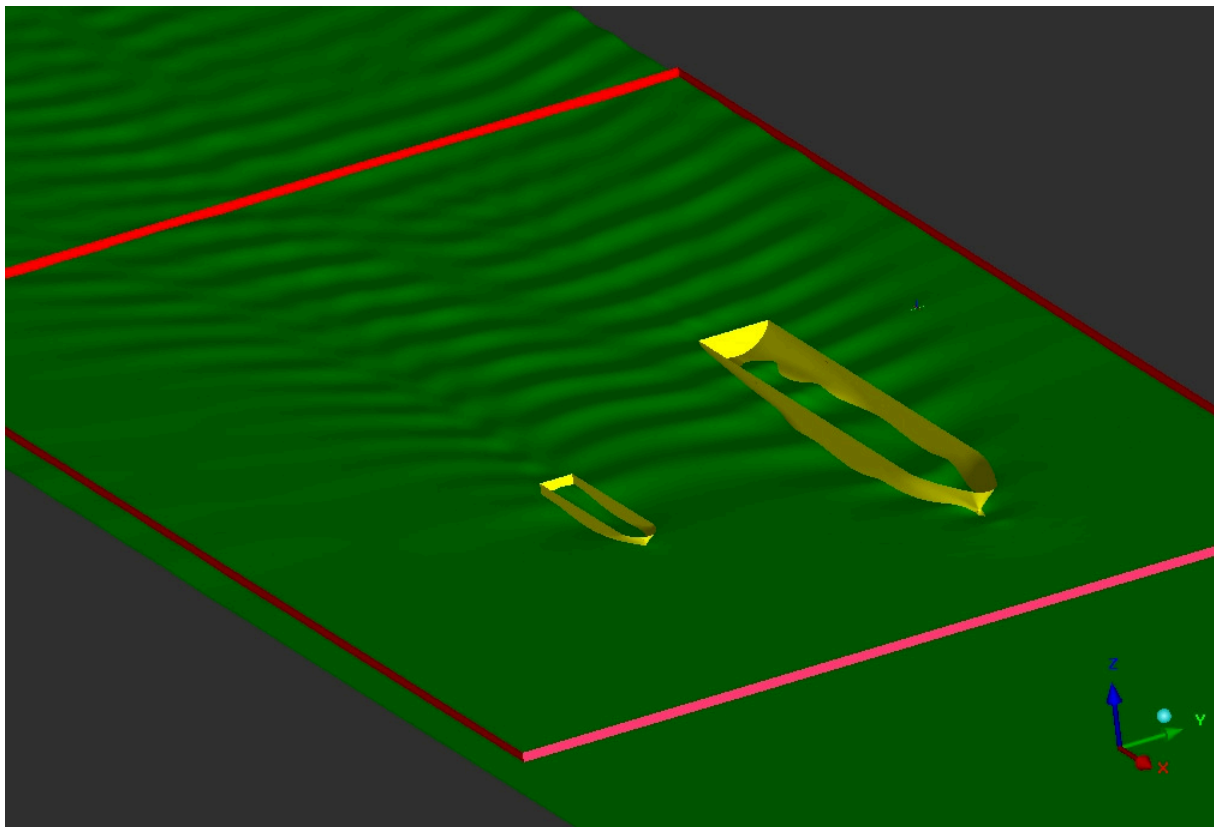


Abb. 4.5 Kopplung BESHwa-Wasseroberfläche mit ICEM-Lösungsgebiet

Die Schiffsmodelle (gelb) wurden bei diesen Berechnungen entsprechend ihrer dynamischen Schwimmlagenänderung geometrisch in negativer Z-Richtung verschoben und um den Schwerpunkt des Schiffes in Abhängigkeit vom Trimmwinkel um die Y-Achse gedreht.

4.3.3 Gittergenerierung und Randbedingungen

Das durch die Geometrie beschriebene Rechengebiet muss für die RANSE-Verfahren in endlich viele Volumenelemente unterteilt werden. Für jeden dieser diskreten Punkte innerhalb der Volumina errechnet der RANSE-Löser den Druck und die Geschwindigkeitskomponenten. Die Qualität des erzeugten Gitters ist ein wichtiges Kriterium für Stabilität und das Konvergenzverhalten der Rechnung, sowie für die Genauigkeit der Ergebnisse.

In Gebieten mit großen Gradienten der Variablen (Druck und Geschwindigkeit) muss der Berechnungsraum hinreichend fein aufgelöst werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Anzahl der Knoten so gewählt wird, dass die Geometrie eindeutig beschrieben wird und die Rechnerkapazität hinsichtlich Speicherbedarf und Rechenzeit nicht überstiegen wird.

Für die Vernetzung des Lösungsgebietes gibt es verschiedene Methoden. Die Elemente können im Raum unstrukturiert bzw. strukturiert angeordnet werden. Beide Methoden haben ihre Vor- und Nachteile. Bei komplexeren Geometrien wie Schiffskörpern werden auf Grund des geringeren Zeitaufwandes bei der Erstellung des Gitters häufig unstrukturierte Tetraedergitter verwendet. Der Nachteil dieser Gitterart ist gerade bei Flachwasserberechnungen die große Anzahl von Gitterpunkten in physikalisch nicht interessanten Bereichen des Raumes vor bzw. hinter dem Schiff.

In diesem Vorhaben wurden für die Berechnungen unstrukturierte Gitter und eine Kombination von Hexaederelementen (strukturiert) und Tetraederelementen gewählt. Das gesamte Lösungsgebiet wurde in 2 Hauptbereiche eingeteilt. Im Bereich 1 wurden die beiden Schiffe mit randangepassten Tetraedern und in den äußeren Bereichen mit qualitativ hochwertigen Hexaedern (keine Verzerrungswinkel) vernetzt..

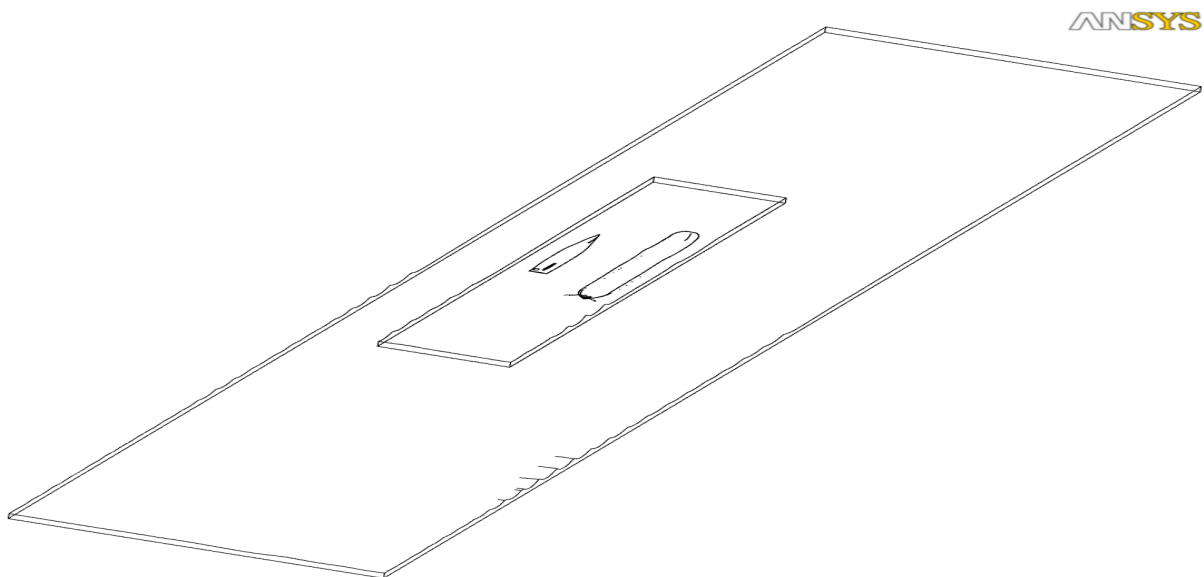


Abb. 4.6 Struktur des Berechnungsgebietes

Die Kombination dieser beiden Elementtypen wird auch als Hybridgitter bezeichnet. Die Kopplung beider Teilgitter erfolgt über General Grid Interfaces (GGI). Wie in Abb. 4.6 zu sehen ist, erfolgt die Verbindung beider Gitterarten nicht über eine 1:1 Verbindung. Bei der Diskretisierung ist darauf zu achten, dass die Elementgröße an der Schnittstelle nicht deutlich voneinander abweicht.

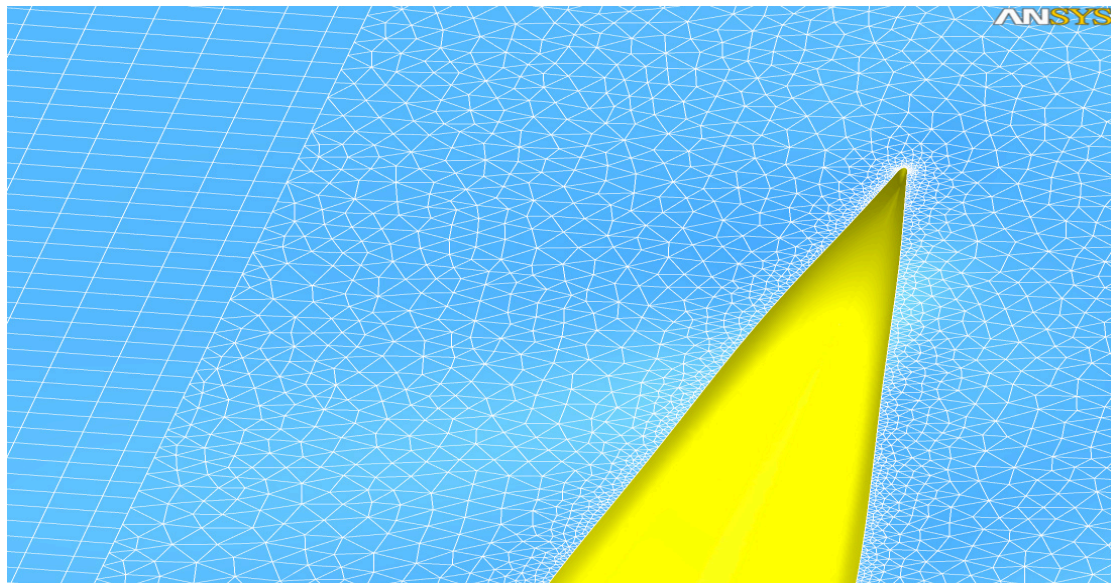


Abb. 4.7 Ausschnitt aus Hybridgitter

An allen reibungsbehafteten Wänden (Schiffsaußenhaut) muss in Abhängigkeit vom verwendeten Turbulenzmodell die Grenzschicht fein genug aufgelöst werden. Für das K-Omega-SST-Modell sollte der y^+ -Wert kleiner zwei sein und bei den Rechenfällen mit dem K-Epsilon Modell dürfen die y^+ -Werte 150 nicht übersteigen. Zur Realisierung der genannten Werte wurde die Grenzschicht der Berandungen teilweise mit Prismenschichten gebildet, da Tetraederelemente im wandnahen Bereich nicht geeignet erscheinen.

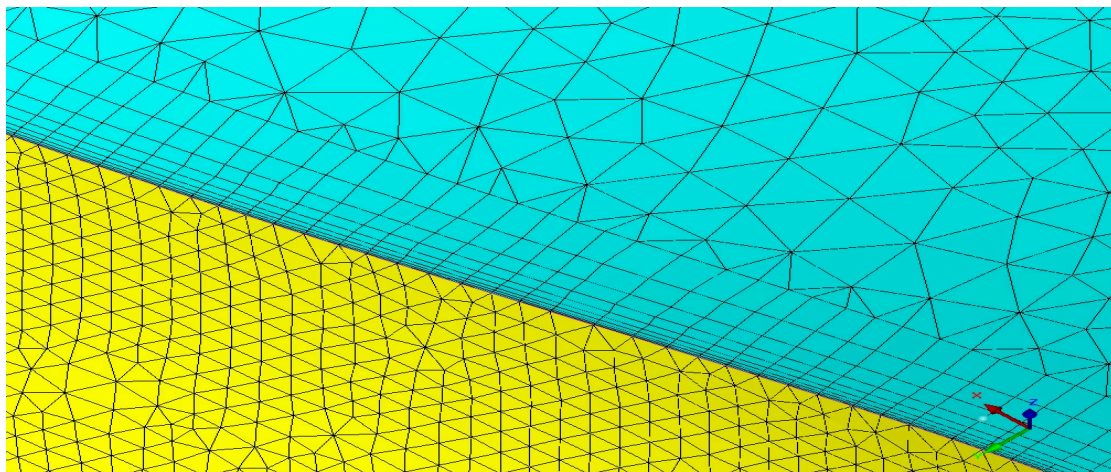


Abb. 4.8 Prismenschichten am Schiffskörper

Abb. 4.8 zeigt die Anordnung von Prismenschichten am Schiffskörper (gelb) im Bereich der Wasseroberfläche (blau).

Durch das Rechengitter wird nur ein endlicher Bereich des gesamten Strömungsgebietes abgebildet. Die Grenzen des Berechnungsraumes ergeben sich teilweise aus den natürlichen Begrenzungen wie Kanalwand, Boden, Schiffskörper oder Wasseroberfläche. Einstrom- und Ausstromrand zum Lösungsgebiet wurden vorgegeben.

Die Kanalwand und der Gewässerboden wurden als reibungsbehaftete Wände (WALL NO SLIP) definiert. Da im Gegensatz zum Modellversuch die Schiffe sich nicht bewegen sondern angeströmt werden, wurde an diesen Wänden eine Translationsgeschwindigkeit entgegengesetzt der Strömungsrichtung vorgegeben, um die Relativbewegung zum Schiffskörper zu realisieren. Alle Schiffe wurden als reibungsbehaftete Wände, an denen die Haftbedingung gilt, definiert. Bei den Untersuchungen mit glatter Wasseroberfläche wird die Bildung von Oberflächenwellen vernachlässigt. Für beide Berechnungen (mit/ohne Vorgabe der Wasseroberfläche) wird der Wasserspiegel als reibungsfreie Wand definiert. Es werden nur Geschwindigkeiten parallel zur Wand und keine Gradienten senkrecht zur Wasseroberfläche zugelassen. Am Einstromrand zum Lösungsgebiet wird eine homogene Geschwindigkeit vorgegeben, die der Schiffsgeschwindigkeit entspricht. Der Ausstromrand wird als OPENING-Randbedingung definiert, die keine Druckänderung zulässt. Eine einfache OUTLET-Bedingung war für die Berechnungsfälle aus Gründen der Stabilität der Berechnung nicht ausreichend.

4.4 Ergebnisse

Ergebnisse der numerischen Untersuchungen sind Druck- und Geschwindigkeitsverteilung für jeden diskreten Punkt des Berechnungsraumes. Auf den Berandungen wie Schiffskörper, Boden und Seitenwand können durch Integration des Drucks die Kräfte und die Momente für alle Freiheitsgrade ermittelt werden. Im Folgenden werden nur ausgewählte Ergebnisse vorgestellt, da es nicht möglich ist, alle für die Lösungsgebiete erhaltenen Strömungsinformationen zu dokumentieren.

Die folgenden Ergebnisse stellen einen Auszug aus den durchgeführten Berechnungen dar. Um konvergierende Lösungen zu erhalten, wurden unterschiedliche Gitterarten und Turbulenzmodelle getestet. Dargestellt werden die Ergebnisse, bei denen das Abbruchkriterium der Rechnung erreicht wurde und bei denen sich für die integralen Größen (Kraft und Moment) ein konstanter Wert eingestellt hat.

4.4.1 Berechnungsfall 1 – Überholvorgang Seeschiff - Seeschiff

In Abb. 4.9 bis Abb. 4.13 sind die Verformungen der Wasseroberflächen in Form von Isolinien dargestellt. In allen Abbildungen ist zu erkennen, dass die Kanalwand in Fahrtrichtung links neben dem Backbord-Schiff (Schiff B) einen Einfluss auf den Schiffskörper hat.

Bereits am Beginn des Überholvorganges (Position -02L) zeigt das Wellenbild am Schiff B schon eine deutliche Asymmetrie gegenüber einer ungestörten Anströmung. Zwei mögliche Ursachen für die Veränderungen des Wellenbildes am Backbordschiff sind die Nähe der Kanalwand und die durch das Steuerbordschiff erzeugten Wellen. Im Verlauf der Vorbeifahrt des großen Schiffes (Schiff B) am Schiff A ändert sich das Wellenbild jedoch so, dass die Vermutung nahe liegt, dass der Kanalwandeinfluss einen wesentlichen Anteil an der Asymmetrie des Wellenbildes hat.

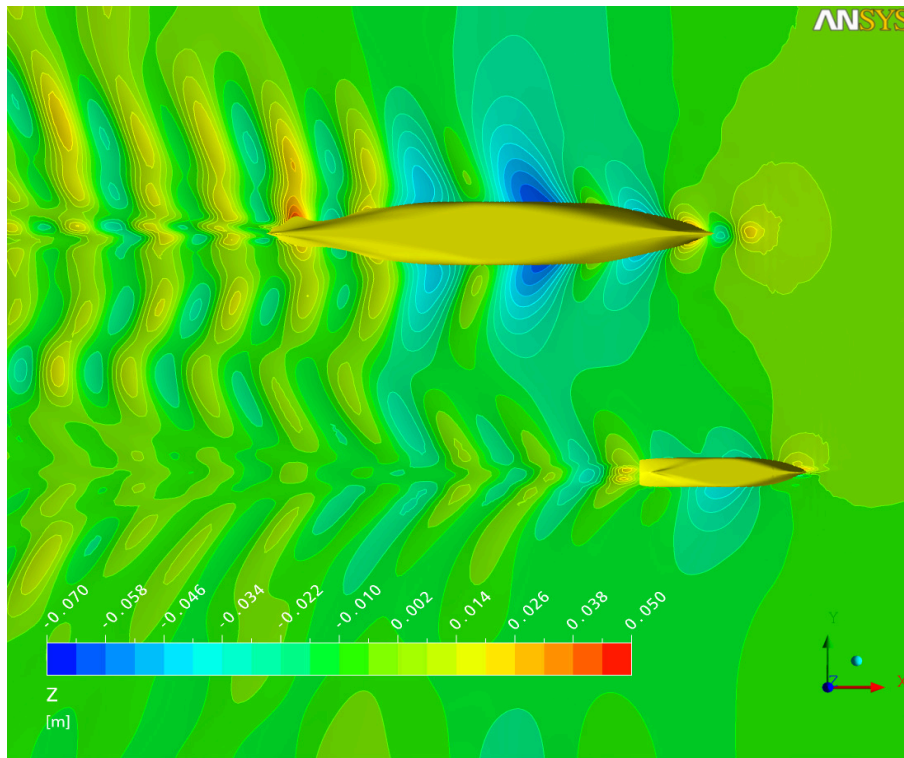


Abb. 4.9 Wasseroberflächenverformung aus BESHwa - Position -02L

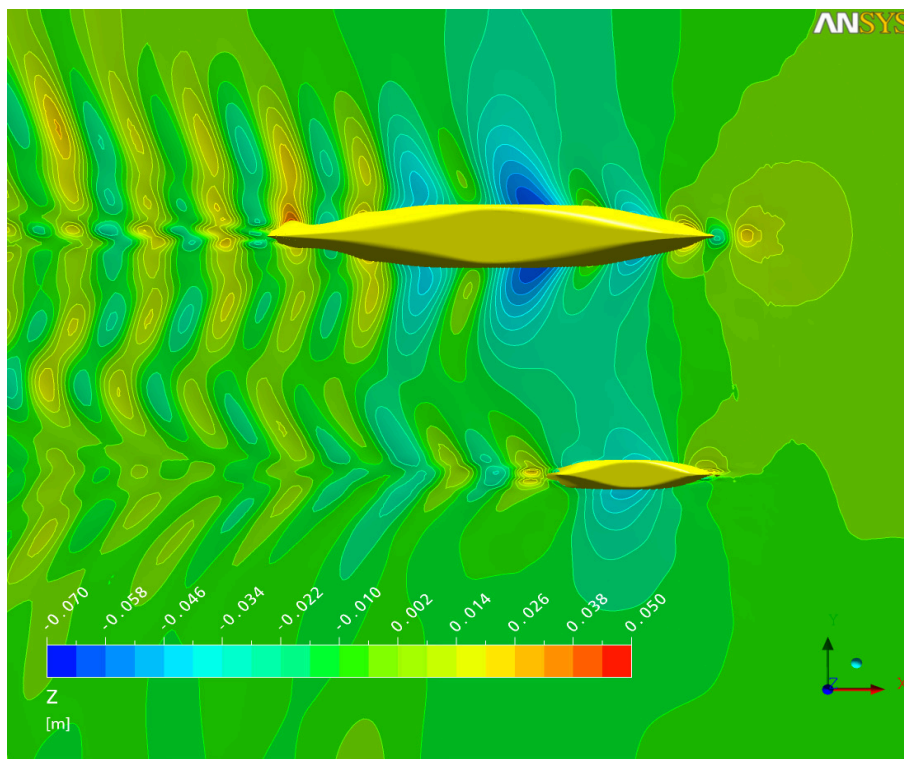


Abb. 4.10 Wasseroberflächenverformung aus BESHwa - Position 0L

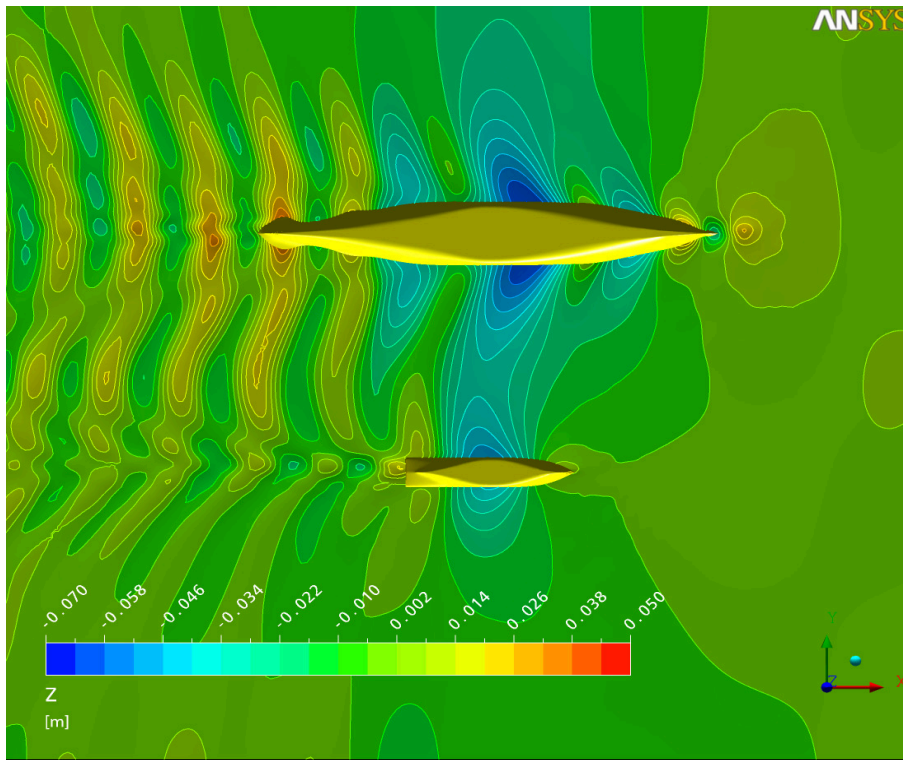


Abb. 4.11 Wasseroberflächenverformung aus BESHiWa Position - 03L

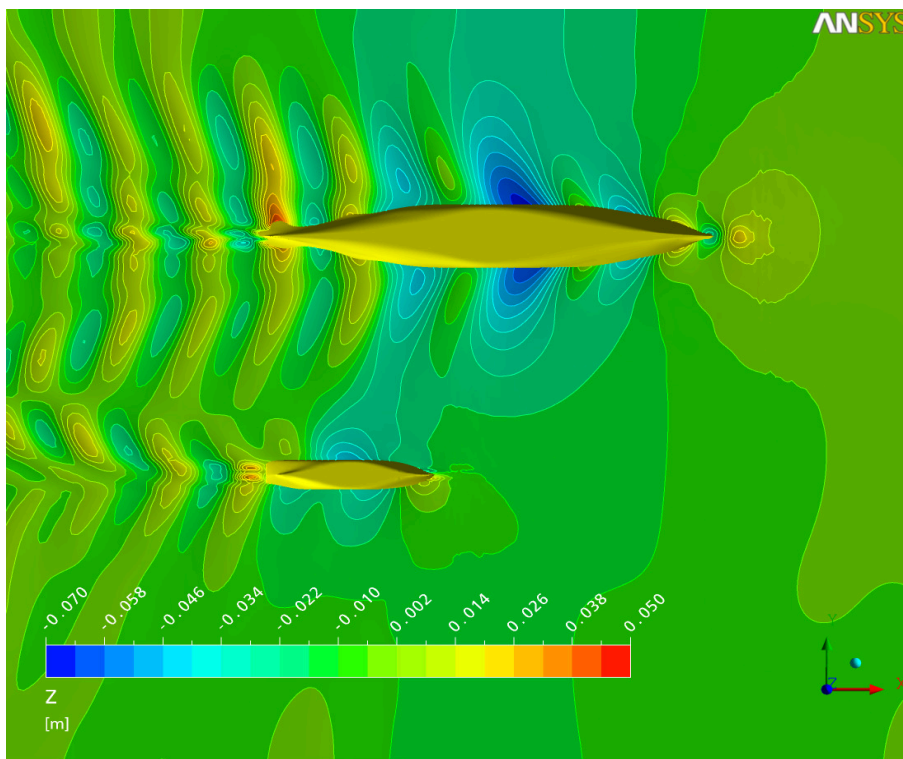


Abb. 4.12 Wasseroberflächenverformung aus BESHiWa Position - 06L

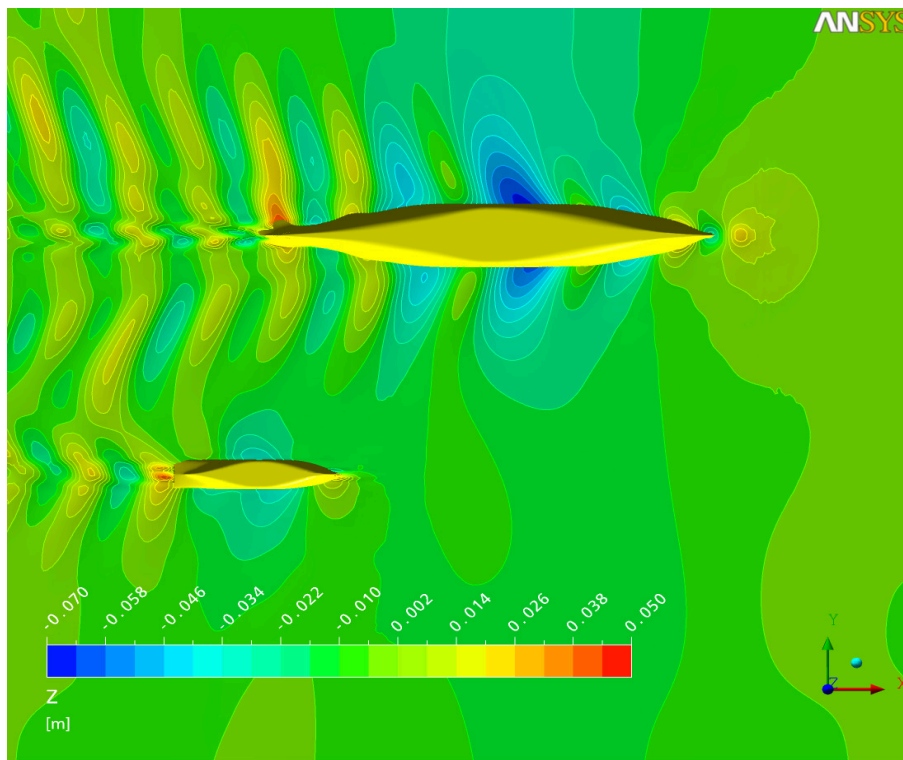


Abb. 4.13 Wasseroberflächenverformung aus BESHiWa Position - 08L

In der Position 03L (Abb. 4.11), in der beide Schiffe direkt nebeneinander fahren, verändert sich das Wellenbild dahingehend, dass die am Beginn des Überholvorganges vorhandene Asymmetrie der Oberflächenverformung am Backbordschiff nicht mehr zu beobachten ist. Es bildet sich ein starkes Wellental zwischen den Schiffskörpern aus.

Betrachtet man Abb. 4.13, ist zu erkennen, dass sich das Wellental am Ende des Überholvorganges wieder asymmetrisch ausbildet, obwohl das Schiff B nicht mehr unter dem Einfluss des Wellensystems des überholten Schiffes (Schiff A) ist.

Die Wirkung der Vorbeifahrt der Schiffe auf den Umgebungsdruck, insbesondere auf die Gewässersohle, ist für die Berechnungen mit vordefinierter Wasseroberfläche und ohne die Vorgabe des erzeugten Wellensystems in den folgenden Abbildungen (Abb. 4.14 bis Abb. 4.18) vergleichend dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Vorgabe des Wellenbildes einen erheblichen Einfluss auf die Ausbildung der Strömungsverhältnisse im Berechnungsgebiet hat. Insbesondere die Bodendruckverteilung unter dem Schiff B mit sehr geringem h/T -Wert ist stärker ausgeprägt als bei den Berechnungen mit glatter Wasseroberfläche. Die Staupunkte am Bug und Heck sind qualitativ und quantitativ vergleichbar. Ein Vergleich mit den Messergebnissen zeigte eine qualitativ gute Übereinstimmung mit den Berechnungsergebnissen bei vorgegebenem Wasserspiegel.

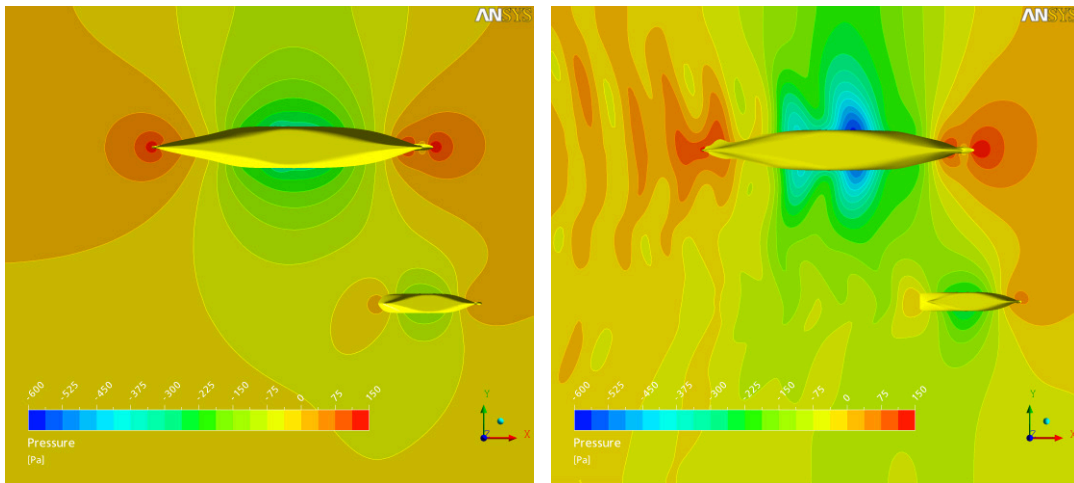


Abb. 4.14 Bodendruck in Position -02L mit (links) / ohne (rechts) Oberflächenverformung

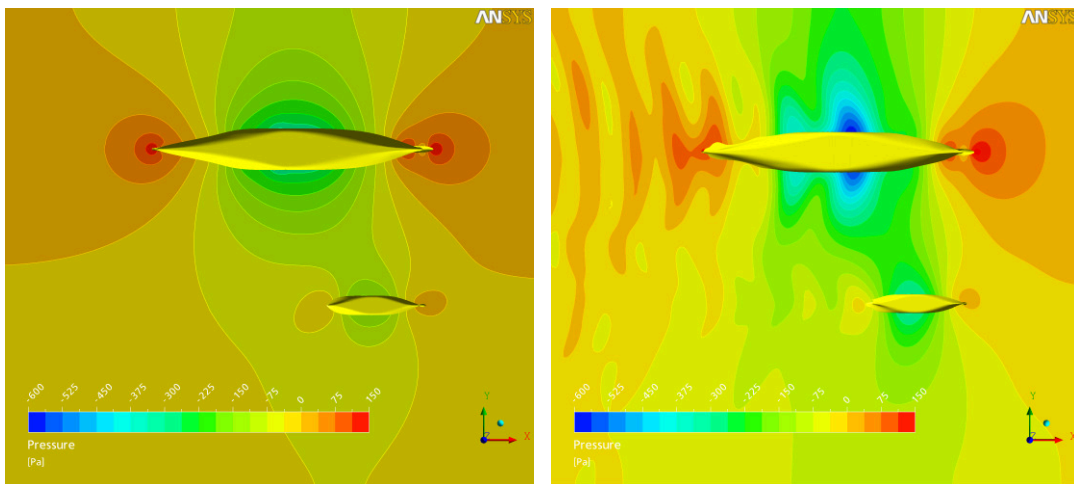


Abb. 4.15 Bodendruck in Position 0L mit (links) / ohne (rechts) Oberflächenverformung

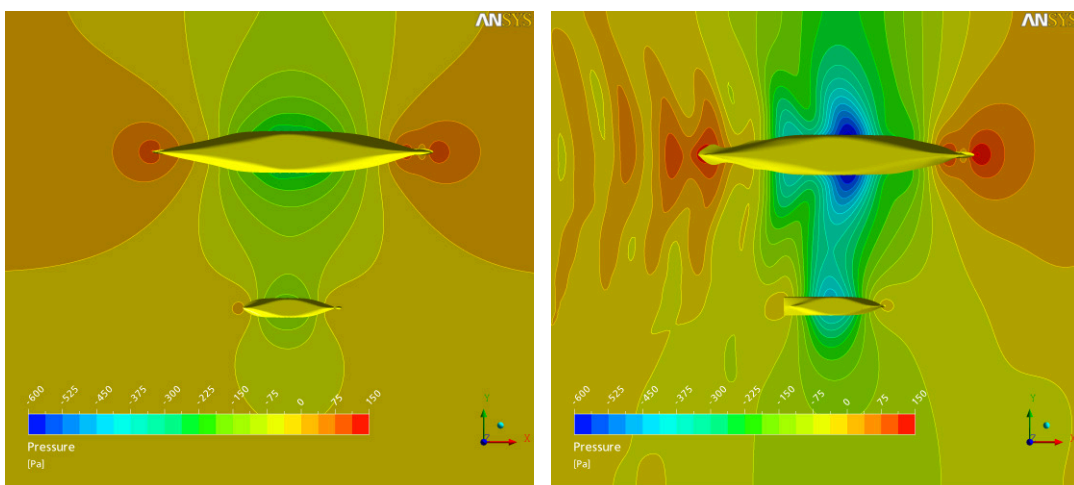


Abb. 4.16 Bodendruck in Position 03L mit (links) / ohne (rechts) Oberflächenverformung

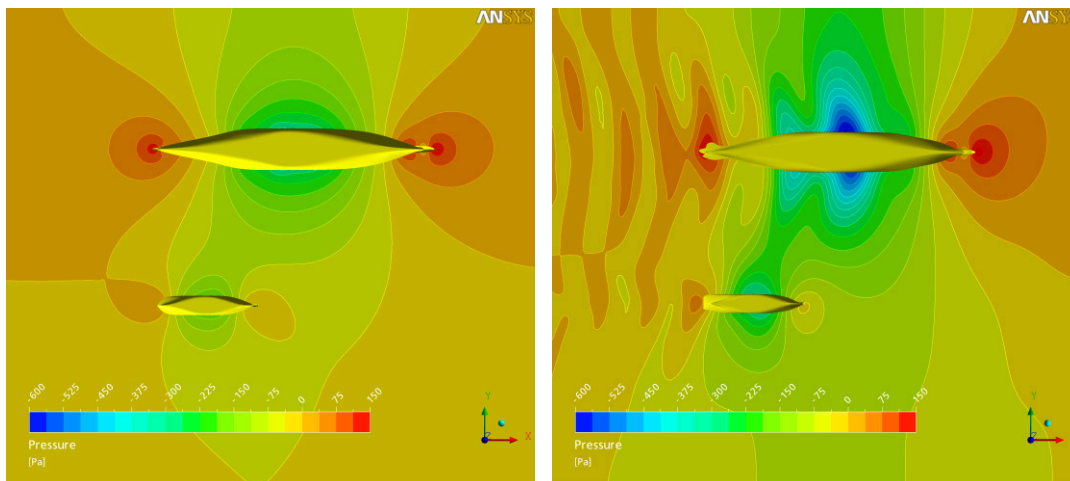


Abb. 4.17 Bodendruck in Position 06L mit (links) / ohne (rechts) Oberflächenverformung

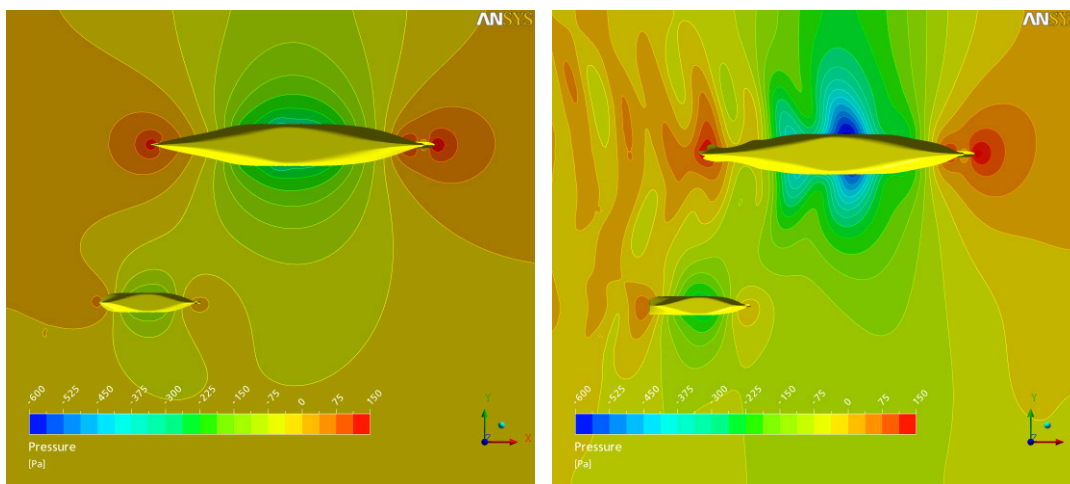


Abb. 4.18 Bodendruck in Position 08L mit (links) / ohne (rechts) Oberflächenverformung

Wie im Modellversuch, verstärkt sich das Unterdruckgebiet unter beiden Schiffskörpern deutlich in Position 03L (Schiffe nebeneinander). Bei den Berechnungen mit glatter Wasseroberfläche sind die Veränderungen des Unterdruckgebietes in dieser Relativposition der Schiffe (03L) geringer. Die durch die Schiffsenden hervorgerufenen Druckerhöhungen am Gewässerboden sind gegenüber den Messergebnissen deutlich zu hoch. Bei den Rechnungen mit freier Oberfläche ist der hohe Druck unter dem Hinterschiff auf zu hoch berechnete Wellenberge in diesem Bereich zurückzuführen.

Eine wesentliche Aufgabe dieser Berechnungen war die numerische Ermittlung der Kräfte und Momente die auf den Schiffskörper wirken. Bisherige Berechnungen haben gezeigt, dass bei starker Verformung der Wasseroberfläche, eine Nichtberücksichtigung zu großen Abweichungen bei den Berechnungsergebnissen führen kann, da die physikalischen Modellbedingungen nicht ausreichend abgebildet werden. Die Abb. 4.19 bis Abb. 4.21 zeigen eine Gegenüberstellung der integralen Größen aus Modellversuch und Rechnung.

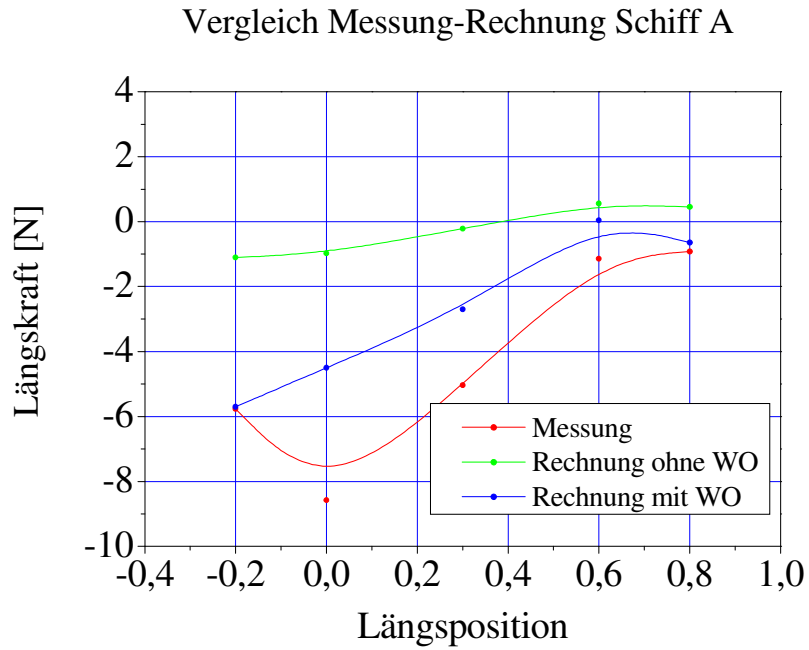


Abb. 4.19 Gegenüberstellung Experiment und Rechnung - Längskraft

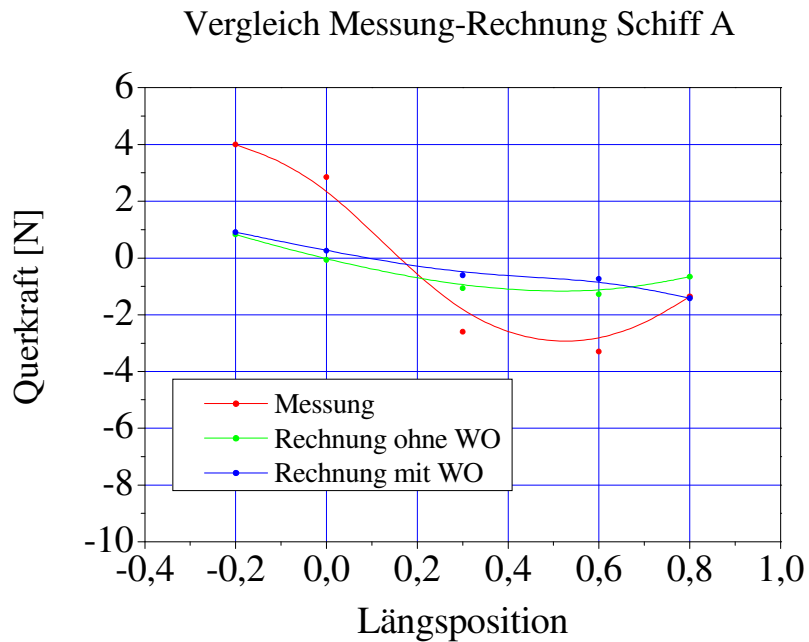


Abb. 4.20 Gegenüberstellung Experiment und Rechnung - Querkräft

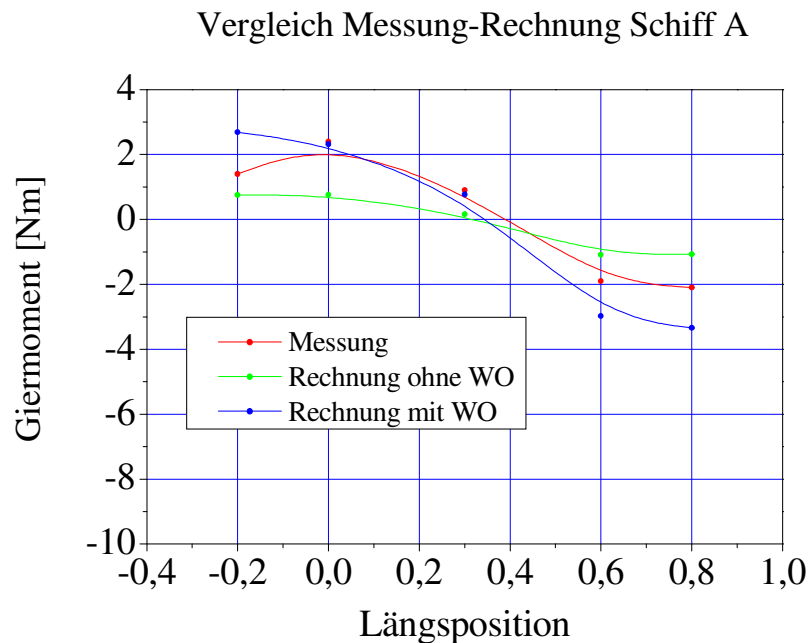


Abb. 4.21 Gegenüberstellung Experiment und Rechnung - Giermoment

Der Vergleich zeigt, dass durch die geometrische Vorgabe von Trimm, Absenkung und Wasseroberflächenverformung am Schiffskörper bessere Ergebnisse erzielt werden können als mit glatter Wasseroberfläche. Die Werte für die Giermomente lassen eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen erkennen. Eine Ursache für die vorhandene Abweichung der Kraftgrößen kann sein, dass auch die Vorgabe einer geometrischen Verformung der Wasseroberfläche die Strömungsverhältnisse bei der Vorbeifahrt eines Schiffes nicht vollständig beschreibt.

4.4.2 Berechnungsfall 2 – Überholvorgang Fahrgastschiff - Motorgüterschiff

Für die zweite Berechnungsgruppe, der Vorbeifahrt eines Fahrgastschiffes an einem typischen Motorgüterschiff, wurden ebenfalls die Feldgrößen für Druck und Geschwindigkeit und die integralen Größen „Kräfte längs“ und „Kräfte quer“ zur Strömungsrichtung und die am Schiffskörper wirkenden Momente um die Z-Achse ermittelt. Die Kräfte und Momente wurden mit den Ergebnissen aus dem instationären Modellversuch verglichen. Die Berechnungen wurden für drei Positionen mit und ohne Vorgabe der oberen Begrenzung des Lösungsgebietes durch die berechnete Verformung des Wasserspiegels aus der Flachwasserapproximation durchgeführt.

Die vorgegebene Oberflächenverformung des Wassers ist in Abb. 4.22 und Abb. 4.23 für die Position Fahrgastschiff (FGS) vor dem Motorgüterschiff (GMS) und für die Position FGS neben dem GMS dargestellt.

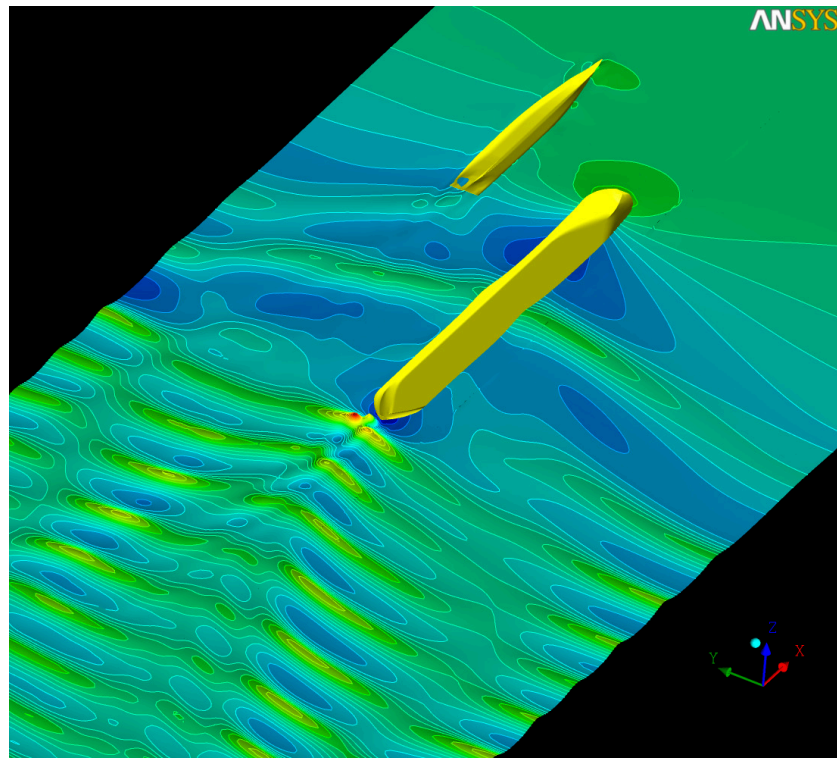


Abb. 4.22 Oberflächenverformung aus BESHwa – Position Mitte FGS am Bug GMS

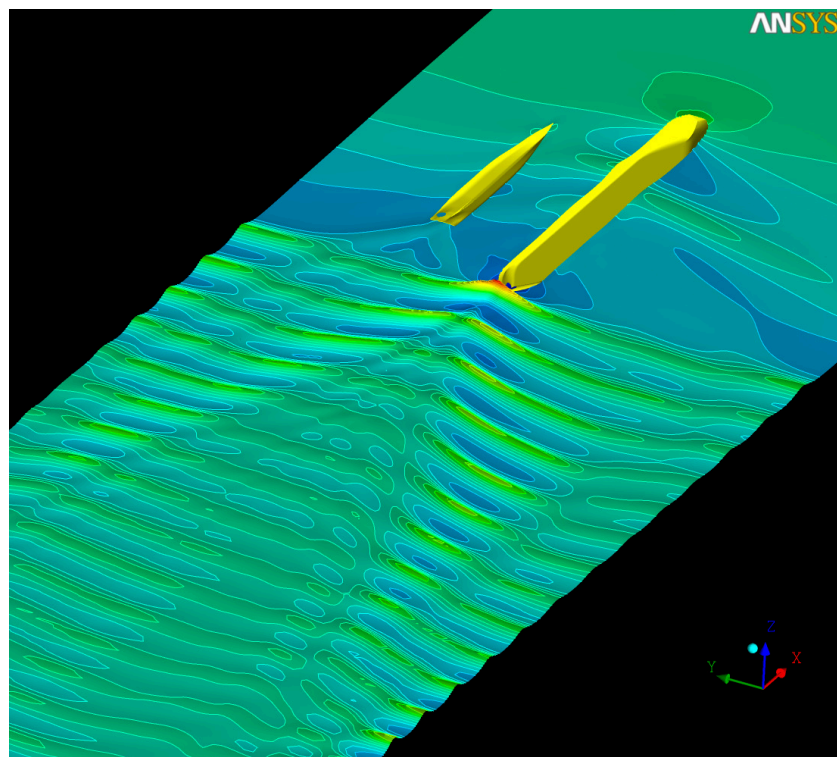


Abb. 4.23 Oberflächenverformung aus BESHwa – Position Mitte FGS an Mitte GMS

Für die dritte Position (Mitte FGS am Heck des GMS) konnte auf Grund der stark verformten Oberfläche keine ausreichende Gitterqualität erreicht werden. Ein Glätten

der Oberfläche verfälschte die Wasseroberfläche so stark, dass sie die Ergebnisse der Flachwasserapproximation nicht wiedergaben.

Von besonderem Interesse sind die zwischen den Schiffskörpern auftretenden Übergeschwindigkeiten bei der Vorbeifahrt des Fahrgastschiffes an dem Motorgüterschiff. In Abb. 4.24 und Abb. 4.25 werden die erzeugten Geschwindigkeitserhöhungen in einer z-Ebene bei einer Höhe von 0,1 m unterhalb des Wasserspiegels für die unterschiedlichen Berechnungsverfahren verglichen.

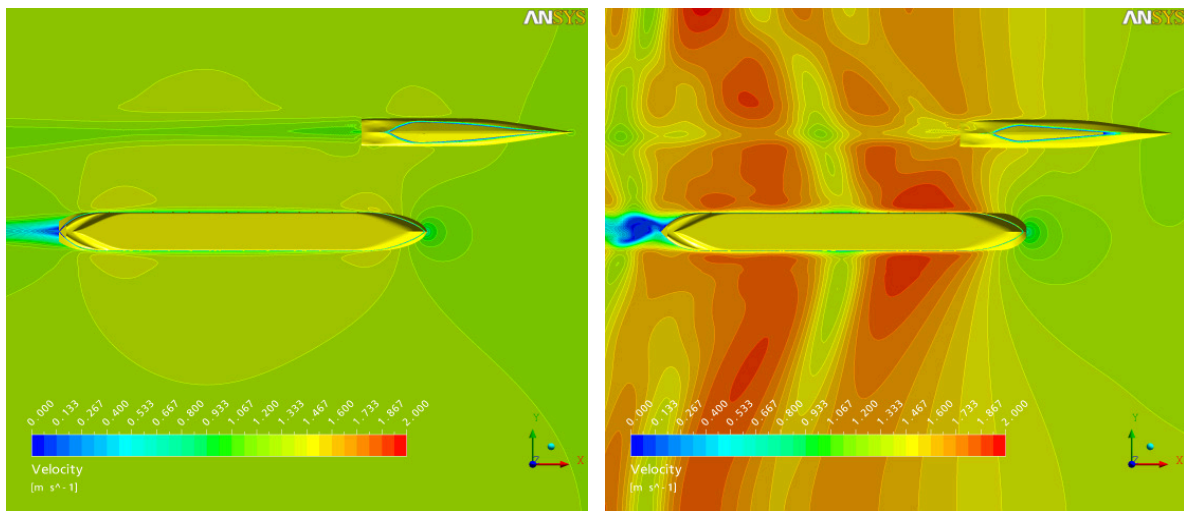


Abb. 4.24 Geschwindigkeit in Pos. 1 ohne (links) / mit (rechts) Oberflächenverformung

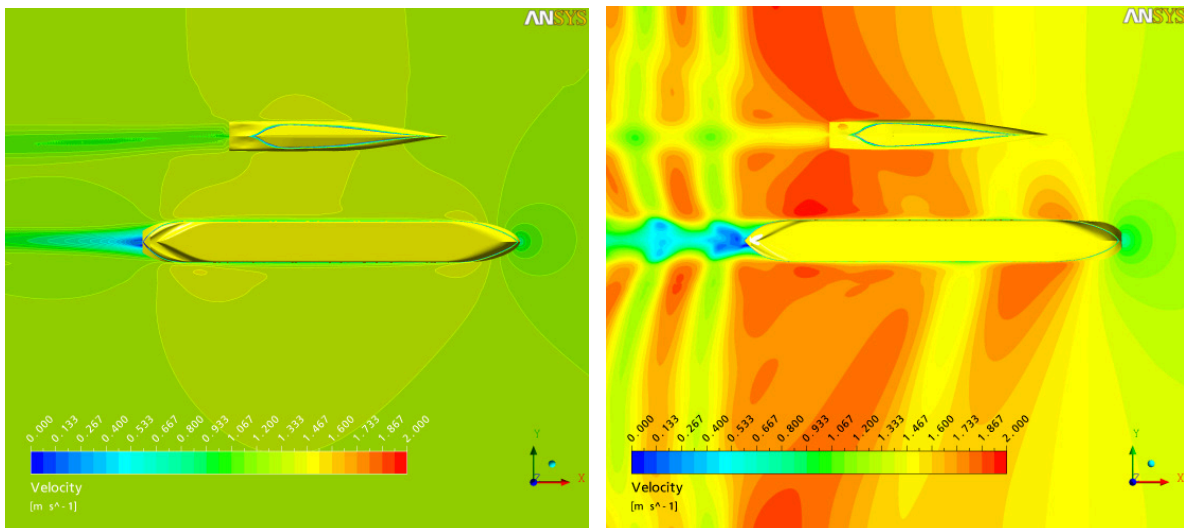


Abb. 4.25 Geschwindigkeit in Pos. 2 ohne (links) / mit (rechts) Oberflächenverformung

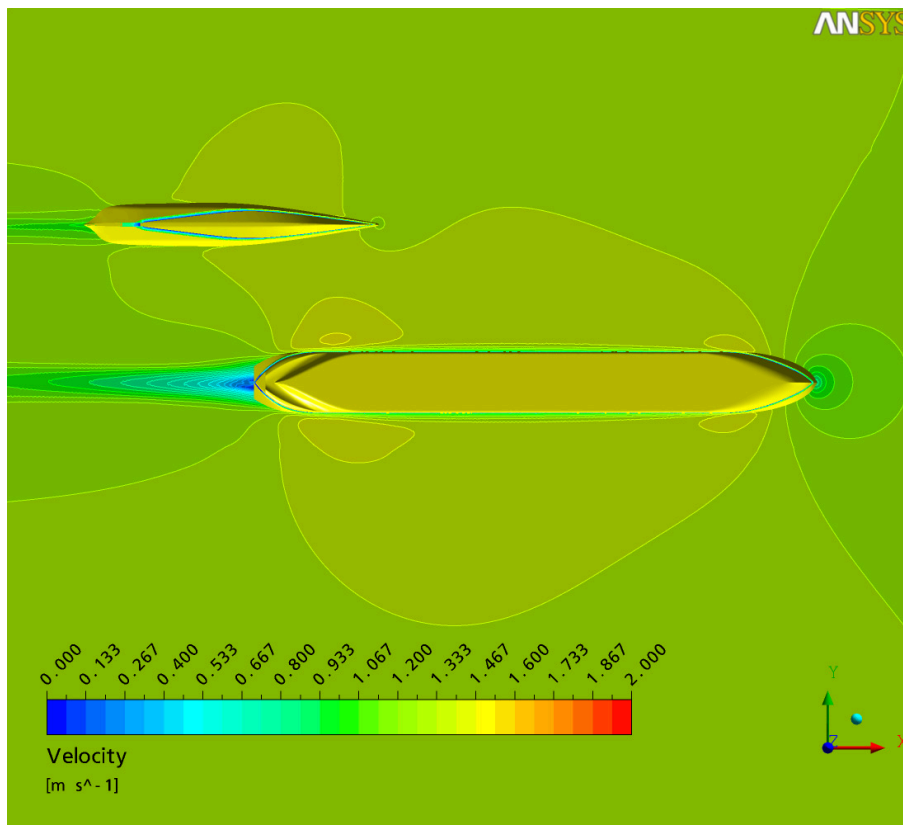


Abb. 4.26 Geschwindigkeit in Position 3 ohne Oberflächenverformung

Abb. 4.26 gibt die Geschwindigkeitsverteilung in einer z-Ebene für die Berechnungen ohne Berücksichtigung des verformten Wasserspiegels wieder. Für alle gezeigten Isolinenbilder gilt die gleiche Skalierung der Geschwindigkeit. In den Abbildungen ist zu erkennen, dass die Vorgabe der Berechnungsergebnisse aus der Flachwasserapproximation einen wesentlichen Einfluss auf die Ausprägung der Geschwindigkeitsverteilung im Berechnungsraum hat.

Für die Berechnung der Kraftkomponenten am Schiffskörper ist die Druckverteilung an der Außenhaut des Schiffes maßgeblich. Abb. 4.27 bis Abb. 4.30 sollen beispielhaft die Ausbildung des Druckfeldes am Motorgüterschiff für die unterschiedlichen Randbedingungen der Wasseroberfläche zeigen. Die untere Darstellung zeigt die Steuerbordseite des GMS (dem FGS zugewandte Seite) und das obere Bild die Backbordseite des Binnenschiffes. In allen Abbildungen ist deutlich eine asymmetrische Druckverteilung zu erkennen. Jedoch auch hier muss festgestellt werden, dass die Ergebnisse der Berechnungen ohne Wasseroberflächenverformung geringere Druckveränderungen aufweisen.

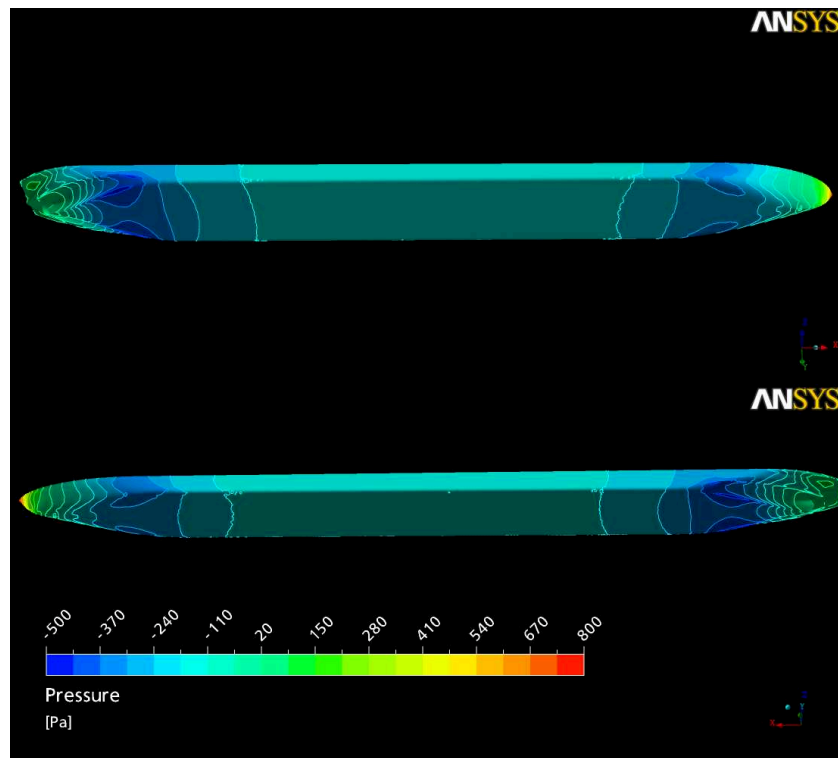


Abb. 4.27 Druckverteilung am GMS – Position Mitte FGS am Bug des GMS (ohne WO)

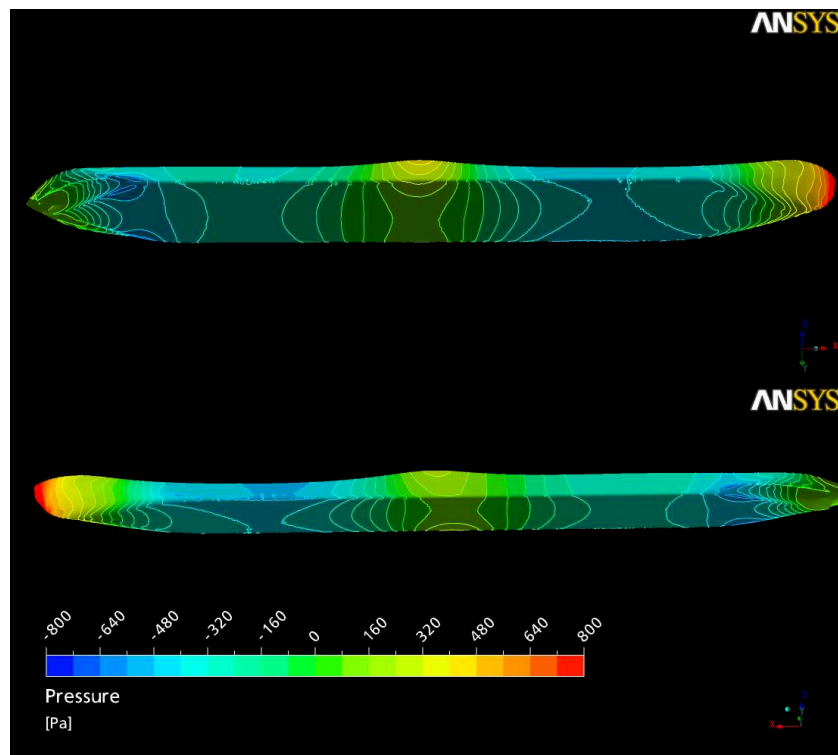


Abb. 4.28 Druckverteilung am GMS – Position Mitte FGS an Mitte des GMS (mit WO)

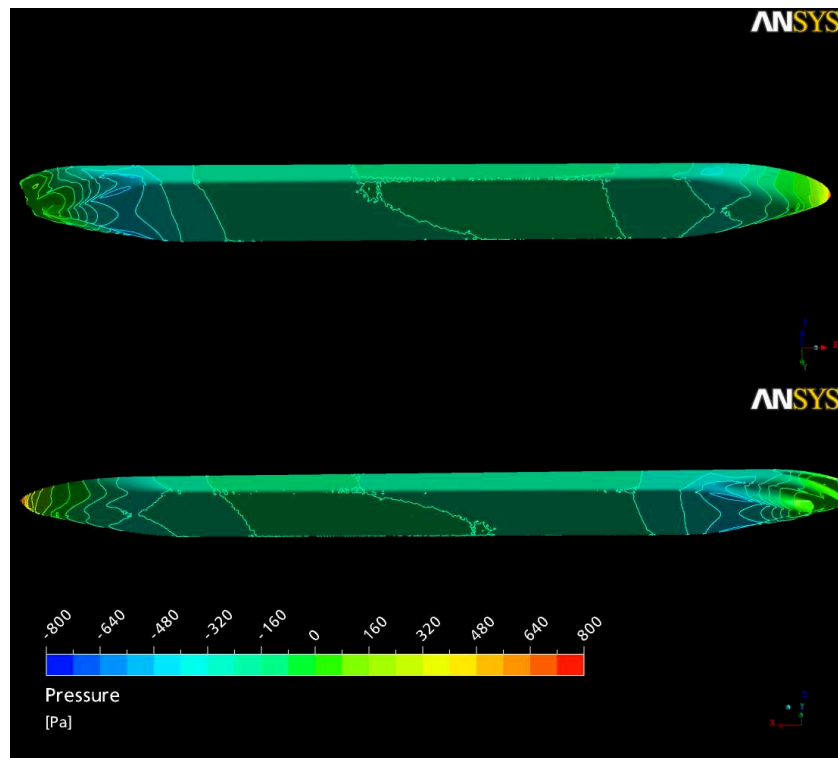


Abb. 4.29 Druckverteilung am GMS – Position Mitte FGS an Mitte des GMS (ohne WO)

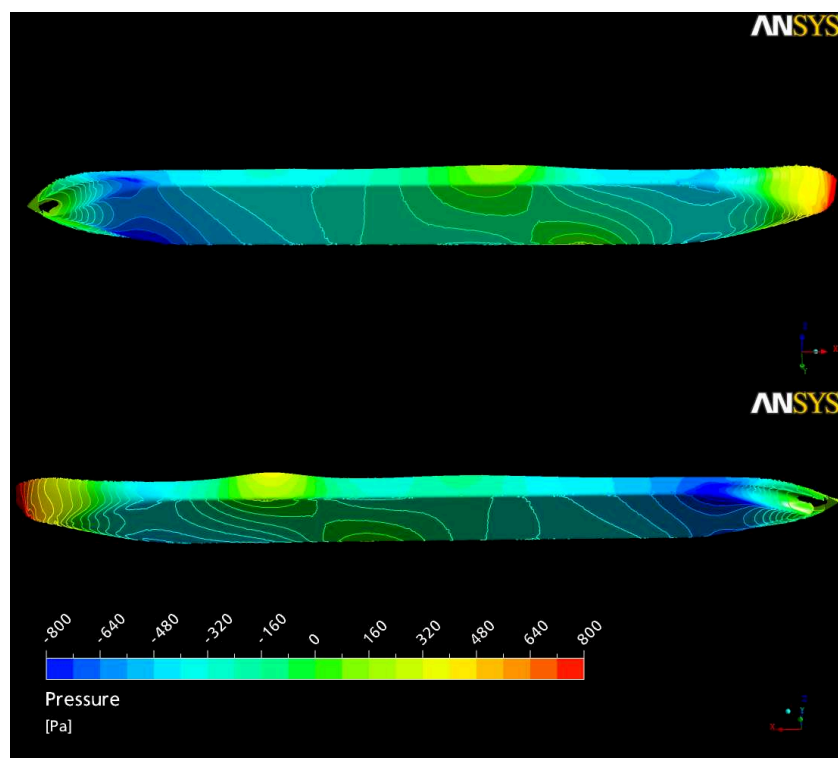


Abb. 4.30 Druckverteilung am GMS – Position Mitte FGS am Bug des GMS (mit WO)

Die Druckveränderungen am Gewässerboden für die Berechnungen mit vorgegebener Wasseroberfläche sind in Abb. 4.31 und Abb. 4.32 dargestellt. Auf die Darstellung der Ergebnisse der Berechnungen mit unverformtem Wasserspiegel wurde hier

verzichtet, da die bisherigen Berechnungen gezeigt haben, dass die verformte Wasseroberfläche einen wesentlichen Einfluss auf die Ausprägung des Drucks am Kanalboden hat.

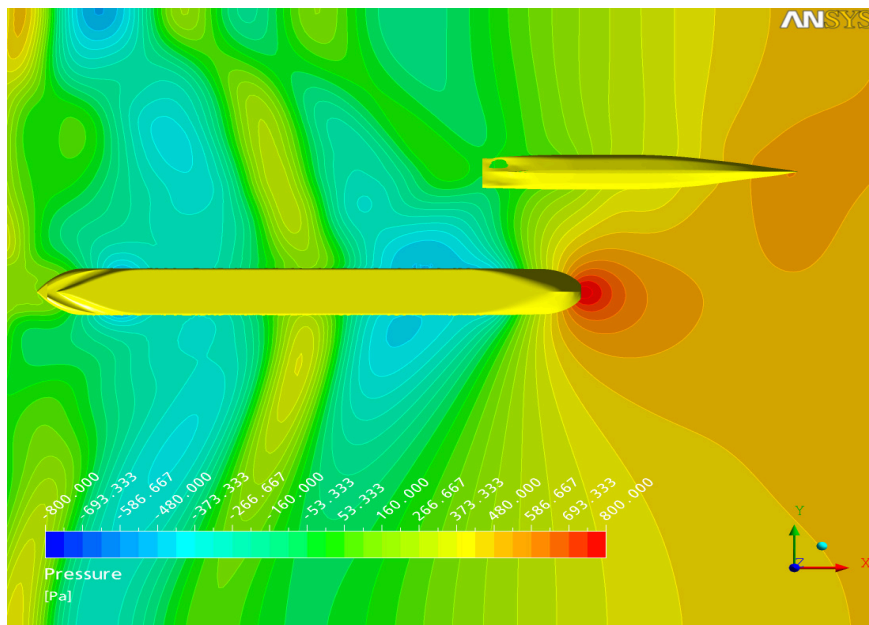


Abb. 4.31 Druck am Boden - Position Mitte FGS am Bug des GMS (mit WO)

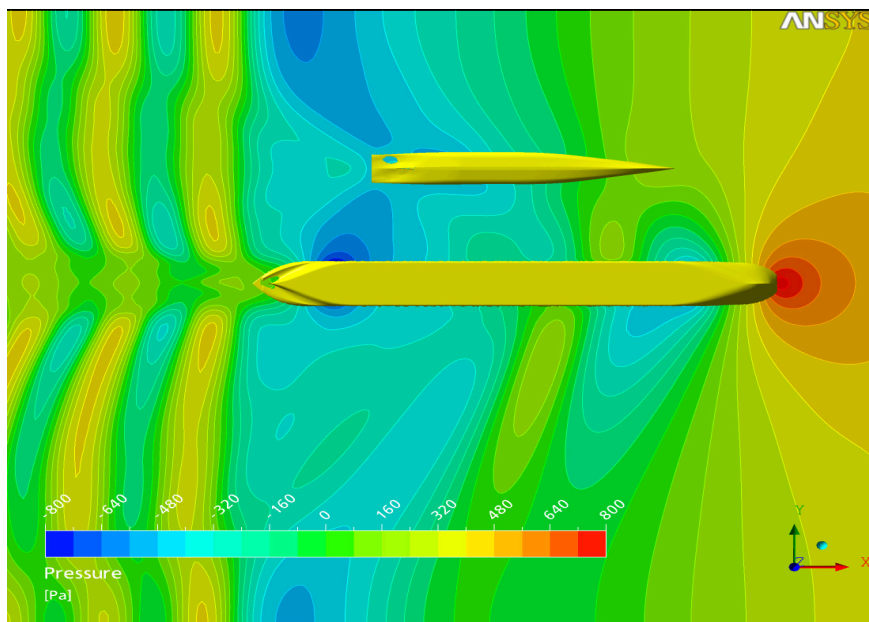


Abb. 4.32 Druck am Boden - Position Mitte FGS an Mitte des GMS (mit WO)

Auch für diese Berechnungen wurden die auf das Fahrgastschiff wirkenden Quer- und Längskräfte sowie die Momente um die z-Achse ermittelt und mit den Modellergebnissen verglichen.

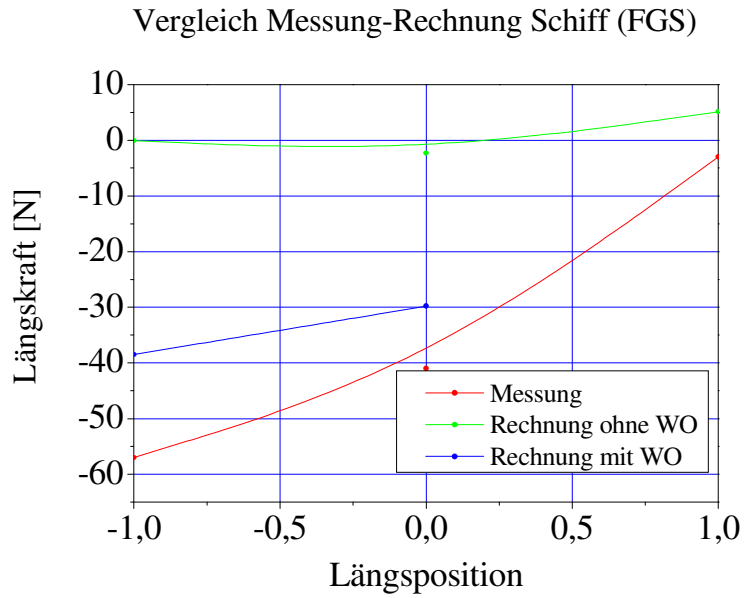


Abb. 4.33 Gegenüberstellung Experiment und Rechnung - Längskraft

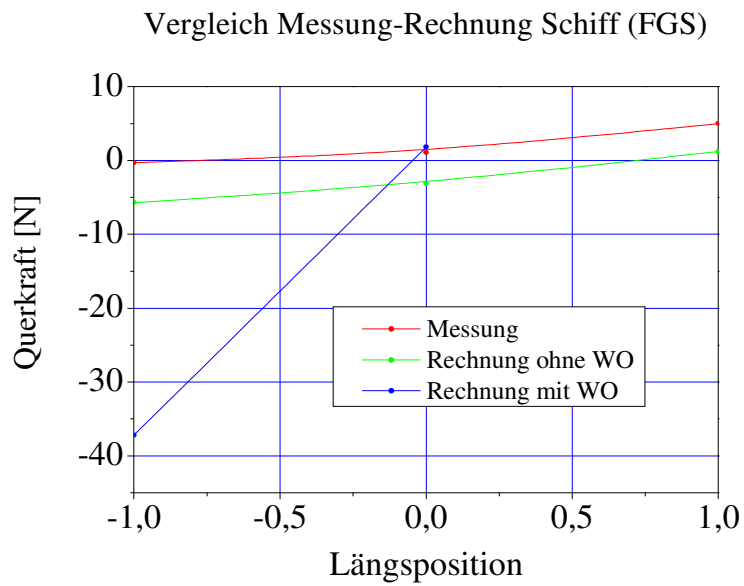


Abb. 4.34 Gegenüberstellung Experiment und Rechnung - Querkräft

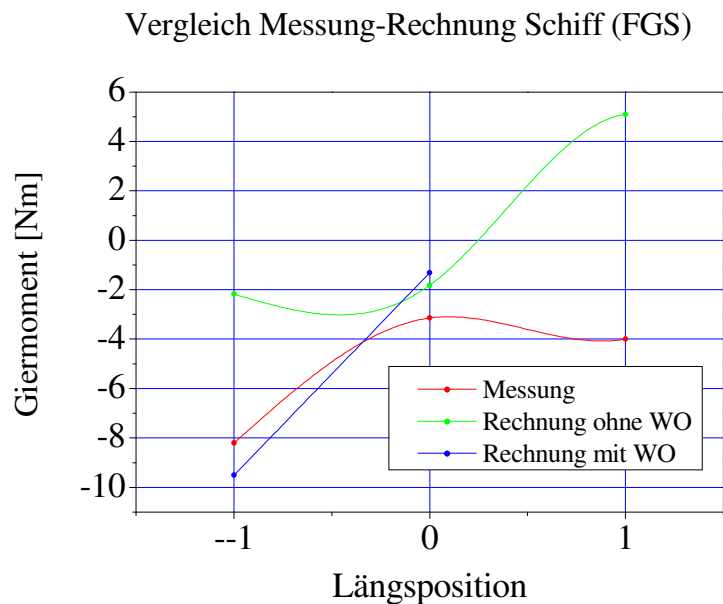


Abb. 4.35 Gegenüberstellung Experiment und Rechnung - Giermoment

Die Ergebnisse der Berechnungen ohne freie Wasseroberfläche zeigen bei der Längskraft und dem Giermoment keine zufrieden stellende Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen. Durch die Implementierung der freien Wasseroberfläche aus BESHiWa konnte für eine Reihe von Berechnungspunkten eine bessere Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen erzielt werden. Die Ursachen für die noch vorhandenen Abweichungen sind möglicherweise darin zu sehen, dass die Ausbildung der Strömungsverhältnisse beim Überholvorgang durch instationäres Verhalten gekennzeichnet ist. Die hier beschriebenen Ergebnisse basieren auf stationären Berechnungen. Eine weitere Verbesserung der Berechnungsergebnisse kann wahrscheinlich erreicht werden, wenn die Berechnung der Wasseroberfläche durch den RANSE-Solver erfolgt bzw. wenn der Überholvorgang numerisch als instationärer Vorgang mit bewegten Gittern realisiert wird.

5 Weiterentwicklung des 3D-Feldlösers MOUSE zur vollständig gekoppelten, instationären Berechnung relativ zueinander beweglicher Schiffe

Einer der Schwerpunkte des Vorhabens „SicherBin“ ist die Entwicklung leistungsfähiger numerischer Feldmethoden zur Berechnung instationär relativ bewegter Objekte in gemeinsamer Simulation. Simulationsmethoden, die dieser Anforderung genügen, sind anderweitig nur sehr eingeschränkt verfügbar, weswegen bereits zu Beginn des Forschungsvorhabens auf eine Eigenentwicklung gesetzt werden musste.

Es handelt sich somit um einen Kernbeitrag im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens, da die bis dato entwickelten und zukünftig weiter zu entwickelnden Methoden die Simulationsmöglichkeiten, gerade im Bereich des Binnenschiffverkehrs, erheblich erweitern sollen. Mittel- bis langfristig sollen alle Einschränkungen bzgl. der simulierbaren Szenarien (Anzahl der Schiffe, geometrische Bedingungen, Mindestabstände, Bewegungsformen) entfallen und bereits im vorliegenden Forschungsvorhaben sind weitgehende Erfolge in dieser Richtung zu verzeichnen.

Um dieses Ziel zu erreichen und somit ein schlüssiges Gesamtkonzept für Simulationsrechnungen relativ bewegter Binnenschiffe realisieren zu können, musste eine ganze Reihe von Entwicklungsschwerpunkten abgearbeitet werden. Zusammenfassend konzentrierten sich die Entwicklungsarbeiten im Wesentlichen auf folgende Unterpunkte:

- Überarbeitung des Basislösers zur Verbesserung der Portierbarkeit, Handhabbarkeit und Leistungsfähigkeit.
- Weiterentwicklung instationär inkompressibler Simulationsmethoden.
- Erarbeitung eines Konzepts zur gekoppelten Berechnung mehrerer, relativ bewegter Objekte mittels Overset-Methode.

Die betreffenden Entwicklungen werden im Folgenden dargestellt. Der zugrunde liegende Basislöser wird zunächst der Übersichtlichkeit halber in knapper Form dargestellt. Die äußerst umfangreiche Überarbeitung des Basislösers wird an dieser Stelle ebenfalls nur kurz skizziert, da informatische Aspekte gegenüber algorithmischen Entwicklungen zur gekoppelten Berechnung relativ bewegter Systeme in diesem Vorhaben nicht in den Vordergrund gerückt werden sollen.

5.1 Grundzüge des Basislösers für Strömungen mit freier Oberfläche

Das zugrunde liegende Basispaket MOUSE ist aufgrund der Historie und vielfachen Nutzung bereits mehrfach ausführlich beschrieben. Die für das vorliegende Forschungsprojekt wesentlichen Eckpfeiler werden daher im Folgenden nur kurz zusammengefasst. Detailliertere Darstellungen der Methoden sind z.B. in [MO1] (Grundlagen) oder in [ST1] (Spezifische Methoden für schiffstechnische Simulationen) dargestellt.

Das Basispaket MOUSE basiert auf einem Finite-Volumen Lösungsverfahren in knotenzentrierter Anordnung auf unstrukturierten und hybriden Gittern. Abbildung 1 zeigt die verwendete Grunddiskretisierung schematisch in zwei Dimensionen und ein entsprechendes 3D-Rechenmolekül.

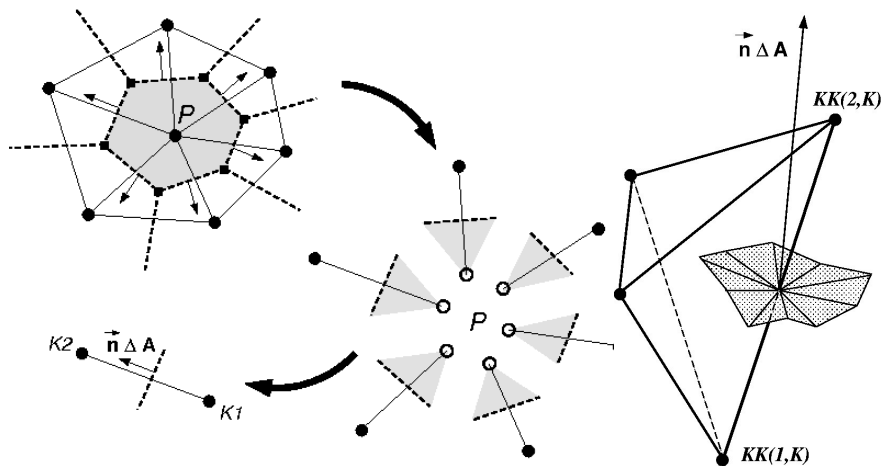


Abb. 5.1 Grunddiskretisierung: exemplarisch zweidimensional (links) und Rechenmolekül der 3D knotenzentrierten Diskretisierung

Für inkompressible Strömungen wie sie im schiffstechnischen Kontext zu simulieren sind, stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung, die im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens für transiente Simulationen weiterentwickelt wurden. Die Erhaltungsgleichungen lauten in differentieller Form:

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0 \quad \text{Kontinuitätsgleichung,} \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \operatorname{div} \vec{v} + \frac{1}{\rho} \nabla p - \operatorname{div} \overline{\overline{\sigma}} = -\vec{f} \quad \text{Impulsgleichung} \quad (5.2)$$

Hierin sind \vec{v} der Geschwindigkeitsvektor, p der Druck, ρ die Dichte und $\overline{\overline{\sigma}}$ der Spannungstensor ohne Druckanteil und \vec{f} ist der Vektor der spezifischen Volumenkraft, z.B. der Schwerkraftanteil.

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:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} + u \frac{\partial \Psi}{\partial x} + v \frac{\partial \Psi}{\partial y} + w \frac{\partial \Psi}{\partial z} = 0 \quad (5.3)$$

Im vorliegenden Fall wird für die Oberfläche der Iso-Wert 0 definiert und es gilt:

$$\Psi(x, y, z, t) > 0 \rightarrow \text{Luft}$$

$$\Psi(x, y, z, t) = 0 \rightarrow \text{Trennfläche}$$

$$\Psi(x, y, z, t) < 0 \rightarrow \text{Wasser}$$

Die Zeitintegration der Gleichung für Ψ kann über verschiedene Diskretisierungsansätze erfolgen. Eine Upwindformulierung auf der MOUSE-eigenen Finite Volumen-Diskretisierung zeigte sich als besonders geeignet und findet daher durchgängig Verwendung.

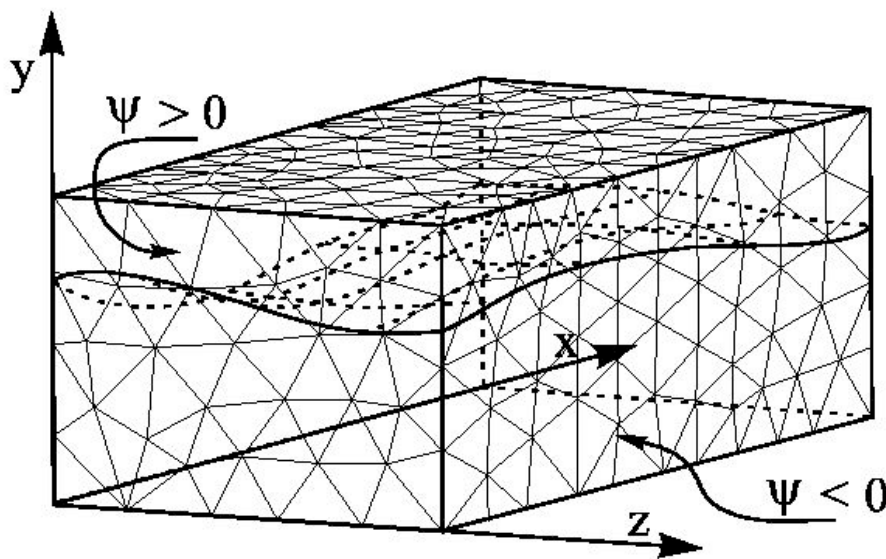


Abb. 5.2 Darstellung der Levelset Funktion zur Beschreibung der freien Oberfläche

Als Randbedingung wird zu jedem Zeitpunkt der Umgebungsdruck an der zeitlich veränderlichen freien Oberfläche vorgegeben.

Eine wesentliche Schwierigkeit der Levelset-Methode ist die Reinitialisierung des Ψ -Felds fernab der Diskontinuität. Außer an der Oberfläche selbst hat dieses Feld zwar keine physikalische Bedeutung, es ist aber sicherzustellen, dass keine störenden Einflüsse des Felds auf die Genauigkeit des zeitlichen Integrationsprozesses zurückwirken. Ferner ist sicherzustellen, dass kein numerisch verursachter Vorzeichenwechsel in der Flüssig- oder Gasphase eintreten kann, da dieser ansonsten wiederum als Oberfläche wahrgenommen würde. Um diese Eigenschaften zu erzielen wird näherungsweise eine Normalisierung im Fernfeld der Diskontinuität vorgenommen. Diese lautet $|\nabla\Psi| = 1$ und wird iterativ mitgelöst, während die eigentliche Transportgleichung (5.3) im Nahfeld der Oberfläche unverändert bleibt und somit eine formale Genauigkeit zweiter Ordnung sicherstellt.

5.2 Überarbeitung des Basislösers

Das Softwarepaket MOUSE basiert in den algorithmischen Grundkonzepten auf Entwicklungen, die teilweise bis knapp 10 Jahre alt sind. In der Zwischenzeit wurde es für sehr vielseitige Forschungsaufgaben und Anwendungen genutzt. Derzeit findet die Software Anwendung in zahlreichen kommerziellen und akademischen Problemstellungen. Den Autoren bekannte Simulationsanwendungen reichen von den hier diskutierten Schiffsumströmungen mit freier Oberfläche bis zur Simulation von Trägerraketen (ESA) oder von Grundwasserströmungen bis zur Analyse von Reaktoren zur Erzeugung von Nano-Partikeln.

Es versteht sich, dass die Diversifizierung der Entwicklungen eine entsprechend breite Basis grundlegender Methoden erfordert, die teilweise im Widerspruch zu Effizienz und Übersichtlichkeit standen.

Die verwendete Programmiersprache C++ hat sich ferner in den letzten 10 Jahren erheblich weiterentwickelt. Zu nennen sind beispielsweise Korrekturen des Standards bezüglich der Nutzung des Template-Mechanismus, der vor allem die Wiederverwertbarkeit der Module ohne Effizienzverluste ermöglicht. Die Einhaltung des jeweiligen Standards ist jedoch Voraussetzung für eine weitgehend freie Portierbarkeit.

Zuguter Letzt seien auch noch externe Pakete erwähnt, die vor allem zur Visualisierung und Parallelisierung genutzt werden. Auch diese werden fortlaufend angepasst und weiterentwickelt, wobei in gewissen Intervallen die Abwärtskompatibilität zugunsten einer höheren Leistungsfähigkeit geopfert werden muss. Dies erfordert dann Korrekturen bzgl. der Schnittstellendefinitionen.

Aus obigen Gründen war eine grundlegende Überarbeitung des Basispakets somit unumgänglich. Das bewährte Grundkonzept blieb hierbei weitestgehend erhalten, geändert werden mussten vor allem:

- Veränderte Kapselung des Pakets in weiter aufgefächerte Bibliothekssegmente mit thematischer Zuordnung.
- Syntaktische Überarbeitung zur Einhaltung des aktuellen C++ Standards.
- Anpassung der Schnittstellen zu externen Paketen mit Kompatibilität zu den jeweils aktuellen Versionen.
- Vollständige Überarbeitung aller Punkt- und Kanteniteratoren, in deren Folge auch der hierauf aufbauenden Operatoren.
- Neuprogrammierung der wesentlichen Datenstrukturen zur Verbesserung des Speicherzugriffs und algorithmisch verbesserte Aufbaumethoden.
- Konzeptionelle Umstellung der Randbedingungsverwaltung.
- Entfernung von Ballast. Dieser zunächst trivial anmutende Unterpunkt erleichtert die Handhabbarkeit und verringert die Zeit zur Kompilation erheblich.

Derart umfangreiche Anpassungen sind erfahrungsgemäß alle ca. 5–10 Jahre erforderlich. Alle in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen Methoden wurden bereits auf dem überarbeiteten Programmpaket entwickelt.

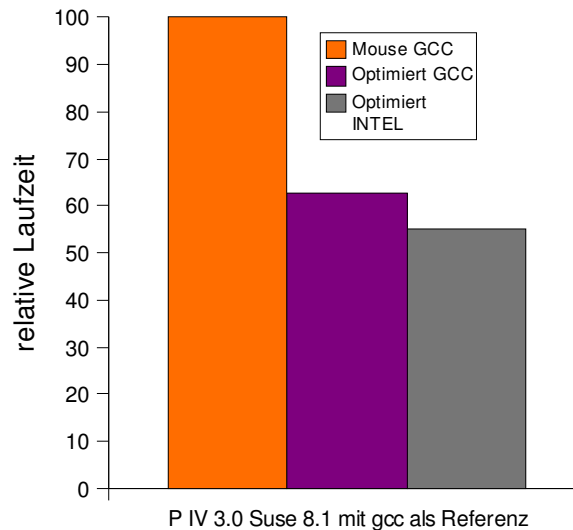


Abb. 5.3 Performance Verbesserung durch Softwareoptimierung

Neben verbesserter Handhabbarkeit und Portierbarkeit konnten auch erhebliche Leistungssteigerungen erzielt werden, Abb. 5.3. Diese werden einerseits durch die nun mögliche Nutzung aktueller Compilerversionen, sowie durch verbesserten Speicherzugriff und effizientere Basisalgorithmen erzielt.

5.3 Weiterentwicklung instationär inkompressibler Simulationsmethoden

Das grundsätzliche Problem zur Lösung von instationär inkompressiblen Strömungen basiert auf der nicht direkt zugänglichen Kopplung des Druckes mit der Kontinuitätsgleichung. In der Impulsgleichung (5.2) geht nur der Druckgradient, nicht aber der Druck selbst ein. Die numerische Lösung dieses Problem kann über unterschiedliche Ansätze erfolgen. Im Rahmen der Arbeiten im vorliegenden Forschungsvorhaben wurden eine duale Zeitschrittmethode basierend auf dem Verfahren der künstlichen Kompressibilität sowie ein Druckkorrekturverfahren entwickelt und erprobt.

5.3.1 Die duale Zeitschrittmethode

Das Verfahren der künstlichen Kompressibilität ist zunächst geeignet zur Bestimmung von stationären Lösungen. Die Kontinuitätsgleichung wird hierbei durch einen Term ergänzt. Dieser Term beschreibt eine künstliche zeitliche Änderung des Druckes (5.4), d.h. ein Massenerhaltungsfehler wird in eine Druckänderung umgewandelt. Durch die Hinzunahme dieses Terms wird das zu lösende Gleichungssystem hyperbolisch. Damit ist der Druck über die Kontinuitätsgleichung mit der Impulsgleichung gekoppelt und Lösungsstrategien für hyperbolische Systeme können ange-

wendet werden. Im stationären Zustand, d.h. wenn die Änderungen in der künstlichen Zeit gegen Null streben, sind sowohl die Kontinuitätsgleichung wie auch die Impulsgleichung erfüllt. Dieses Verfahren hat sich für stationäre Probleme als sehr robust und ausreichend effizient gezeigt.

Zur Lösung instationärer Probleme wird das Verfahren der künstlichen Kompressibilität modifiziert. Es wird nun die physikalische Zeitableitung der Geschwindigkeit in der Impulsgleichung (5.5) hinzugefügt:

$$\frac{1}{\beta} \frac{\partial p}{\partial \hat{t}} + \operatorname{div} \vec{v} = 0 \quad \text{modifizierte Kontinuitätsgleichung} \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial \hat{t}} + \vec{v} \operatorname{div} \vec{v} + \frac{1}{\rho} \nabla p - \operatorname{div} \vec{\sigma} = -\vec{f} \quad \text{modifizierte Impulsgleichung} \quad (5.5)$$

Die künstlichen Zeitableitungen entsprechen wieder dem Verfahren der künstlichen Kompressibilität. Die Lösung erfolgt nun über eine zusätzliche Iteration, dem dualen Zeitschritt. In jedem Zeitschritt werden die künstlichen Zeitableitungen zu Null getrieben, so dass die Kontinuitätsgleichung erfüllt ist. Für die Diskretisierung der zeitabhängigen Terme ergibt sich damit:

$$\frac{1}{\beta} \frac{p^{n+1,k+1} - p^{n+1,k}}{\Delta \hat{t}} + \operatorname{div} \vec{v}^{n+1,k} = 0$$

k ist hierbei die Iterationsstufe in der künstlichen Zeit.

Gilt $\lim_{k \rightarrow \infty} \vec{v}^{n+1,k} = \vec{v}^{n+1}$ und $\lim_{k \rightarrow \infty} p^{n+1,k} = p^{n+1}$ so reduziert sich das obige Gleichungssystem auf die eine konsistente implizite Diskretisierung der instationären inkompressiblen Navier-Stokes Gleichungen.

5.3.2 Druckkorrekturverfahren

Druckkorrekturverfahren basieren auf der folgenden Vorgehensweise:

Als erstes wird mit einem geschätzten Druckfeld p^* in einem Prädiktor-Schritt ein neues Geschwindigkeitsfeld bestimmt.

Dieses Geschwindigkeitsfeld erfüllt i.A. die Kontinuitätsgleichung nicht und muss daher korrigiert werden. Dazu wird im nächsten Schritt eine Poissongleichung gelöst, um eine Druckänderung p' zu bestimmen, deren Wirkung zu einem divergenzfreien Geschwindigkeitsfeld führen soll.

$$\nabla^2 p - \frac{\rho}{\Delta t} \operatorname{div} \vec{v}^* = 0$$

Anschließend werden die Geschwindigkeiten entsprechend der ermittelten Druckgradienten korrigiert.

$$\frac{\bar{v}^{n+1} - \bar{v}^*}{\Delta t} = -\frac{\Delta t}{\rho} \nabla p$$

In dem hier beschriebenen Verfahren (eine implementierte Variante) muss die Poissongleichung exakt gelöst werden, damit die Geschwindigkeit zum neuen Zeitpunkt die Massenerhaltung erfüllt.

Eine weitere implementierte Variante ist die, statt der exakten Lösung der Poissongleichung, mit einem Iterationsverfahren eine Näherung für p' zu bestimmen, die Geschwindigkeiten zu korrigieren und bei nicht Erfüllung der Massenerhaltung mit diesen neuen Geschwindigkeitsschätzungen und dem Druck $p^{*,k+1} = p^{*,k} + p'^{+k}$ den vorher beschriebenen Lösungsprozess zu wiederholen. Dies führt insgesamt zu einem impliziten, instationären Verfahren, wobei k wiederum ein Iterationsindex ist.

Die Finite-Volumen-Ortsdiskretisierung erfolgt auf einer nicht versetzten, unstrukturierten Gitteranordnung (*colocated grid*), so dass die Entkopplungserscheinungen im Druckfeld durch geeignete Diskretisierung des Drucks innerhalb der Poissongleichung unterbunden werden müssen. Diese Diskretisierung begrenzt den Abhängigkeitsbereich eines Punktes auf seine erste Nachbarschaftsebene und unterbindet so die ansonsten auftretenden Entkopplungserscheinungen. Aufgrund dessen ist das Lösungsverfahren auf unstrukturierten, nicht versetzten Gitteranordnungen einsetzbar.

5.3.3 Validierung der instationären Lösungsmethoden an einem Benchmark

Ein anspruchsvoller Benchmark für inkompressible, viskose Strömungen ist die Umströmung eines Zylinders in einem Kanal. Dieser Testfall wurde in den 90er-Jahren im Rahmen eines DFG-geförderten Schwerpunktprogramms von einer Arbeitsgruppe um die Professoren Rannacher, Durst und Krause entwickelt, [FE1], und gilt unter numerischen Entwicklern mittlerweile schlicht als "der DFG-Test".

Hierbei ist die Reynoldszahl, $Re=100$, so gewählt, dass sich gerade noch eine Wirbelstraße entwickeln muss. Die Auswirkung der sich ablösenden Wirbel äußert sich in einer zyklischen Änderung der Strömungsgrößen. Diese zyklischen Änderungen sind hier exemplarisch am Beispiel des Auftriebsbeiwertes angegeben.

Zu diesem Testfall liegt eine sehr hohe Zahl an Ergebnissen unterschiedlicher Entwicklergruppen mit entsprechend vielfältigen Methoden vor. Es ist nach Ansicht der Autoren dieses Berichts einer der am besten dokumentierten und verglichenen Testfälle für numerische Entwicklungen überhaupt mit allerdings erstaunlichem Ergebnis. So zeigen unterschiedliche Methoden teilweise sehr unterschiedliche Lösungen. Einige, auch marktübliche Methoden (hier nicht dargestellt) versagen vollständig, da ihre interne Viskosität zugunsten einer allgemeinen Robustheit zu hoch ist und die Lösung somit in eine stationäre Umströmung übergeht. Umfangreiche Ergebnisse

der sehr unterschiedlichen numerischen Verfahren sind in [FE1] zusammengefasst. Abb. 5.4 zeigt die Geometrie, Abb. 5.5 Ergebnisse für integrale Vergleichsgrößen.

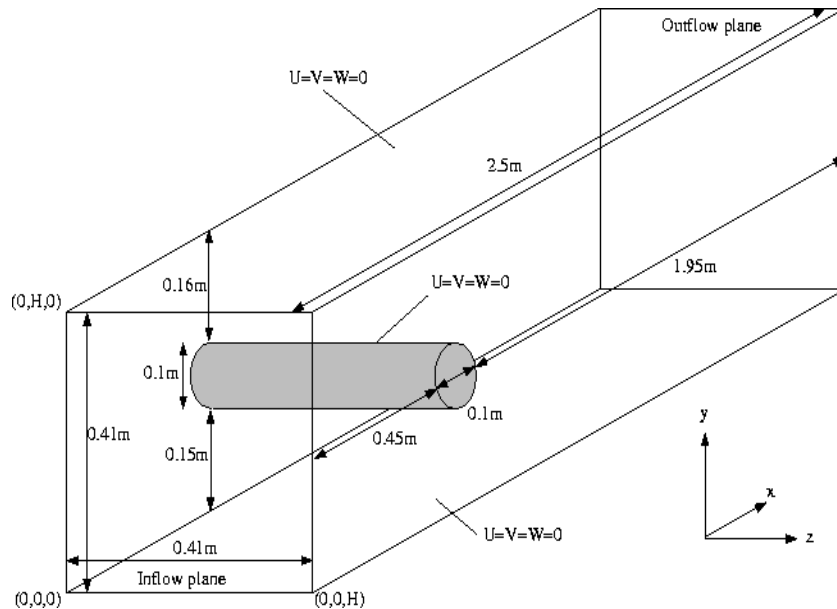


Abb. 5.4 Quelle: www.featflow.de/bench_all/paper.html

	Unknowns		c_{Dmax}	c_{Lmax}	St	Mem.	CPU time	MFlop rate
	Space	Time						
1	630564	177	3.3018	-0.0014	0.3390	78	26115	1600 PEAK
3	608496	-	3.2250	-0.0142	-	74		1408 LINP
	608496	-	3.2250	-0.0142	-			
6	6303750	18000	3.7920	-0.0210	-	43	142646	13 LINP
7b	12582912	93	3.3052	-0.0105	0.3409	3571	24459	1779 LINP
	1572864	378	3.3057	-0.0118	0.3172	518	9487	445 LINP
	1572864	261	3.3054	-0.0118	0.2250	518	2740	445 LINP
	1572864	126	3.3050	-0.0018	0.2400	518	1956	445 LINP
	196608	-	3.3121	-0.0150	-	71	-	111 LINP
9b	2355712		3.2968					90 LINP
	753664		3.3254					
	94208		3.3284					
10	6116608	128	3.2950	-0.0081	0.2912	840	31145	90 LINP
	6116608	120	3.2970	-0.0025	0.2830	840	31730	
	6116608	80	3.3200	0.0480	0.2684	840	21586	
	771392	68	3.3801	0.0086	0.2343	105	2163	
	98128	-	3.4593	-0.0102	-	13	-	
	lower bound		3.2900	-0.0110	0.2900			
	upper bound		3.3100	-0.0080	0.3500			

Abb. 5.5 Quelle: www.featflow.de/bench_all/paper.html

Die mit den vorliegenden Entwicklungen unter MOUSE erzielten Ergebnisse sind in Abb. 5.6 bis Abb. 5.8 dargestellt. Abb. 5.6 und Abb. 5.7 zeigen Isoflächen des Druckes bzw. der Geschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung. Der über der Zeit ermittelte Auftriebsbeiwert ist in Abb. 5.8 dargestellt. Der ermittelte Verlauf des Auftriebsbeiwerts liegt sehr gut innerhalb der rot eingetragenen Begrenzungen, die im Benchmark als Grenzen festgelegt wurden.

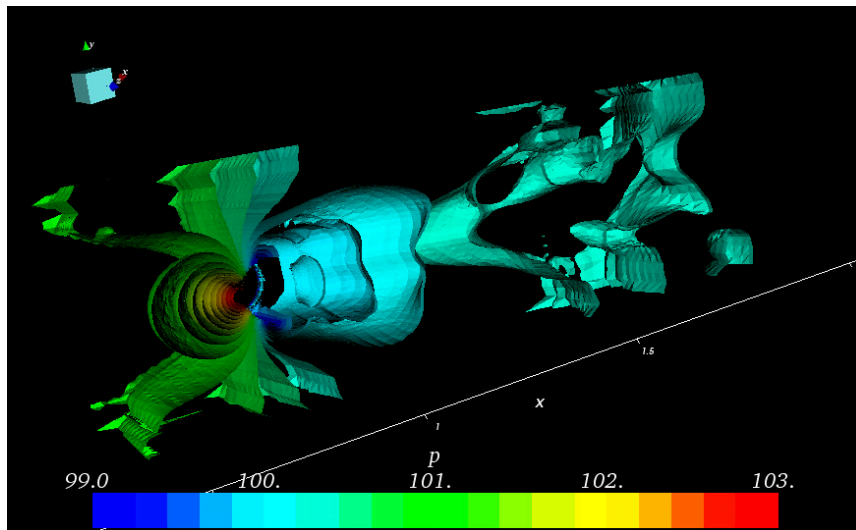


Abb. 5.6 Isolflächen des Druckes

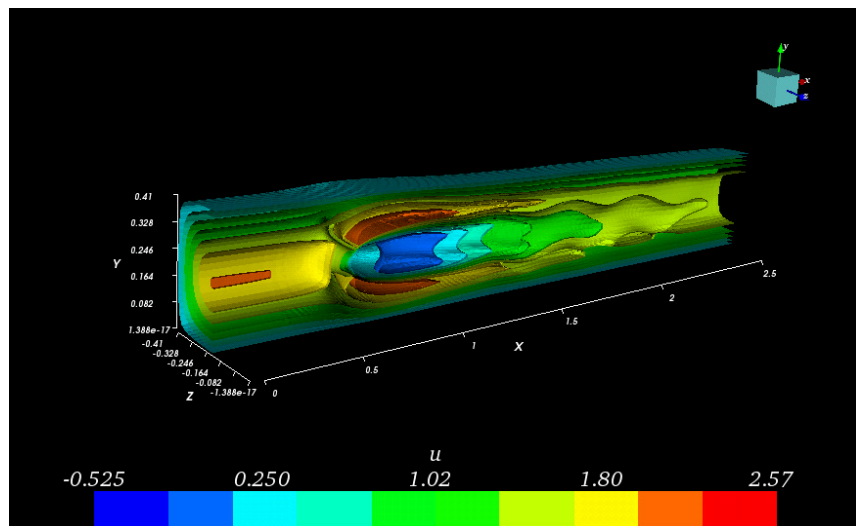


Abb. 5.7 Isolflächen der Geschwindigkeit

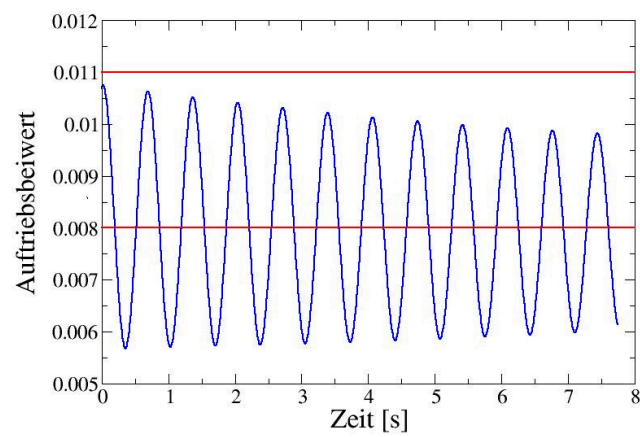


Abb. 5.8 Auftriebsbeiwert und die Grenzen für seinen maximalen Wert (rote Linien)

5.3.4 Vergleich der dualen Zeitschrittmethode mit der Druckiterationsmethode

Beide Methoden, also die duale Zeitschrittmethode und die Druckiterationsmethode, haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile. Aus Sicht der Antragsteller kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine eindeutige Präferenz angegeben werden, bzw. mit fortlaufender Entwicklung verändern sich die Vorzüge der Methoden. Zusammengefasst ist jedoch festzustellen:

- Die duale Zeitschrittmethode ist bemerkenswert robust und somit weniger problematisch in der Handhabung bei diffizilen Simulationen.
- Die duale Zeitschrittmethode ist sehr Speichereffizient, da lediglich ein Zwischenfeld angelegt werden muss. Im Vergleich hierzu erfordern Druckiterationsmethoden die Speicherung von Koeffizientenfeldern, sofern allgemeine Gittertypen verwendet werden sollen.
- Die duale Zeitschrittmethode ist sehr anpassungsfähig und somit in einer Entwicklungsumgebung vorteilhaft. Bei Neu- bzw. Zusatzentwicklungen sind i.a. nur entsprechende explizite Operatoren erforderlich.
- Druckiterationsmethoden sind i.A. effizienter, sofern die freien Parameter, z.B. Faktoren zur Unterrelaxation, dem Problem angemessen gewählt werden. Dies ist allerdings wesentlich kritischer, als bei der dualen Zeitschrittmethode.
- Druckiterationsmethoden verlieren stärker bei paralleler Abarbeitung, da die Iteration der linearen Gleichungssysteme häufigere Austauschoperationen zwischen den Prozessoren zur Folge haben.

Obwohl beide Entwicklungen vorliegen, werden nachfolgende Beispiele mit der dualen Zeitschrittmethode simuliert. Ausschlaggebend hierfür war vor allem der geringere Speicherbedarf.

5.4 Erarbeitung eines Konzepts zur gekoppelten Berechnung mehrerer, relativ bewegter Objekte mittels Overset-Methode

Im Gegenzug etwa zum Luftverkehr zeichnet sich der Schiffsverkehr, insbesondere der Binnenschiffsverkehr, durch relativ enge Wasserwege aus. Dies hat zur Folge, dass sich die Schiffe aufgrund des teilweise geringen Abstands gegenseitig erheblich beeinflussen können. Da die Schiffe ferner als einzelne Objekte unterschiedliche Bewegungen ausführen, bedeutet dies für eine möglichst umfassende Simulation der Umströmung:

- Eine gekoppelte Berechnung der beteiligten Schiffe in gemeinsamer Simulation ist erforderlich.
- Es handelt sich um relativ bewegte Systeme, d.h. es ist i. A. keine starre Darstellung der Gesamtgeometrie des Rechenproblems möglich.

5.5 Prinzipielle Möglichkeiten zur gekoppelten Simulation relativ bewegter Objekte

Mit wenigen Ausnahmen, die sich als reine Forschungsentwicklungen verstehen, erfolgen Strömungssimulationen stets auf Rechengittern. Diese Gitter stellen eine Parzellierung des Rechengebiets, also des Raums in dem die Strömung simuliert werden soll, dar. So verwendet der hier zugrunde liegende Basislöser eine knotenzentrierte Diskretisierung auf unstrukturierten und hybriden Netzen, vgl. auch Kapitel 5.1. In der überwiegenden Mehrzahl aller Anwendungsfälle ist dieses Gebiet statisch, d.h. nicht veränderlich. Es kann somit vorab vernetzt werden und muss, außer ggf. zum Zweck der Adaption, nicht mehr verändert werden. Dies trifft im Fall relativ bewegter Systeme nicht zu.

Es bestehen nun unterschiedliche Ansätze zur Simulation relativ bewegter Systeme, die sich in Aufwand, Leistungsfähigkeit und Flexibilität sehr deutlich unterscheiden:

- Flusskopplung zwischen inneren Berandungen von Teilnetzen.
- Bewegtes Einzelgitter.
- Overset-Netzanordnung.

Die unterschiedlichen Möglichkeiten werden im Folgenden kurz dargestellt und Ihre jeweiligen Vor- und Nachteile diskutiert.

Flusskopplung auf inneren Rändern von Teilnetzen:

In diesem Fall werden die relativ bewegten Objekte einzeln vernetzt. Die Bewegung ist so zu gestalten, dass Randflächen verschiedener Netze übereinander abgleiten können, die Netze werden also an definierten Randflächen zusammengesetzt. Über diesen Flächen erfolgt dann die Flusskopplung, wobei lediglich die Zuordnung der Zellflächen veränderlich ist. Im Fall relativ bewegten Schiffsverkehrs kann die Methode mit Einschränkung genutzt werden, falls sich zwischen den relativ bewegten Gittern eine feste Berandung definieren lässt und die relative Bewegung längs dieser Berandung erfolgt. So könnten beispielsweise lineare Passagen simuliert werden, sofern die Trajektorie vorab bekannt ist, siehe Abb. 5.9.

Weitere Freiheitsgrade der Relativbewegung, z.B. Absenkungen, Vertrimmungen oder Gierbewegungen, sind jedoch nur möglich, falls diese über zusätzliche Gitterkopplungen dargestellt werden. Mittelfristig stellt dies eine kaum hinnehmbare Einschränkung dar, weswegen die Entwicklung einer Flussgekoppelten Methode für innere Randflächen verworfen wurde.

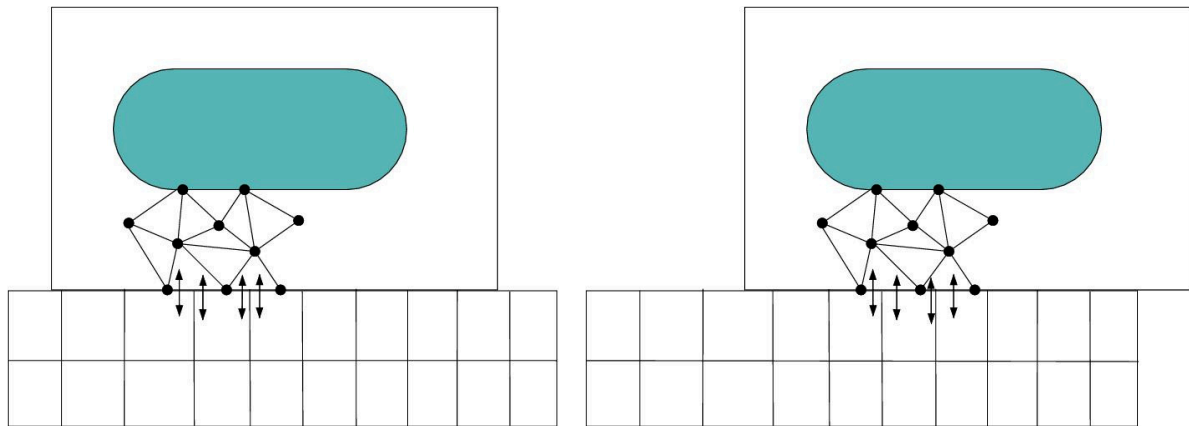


Abb. 5.9 Methode der Flusskopplung: Die Fluss-Zuordnung der Zellen ist veränderlich.

Bewegtes Einzelgitter:

Alternativ können Simulationsrechnungen auf einem einzelnen Gitter erfolgen, sofern dieses entsprechend verzerrt werden kann, Abb. 5.10. Um die Verzerrung der Gitter in Grenzen zu halten, sind bei großen Verformungen i.A. auch laufend Umverknüpfungen des Netzes erforderlich. Die Methode ist somit weitestgehend auf logisch unstrukturierte Gitter beschränkt.

Der Vorteil dieser Methode ist, dass prinzipiell alle denkbaren Relativbewegungen erfasst werden können, falls die betreffenden Gleichungen entsprechend auf bewegten und sich verformenden Gittern diskretisiert werden. Nachteil ist vor allem der hohe, laufende Vernetzungsaufwand, der zudem eine durchgängige Parallelisierung fast unmöglich macht. Die Methode wurde daher für die Arbeiten im vorliegenden Vorhaben verworfen.

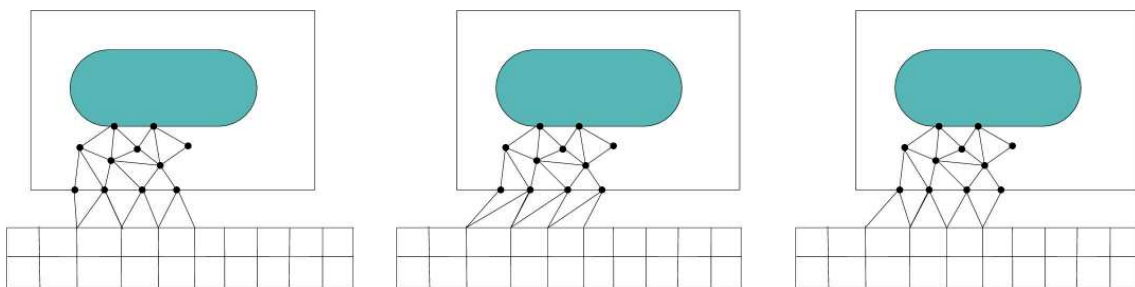


Abb. 5.10 Bewegtes Einzelgitter: Zellen des Netzes, entweder gesamt oder in dezidiertem Koppelzone werden verzerrt bis eine Umverknüpfung erfolgt.

Overset-Gitterstrategie:

Bei der Overset-Gitterstrategie werden starr vernetzte Gitter für alle relativ bewegten Objekte erzeugt und übereinander gelegt. Eine Kopplung zwischen den Netzen erfolgt entweder über eine wechselseitige Interpolation oder über eine Flusskopplung. Eine wechselseitige Interpolation ist sehr allgemein und ohne Eingriff in die Gestalt der diskretisierten Gitterzellen möglich, Abb. 5.11. Hierbei bewegen sich die anzukoppelnden Zellen und Gitterpunkte übereinander hinweg. Sind die Trajektorien vor-

ab nicht bekannt, ist daher ein leistungsfähiger Such- und Interpolationsalgorithmus erforderlich. Die Overset-Gitterstrategie erlaubt beliebige Relativbewegungsmodelle, entsprechend auch Spezialfälle wie z.B. der Rotation um eine starre Achse oder eine geführte lineare Bewegung. Sehr vorteilhaft ist die Austauschbarkeit und freie Kombinierbarkeit verschiedener Objekte. Z.B. können im vorliegenden Fall verschiedene, jeweils einzeln vernetzte Schiffe vorgehalten werden, die nach Bedarf in entsprechende Hintergrundnetze der Gewässer eingesetzt werden. Die Methode bietet sich somit in besonderem Maße für Parameterstudien oder Optimierungsaufgaben an. Overset-Methoden, auch Chimera-Methoden genannt, sind insbesondere im Zusammenspiel mit unstrukturierten und hybriden Gittern relativ neue und noch wenig erforschte Methoden. Hervorzuheben sind z.B. Arbeiten von Togashi et. al. [TO2001] und Wang et. al. [WA2005], bei denen Relativbewegungen von Flugkörpern untersucht werden. Die überwiegende Zahl der marktüblichen CFD-Pakete hingegen basiert derzeit auf konformen, geschlossenen Gittertypen.

Aufgrund der Vorteile, vor allem hinsichtlich Flexibilität, wurde in diesem Forschungsvorhaben bereits in einer frühen Projektphase für die Overset-Technik votiert. Aus einem vorangegangenen Forschungsprojekt, siehe [HY1], konnte ferner auf grundlegende Entwicklungen und Erfahrungen mit der Methode zurückgegriffen werden. Zu diesem Zeitpunkt jedoch noch mit erheblichen Einschränkungen. So waren die Möglichkeiten grundsätzlich auf Zwei-Gittersysteme beschränkt, d.h. es bestand bis dato lediglich die Möglichkeit je ein festes und ein bewegtes Rechengitter, entsprechend einem relativ bewegten Objekt je Simulation, einzusetzen. Die Entwicklungen im vorliegenden Forschungsvorhaben sollen deutlich über diesen Stand hinausgreifen. Insbesondere ist die Overset-Technik mittelfristig auch für weitere, schiff- bzw. wasserbaulich relevante Problemstellungen einsetzbar. Zu nennen sind Simulationsrechnungen unter Berücksichtigung einer Vielzahl relativ bewegter Objekte und einer sehr flexiblen Implementierung von Bewegungsmodellen, die mittelfristig sowohl geführte, wie auch lösungsabhängige Bewegungsformen in allen Freiheitsgraden, z.B. Absenkung, Vertrimmung oder seegangsbedingte Bewegungen, zulassen sollen.

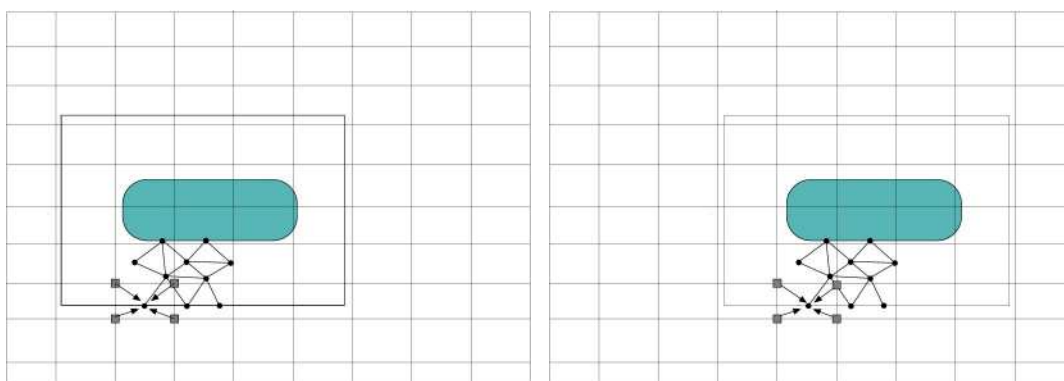


Abb. 5.11 Overset-Gitterstrategie: Starre Teilgitter mit wechselseitiger Informationsübertragung bei veränderlicher Zuordnung

5.5.1 Die Overset-Objekt-Methode

Bereits in vorangegangenen Projekten wurde auf Basis des Programmpakets MOUSE eine Overset-Methode für relativ bewegte Systeme in Grundzügen entwickelt. Es zeigte sich jedoch, dass für das laufende Projekt „SicherBin“ und hierauf aufbauende, zukünftige Entwicklungen, eine erheblich höhere Flexibilität gefordert wird. Dies war der Ausgangspunkt für eine grundlegende konzeptionelle Umgestaltung der Methode.

Gefordert werden:

- Vollständige Freiheit bezüglich der Anzahl relativ bewegter Objekte.
- Volle Kompatibilität zu allen bisherigen und zukünftigen Rechenmodulen, d.h. die Methode soll auf bestehenden Lösungsmodulen aufsetzen, ohne mit diesen in logische Konflikte zu treten.
- Offene Schnittstelle zur Implementierung von Bewegungsmodellen aller Art, d.h. vorgegebene, teilweise vorgegebene oder lösungsabhängige Bewegungsmodelle.
- Rekursiv bewegliche Objekte für mittelfristig anstehende Simulationsrechnungen. Z.B. bewegtes Schiff im Wellengang mit rotierendem Antriebsorgan in gemeinsamer Simulationsrechnung.
- Hohe Rechenleistung. D.h. die zusätzlichen Methoden sollen bestehende Konzepte zur Leistungssteigerung des Programmpakets nicht behindern und seinerseits sollen keine nennenswerten Rechenleistungen für Verwaltung und Kopplung relativ bewegter Systeme erforderlich sein.

Diese Anforderungen führten zur Entwicklung des als Overset-Objekt-Methode benannten Konzepts, das im Folgenden vorgestellt wird. Der hiermit verbundene Entwicklungsaufwand ist sehr hoch. Konzeptionell wesentliche Arbeiten sind abgeschlossen, es stehen jedoch noch weitere Arbeiten aus, um insbesondere eine durchgängige Parallelisierung der Methode zu ermöglichen.

Grundzüge der Overset-Objekt-Methode:

Die Overset-Objekt-Methode geht davon aus, dass grundsätzlich alle einzelnen Objekte, die in einer gemeinsamen Simulationsrechnung berechnet werden sollen, einzeln vernetzt vorliegen. Die Vernetzung kann mit üblichen Methoden erfolgen, wobei i.A. eine relativ enge Vernetzung um jedes Objekt ausreichend ist. Z.B. kann ein Schiffsrumpf mit wenigen Elementschichten vernetzt werden. Die Elementtypen sind entsprechend der Eigenschaft des zugrunde liegenden Programmpakets MOUSE frei wählbar. Bei Schichten bieten sich strukturierte oder teilstrukturierte Schichtnetze an, dies ist jedoch keine Voraussetzung.

Die Rechenumgebung selbst, im Fall eines Binnenschiffs etwa das betreffende Gewässer, wird ebenfalls einzeln vernetzt. Eine gekoppelte Berechnung erfolgt, indem

die betreffenden, ggf. beweglichen Objekte in das Umgebungsnetz eingesetzt werden. Dies entspricht einem hierarchisch geordneten Prinzip, in dem die eingesetzten Objekte eine höhere Priorität besitzen und somit die darunter liegende Lösung überstimmen.

Platzierung und Bewegung der Objekte erfolgt in etwa vergleichbar den Methoden der Computergrafik. So werden die Objekte in Baumstruktur angeordnet und ggf. rekursiv bewegt. Die jeweilige Position wird mittels eines Szenieriefles in Abb. 5.12 beschrieben, das während einer laufenden Berechnung in kurzen Abständen aktualisiert wird.

Entsprechende Bewegungsmodelle, die nach weitgehend verallgemeinerten Schnittstellen dem jeweiligen Anwendungsfall entsprechend erstellt werden können, steuern die Umpositionierung des jeweiligen Objekts, seine Geschwindigkeitstransformation und ggf. auftretende innere Beschleunigungsterme.

Implementierung im Basislöser:

Wie eingangs dargestellt soll der Basislöser weitestgehend unbeeinflusst bleiben. Dies erfolgt unter Nutzung des objektorientierten Grundkonzepts von MOUSE. Alle Lösungsmethoden wie auch die Klassen (C++) für die Verwaltung der Objekte werden unabhängig voneinander aufgebaut und sind nach diesem Prozess im Programmablauf ohne Einschränkung verfügbar.

Abb. 5.13 zeigt schematisch die ergänzende Programmstruktur.

Zentrale Verwaltungsklasse für alle Overset-Objekt Module ist der so genannte „OversetObjectManager“ (hellblau). Bei jeder Overset-Simulation ist eine eindeutige Instanz dieser Klasse erforderlich. Der „OversetObjectManager“ kennt die vollständige Struktur aller „OversetObjects“ (giftgrün), also der einzelnen Teilnetze des Problems. Diese sind in hierarchischer Struktur aufgebaut.

Bewegungen werden mittels „MotionModels“ (rostrot) realisiert, die wiederum dem „OversetObjectManager“ bekannt sind. Jedes Overset-Objekt bewegt sich nach einer eindeutig bestimmten Vorschrift, entsprechend je eines Bewegungsmodells. Das gleiche Bewegungsmodell kann jedoch für mehrere Overset-Objekte verwendet werden.

Die Ablaufsteuerung eines bestehenden MOUSE-Programms kann nun durch entsprechende Overset-Objekt-bezogene Aktionsmethoden, „OversetObjectActions“, lavendelfarben, ergänzt werden. Diese steuern die wechselseitige Datenanbindung zwischen den Netzebenen, die Bewegung der Objekte, Geschwindigkeitstransformationen, innere Impulsquellen und das I/O des Szenieriefles sowie ggf. weitere Interaktionen.

```

Combined 2 Ships in box , static

cummlate_time:
0.0
number overset levels:
2

*** level *****
0 1          => level: 0  amount OversetObjects in level 0: 1
              => blanc line
background_3 largebox => name of mesh: cartblock, nickname of mesh: largebox
1.0          => scaling relative to file-coordinates
NULL        => all level 0 OversetObjects have void parents
0           => number transup-codes, transup-codes
NoMotion    => Internal name of motion model used
0.0 0.0 0.0 => center of gravity
1.0        => mass of object
1.0 1.0 1.0 => turn inertia
0.0 0.0 0.0 => actual coordinate shift
1.0 0.0 0.0 0.0 => actual orientation (as quaternion)
0.0 0.0 0.0   => actual linear speed relative to underlaying mesh
0.0 0.0 0.0   => actual omega (turn speed) relative to underlaying mesh
              => blanc line
*** level *****
1 2          => level: 1  amount OversetObjects in level 1: 2
              => blanc line
shipA  ship1 => name of mesh: leichterhuell, nickname of mesh: ship
1.0    => scaling relative to file-coordinates
largebox => nickname of parent
4 2 3 11 13 => 4 transup-codes: 2 3 11 13
TSL_TabularMotion_1 => Name of MotionModel as assigned in mcl-file
0.0 0.0 0.0 => center of gravity
1.0        => mass of object
1.0 1.0 1.0 => turn inertia
1.5 0.0 -0.56753688 => actual coordinate shift
1.0 0.0 0.0 0.0 => actual orientation (as quaternion)
1.0 0.0 0.0   => actual linear speed relative to underlaying mesh
0.0 0.0 0.0   => actual omega (turn speed) relative to underlaying mesh
              => blanc line
shipB      ship2 => name of mesh: leichterhuell, nickname of mesh: ship
1.0        => scaling relative to file-coordinates
largebox   => nickname of parent
4 21 23 25 27 => 4 transup-codes: 21 23 25 27
TSL_TabularMotion_2 => Name of MotionModel as assigned in mcl-file
0.0 0.0 0.0 => center of gravity
1.0        => mass of object
1.0 1.0 1.0 => turn inertia
10.0 0.0 -1.13507377 => actual coordinate shift
1.0 0.0 0.0 0.0 => actual orientation (as quaternion)
-1.0 0.0 0.0   => actual linear speed relative to underlaying mesh
0.0 0.0 0.0   => actual omega (turn speed) relative to underlaying mesh

=> Remark on motion models: Models must be constructed in mcl-file and
carry unique names. Each motion model name will be stored for usage on
each processor.

=> Connection to a single lower OversetObject omitted.
    Be free in any constellation.

=> Levels indicate solution priority only.

=> Relative motion with respect to any lower OversetObject

=> Note nicknames are unique and internally used. The geometry can be
taken from the same file for several objects.

```

Abb. 5.12 Eingabedatei zur Beschreibung der Overset-Objekt-Struktur.

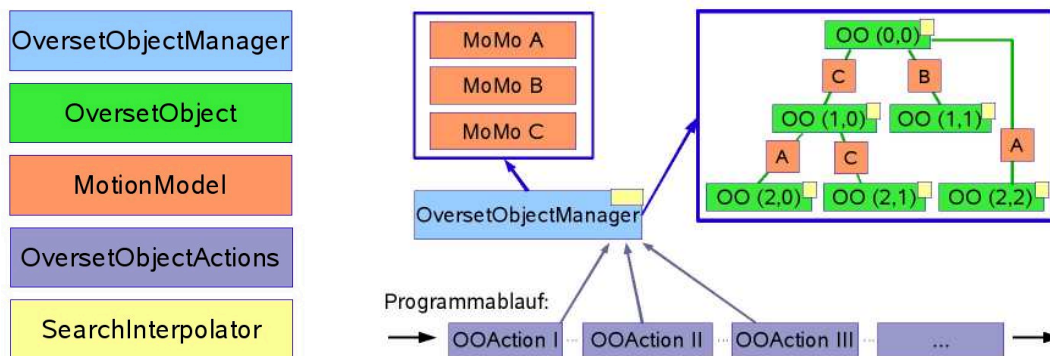


Abb. 5.13 Datentypen (links) und Programmstruktur (rechts) der Overset-Objekt-Methode. Die Module fügen sich in bestehende MOUSE-Programmstrukturen ein.

Wesentliches Bindeglied zur Datenkopplung sind die erforderlichen Such- und Interpolationsmethoden, „SearchInterpolator“, gelb. Von diesen Klassen, insbesondere von deren Leistungsfähigkeit, hängt ab, ob die Verfahren wirtschaftlich eingesetzt werden können. Die Kopplungsmethoden sind daher im folgenden Unterkapitel detaillierter beschrieben.

Kopplung zwischen Teilgittern unterschiedlicher Level - Informationsaustausch:

In der vorliegenden Version des Overset-Algorithmus erfolgt die Kopplung verschiedener Hierarchieebenen durch einen Interpolationsansatz. Um einen wirtschaftlichen und sicheren Datenaustausch zwischen einzelnen Teilgittern zu gewährleisten ist hierfür ein strenges Regelwerk der gegenseitigen Abhängigkeiten erforderlich.

In Überlappungsbereichen hat stets das in einer höheren Hierarchieebene liegende Gitter Vorrang und bestimmt somit den Strömungszustand. Die Hierarchieebenen sind also als Prioritätsebenen aufzufassen.

Im Fall der hier simulierten Systeme aus Hintergrundgitter (Gewässer) und bewegten Schiffen, wird den Schiffen die höhere Priorität zugewiesen. Dies gilt jedoch nicht für äußere Randpunkte der schiffsfesten Gitter. An diesen werden die Strömungsvariablen des darunter liegenden Hintergrundgitters per Interpolation heran gezogen. Um die wechselseitige Datenübertragung sicher zu stellen ist noch ein entsprechender Abstand, also eine Schutzzone erforderlich, in der die Lösungen auf beiden Gittern existieren. Ist das Hintergrundgitter, wie hier üblich, durchgängig, so bedeutet dies, dass in einem randnahen Gebiet des darüber liegenden Gitters höherer Priorität eine Rückinterpolation vermieden werden muss. Abb. 5.14 zeigt zwei Teilgitter A und B in den Hierarchieebenen K und K-1, welche als Prioritätsebenen aufzufassen sind. Zur Vereinfachung hier für ein zweidimensionales Problem skizziert.

Es entsteht somit eine wechselseitige Abhängigkeit. Von einem Teilnetz A höherer Priorität aus gesehen lautet die Vorschrift somit:

- Datenübertragung von darunter liegendem(n) Teilnetz(en) B auf die äußeren Ränder von A . Hierzu sind Interpolationszugriffe in B erforderlich.
- Datenübertragung aus dem Kernbereich von A auf B . Hierfür sind Interpolationszugriffe in A erforderlich.

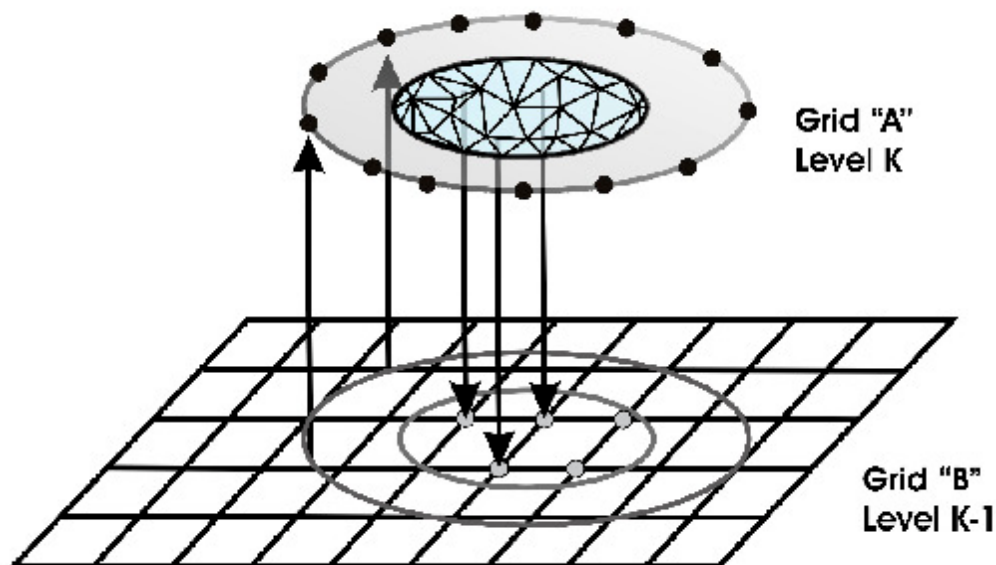


Abb. 5.14 Schematische 2D Darstellung der Interpolationskopplung in zwei Hierarchieebenen K-1 und K. Die Pfeile geben die Richtung der Datenübertragung an. Eine Schutzzone in der keine Datenübertragung stattfindet, hier grau dargestellt, ist erforderlich.

In der bisherigen Entwicklungsstufe werden stets Gitterpunkte auf Elementen interpoliert. Als Schwierigkeit hinsichtlich allgemeiner Gittertypen hat sich die Interpolation selbst gezeigt, da die Elementanordnung regellos ist. Es ist daher zunächst eine Suchaufgabe zu lösen, d.h. es muss das geeignete Element, in dem der zu interpolierende Punkt liegt, gefunden werden. Eine globale Suche, also das jeweilige Absuchen aller Elemente, scheidet aus, da eine algorithmische Komplexität (Rechenzeitverhalten in Abhängigkeit der Größe, z. B. Anzahl Gitterpunkte des Simulationsproblems) der Ordnung $O(N^2)$ mit $N =$ Gitterpunktzahl auftritt, was bei großen Simulationsrechnungen nicht hinnehmbar ist.

Um das Problem zu lösen, wurden mehrere Varianten untersucht. Hierbei zeigte sich, dass Partitionierungsalgorithmen zu sehr leistungsfähigen Koppelmethode führen, ohne dass Einschränkungen hinsichtlich der Allgemeinheit (Gitter- und Elementtyp) auftreten.

Partitionierungsalgorithmen senken das Rechenzeitverhalten deutlich ab, typischerweise von $O(N^2)$ für eine globale Suche auf dann $O(N \log N)$. Der Zielraum des Netzes auf dem ein Interpolationszugriff erfolgen soll, wird durch wiederholte Teilung

systematisch verkleinert bis in den entstehenden Partitionen nur noch eine vorgegebene, kleine Anzahl möglicher Ziel-Elemente vorhanden sind. Eine sinnvolle Elementanzahl liegt in der Größenordnung von ca. 50 Einheiten. Ein Interpolationszugriff erfolgt nun, indem den Koordinaten eines Punktes entsprechend, die Zerlegung rekursiv bis zum Erreichen der jeweiligen Elementgruppe durchlaufen wird. Als besonders effiziente Variante hat sich eine Split-Tree Suchmethode herausgestellt, die sich durch gerichtete, rekursive Bisektion auszeichnet. Die Methode ist nicht auf spezielle Gittertypen oder Bewegungsmodelle beschränkt. Im Fall der Relativbewegung, muss jedoch der betreffende, zu interpolierende Punkt in das Koordinatensystem des Zielraums transformiert werden, da der Suchbaum in diesem definiert ist.

Ist die betreffende Elementgruppe erreicht, erfolgt zunächst über kartesische Elementgrenzen ein algorithmisch effizienter Ausschluss unmöglicher Zielelemente, also derjenigen Elemente bei denen relativ schnell feststellbar ist, dass ein Treffer nicht geben sein kann.

Für die verbleibenden Elemente, üblicherweise ca. 5–10 Stück je Interpolationszugriff, erfolgt eine Zerlegung in Sub-Tetraeder, so dass auf diesen eine stückweise, lineare Interpolation durchgeführt werden kann.

Um eine im Raum stetige Lösung der Interpolationsaufgabe zu erreichen, muss diese Zerlegung eindeutig sein, d.h. die Sub-Tetraeder müssen den Raum ebenso vollständig ausfüllen wie die ihnen zugrunde liegenden Elemente selbst.

Hierzu werden Phantompunkte eingeführt, je einer in der Flächenmitte aller Vierecksflächen und ein weiterer in der Elementmitte. Abb. 5.15 zeigt dies exemplarisch für ein Prismenelement. Die Interpolation erfolgt nun in dem betreffenden Sub-Tetraeder in dem der zu interpolierende Punkt liegt.

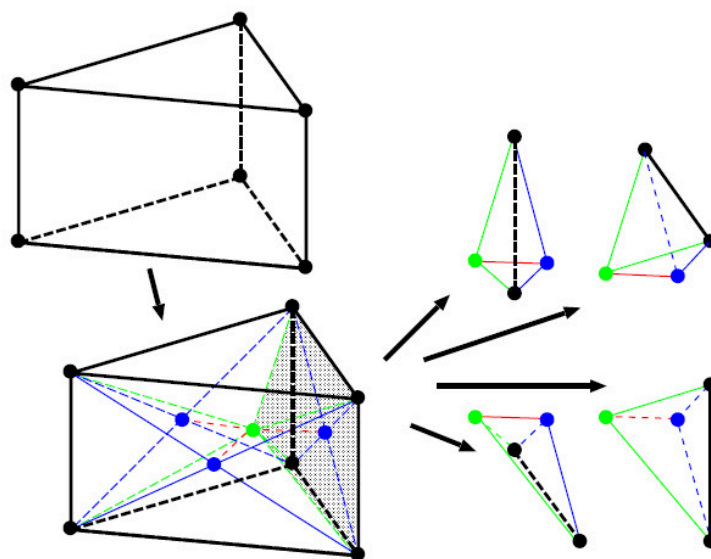


Abb. 5.15 Dissektion eines Elements in Subtetraeder am Beispiel eines Prismas. Phantompunkte auf den Vierecksflächenmitten (blau) und im Zentrum des Elements (grün). Beispielhaft dargestellt sind vier der 14 Subtetraeder des Prismenelements.

Obwohl mit dieser Methode doch einige Rechenoperationen erforderlich sind, bis schließlich die interpolierten Variablen vorliegen, ist der Rechenzeitbedarf moderat. Er liegt in der Regel im Bereich von ca. 10 % des Gesamtrechenzeitbedarfs der betreffenden Simulationen und ist aufgrund der geringen Lösungskomplexität der Ordnung nur sehr schwach, d.h. logarithmisch von der Größe des Rechenproblems abhängig. Dies stellt sicher, dass die Methode auch für zukünftige, wesentlich größere Rechenfälle geeignet sein wird. Ein Beispiel hierzu:

Werden bei einer Simulationsanwendung in der Größenordnung von 1 Mio. Gitterpunkten ca. 10 % der Rechenleistung benötigt, steigt dieser Anteil bei 100 Mio. Gitterpunkten um einen Faktor von ca. 8/6 auf entsprechend ca. 13,3 % des Gesamtrechenleistungsbedarfs. Auch bei erheblich größeren Rechenfällen in der Größenordnung von 10 Mrd. (in Worten: zehn Milliarden) Gitterpunkten, wie sie sicherlich in einigen Jahren möglich und je nach Anforderungen auch erforderlich sein werden, bleibt der Rechenzeitanteil für die Koppelmethode unter 20 % des Gesamtleistungsbedarfs.

Bewegungsmodelle:

Die hierarchische Gitterstruktur der Overset-Objekt-Methode ermöglicht die Datenerhaltung für mehrere, zunächst unabhängig vernetzte, sich gegenseitig überlappende Teilgitter. Die Positionierung eines Teilgitters A in der Hierarchieebene K wird über eine Translation und Rotation (in dieser Folge) bezüglich des betreffenden Teilgitters B der darunter liegenden Hierarchieebene K-1 dargestellt. Hierbei sei $x_{A.ref}$ ein Punkt auf der Drehachse des Teilgitters A im Koordinatensystem dieses Gitters. Nach Translation, Translationsvektor $t_{A \rightarrow B}$ und Rotation, Rotationsmatrix $R_{A \rightarrow B}$ kann ein Ortsvektor x_A des Teilgitters A im darunter liegenden Koordinatensystem von B wie folgt dargestellt werden:

$$GEO_{A \rightarrow B} : x_B = t_{A \rightarrow B} + R_{A \rightarrow B}(x_A - x_{A.ref})$$

Bei Gitteraufbauten, die aus mehreren relativ zueinander bewegten Systemen bestehen, können durch rekursive Transformation die Koordinaten jedes Punktes im untersten, stets inerten, kartesischen Koordinatensystem bestimmt werden.

Eine Netzbewegung ist grundsätzlich als zeitliche Ableitung seiner Positionierung zu verstehen. Unveränderlich sind hierbei alle x_A und $x_{A.ref}$, da nur in sich starre Teilgitter verwendet werden:

$$\dot{x}_B = \dot{t}_{A \rightarrow B} + \dot{R}_{A \rightarrow B}(x_A - x_{A.ref})$$

\dot{x}_B ist somit als relative, örtliche Netzgeschwindigkeit des Teilgitters A im Koordinatensystem des darunter liegenden Teilgitters B zu verstehen.

Mit dieser zunächst völlig allgemeinen Beschreibung lassen sich die unterschiedlichsten Bewegungsformen darstellen, die je nach Problemstellung sehr unterschiedlich sein können. Jedes Objekt besitzt zunächst sechs Freiheitsgrade, je drei für Positionierung und Ausrichtung bezüglich eines Referenzsystems. Nicht jede Bewegung schöpft jedoch den vollen Umfang aus. Spezialfälle sind beispielsweise lineare Bewegungen mit konstanter Ausrichtung oder Drehbewegungen um vorgegebene Achsen.

Die Steuerung der entsprechenden Bewegungen ist nun Aufgabe der Bewegungsmodelle. Zunächst ist zwischen vorgegebenen und lösungsabhängigen Bewegungen zu unterscheiden. Vorgegebene Bewegungen unterscheiden sich weiterhin über die Art der Vorgabe. Möglich sind konstante Bewegungen, als Funktionen über der Zeit dargestellte oder tabellarisch abgelegte Bewegungsvorschriften. Lösungsabhängige Bewegungen unterscheiden sich ferner in der Art der Kopplung zwischen Kraftwirkung und Dynamik. Abb. 5.16 zeigt die Vererbungsfolge der Bewegungsmodelle.

Bewegungsmodelle

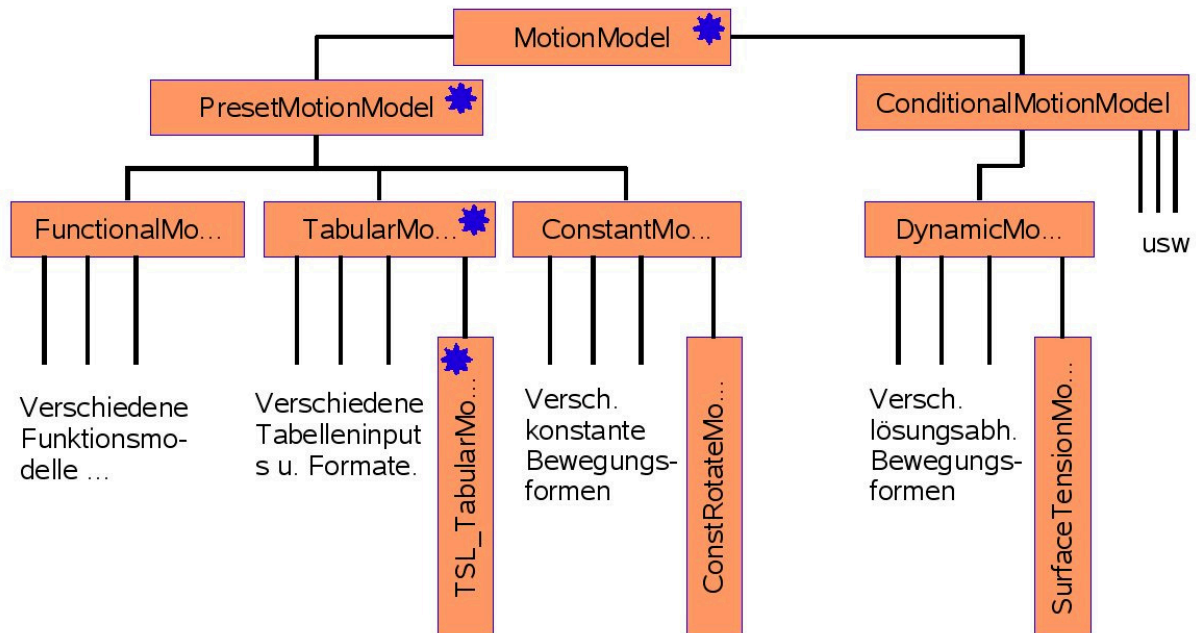


Abb. 5.16 Vererbungsfolge möglicher Bewegungsmodelle.

Die mit blauem Stern gekennzeichnete Folge entspricht der in den Beispielen verwendeten. TSL_TabularMotionModel steht hierbei für time-speed-linear, also für eine Tabellierung der linearen Bewegungsgeschwindigkeit über der Zeit. Alle weiteren

Bewegungsmodelle sind hier nur konzeptionell dargestellt und müssen nach Bedarf entwickelt und implementiert werden.

Simulationsrechnungen im relativ bewegten System:

Alle vektoriellen Größen werden grundsätzlich in den Koordinaten des Inertsystems dargestellt. Dies bedeutet nicht, dass auch die Strömungsvariablen, vor allem die Geschwindigkeitsvektoren der Simulation den aus Sicht eines Beobachters im Inertsystem wahrgenommenen entsprechen müssen. Es bestehen vielmehr zwei Optionen, eine Berechnung auf relativ bewegten Gittern durchzuführen. Diese sind:

Simulation im Inertsystem: Die Geschwindigkeitsvektoren sind relativ zum Inertsystem definiert (wahre Geschwindigkeiten). Diese entsprechen der Wahrnehmung eines Beobachters im Inertsystem. Es treten in der Diskretisierung der Gleichungen zusätzliche Flussterme aufgrund der Netzbewegung auf. Randbedingungen auf Köperrädern müssen gemäß der Bewegungsgeschwindigkeit der Oberflächen transformiert werden. Eine Transformation der Geschwindigkeiten bei der Datenübertragung zwischen relativ bewegten Teilgittern entfällt. Ebenso entfällt eine Verdrehung der Geschwindigkeitsvektoren bei der Umpositionierung bewegter Gitter.

Simulation im Relativsystem: Die Geschwindigkeitsvektoren sind relativ zum bewegten System definiert. Dies entspricht der Wahrnehmung eines Beobachters im relativ bewegten System. Es treten keine zusätzlichen Flussterme in der Diskretisierung auf. Stattdessen treten bei der Herleitung zusätzliche Beschleunigungsterme (Zentrifugal- und Corioliskräfte, nur bei Rotationsanteilen) in Form von Impulsquellen auf. Die Randbedingungen entsprechen denen im nicht rotierenden System. Eine Transformation der Geschwindigkeiten bei der Datenübertragung zwischen relativ bewegten Teilgittern ist erforderlich. Ebenso sind bei der Umpositionierung bewegter Gitter die Geschwindigkeitsvektoren der Lösung entsprechend der Rotationsanteile mitzudrehen.

Um die Prämisse zu erfüllen, die zuvor bestehenden Methoden in MOUSE möglichst unverändert weiter nutzen zu können, empfiehlt sich die Simulation im Relativsystem. Insbesondere stellen sich in dieser Variante alle Randbedingungen unverändert dar.

5.6 Anwendung der entwickelten Methoden

5.6.1 Überholvorgang zweier Schiffe (Seeschiff-Seeschiff)

Als Überholvorgang wird das in Kapitel 4.3.1.1 beschriebene Beispiel betrachtet. Dort wird ein Schiff von einem größeren Schiff mit deutlich höherer Geschwindigkeit überholt. Dieses Beispiel zeigte sich als sehr geeignet, da hier sowohl Ergebnisse numerischer Simulationen, als auch experimentelle Untersuchungen vorlagen.

Die Berechnungen mit den hier auf Basis des Programmpakets MOUSE entwickelten Methoden erfolgten in drei Stufen und sollen mit experimentellen Ergebnissen soweit wie möglich verglichen werden:

1. Quasistationäre Simulation des Überholvorgangs mit gleichen Geschwindigkeiten.
2. Quasistationäre Simulation mit transformierten Geschwindigkeiten.
3. Vollständig instationäre Simulation.

Zu Stufe 1. und 3. liegen je experimentelle Ergebnisse vor. Stufe 2. ist experimentell nicht durchführbar. Es soll sich aber zeigen, ob eine quasistationäre Simulation mit transformierten Geschwindigkeiten eine akzeptable Näherung des instationären Vorgangs darstellt.

Alle Simulationen, auch die quasistationären Fälle, wurden mittels Overset-Methode berechnet. Zur Anwendung der Overset-Methode wurden drei zunächst unabhängige Netze erzeugt. Schiff A und Schiff B sind jeweils durch ein Berechnungsgitter dargestellt, welches mit ICEM generiert wurde. Diese Gitter können nun statisch bzw. beweglich in ein Hintergrundgitter eingesetzt werden, Abb. 5.17. Im vorliegenden Fall wird einkartesisches Hintergrundgitter verwendet, das in Anbetracht der rechteckigen Versuchstankgeometrie besonders geeignet ist.

Die Verwendung der Overset-Methode in den quasistationären Fällen hat gegenüber den ebenfalls möglichen Berechnungen auf Einzelgittern den Vorteil, dass die vorab einmalig generierten Gitter für alle Positionen in gleicher Weise genutzt werden können. Es ist lediglich eine entsprechende Positionierung der Schiffsgitter auf dem Hintergrundgitter erforderlich. Eine aufwendige, individuelle Netzgenerierung für jede einzelne Position kann somit entfallen.

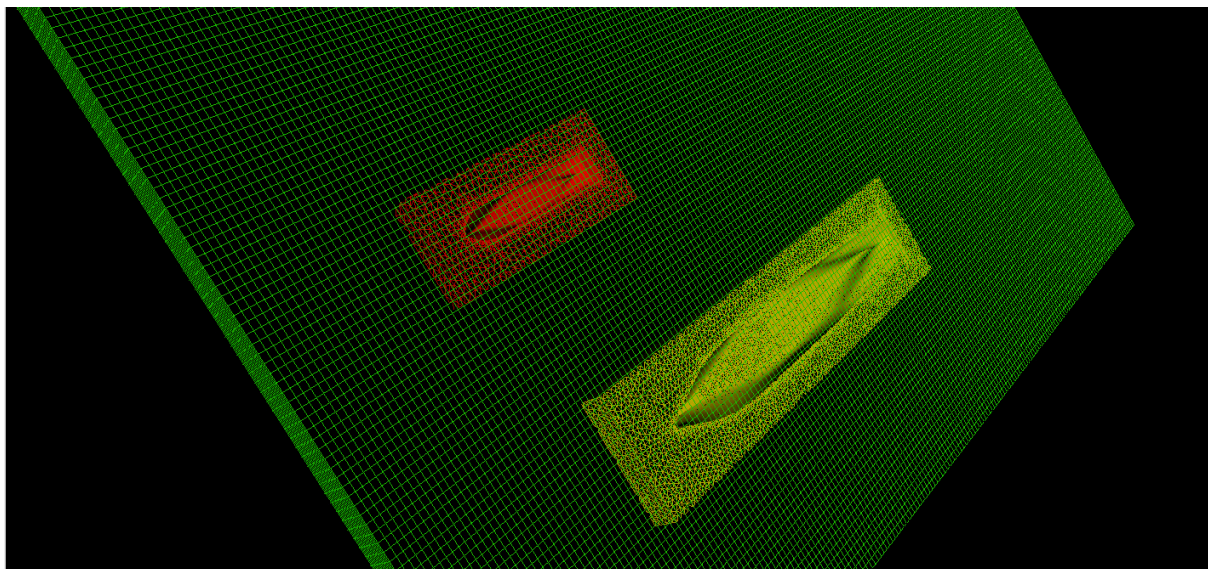


Abb. 5.17 Drei Gitter bilden das Berechnungsgebiet

Im Gegensatz zu den Berechnungen in Kapitel 4 wurde hier eine Levelset-Methode verwendet um die Verformung der Oberfläche zu berücksichtigen. Diese Levelset-

Methode wurde mit einem Strömungslöser gekoppelt der auf dem Prinzip der künstlichen Kompressibilität beruht.

Aufgrund der großen Reynoldszahlen sind die Anteile der viskosen Kräfte klein und wurden hier nicht berücksichtigt. Durch Vernachlässigung der Viskosität und dem kompakten Strömungslöser konnten diese Rechnungen in akzeptabler Zeit auf einer CPU durchgeführt werden.

5.6.1.1 Simulation des Überholvorgangs in quasistationärer Betrachtung und Vergleich mit experimentellen Ergebnissen

Zu den fünf gegebenen Längsversatz Positionen wurden stationäre Berechnungen durchgeführt. Beide Schiffe haben eine Geschwindigkeit von 15 kn. In Abb. 5.18 ist der Bodendruck zu den unterschiedlichen Längsversatz Positionen dargestellt. Die Schiffe fahren von rechts nach links und die Blickrichtung ist von oben auf die Schiffe gerichtet.

Bei den Positionen $-0,2L$, Beginn des Überholvorganges, und der Position $0,8L$, Ende des Überholvorganges, ist das Bodendruckfeld des kleineren Schiffes noch kaum durch das überholende Schiff beeinflusst. Bei den Positionen $0,0L$ und $0,6L$ findet schon eine verstärkte Interaktion zwischen beiden Schiffen statt und bei der Position $0,3L$ hat eine völlige Verschmelzung der Druckfelder stattgefunden.

In Abb. 5.19 ist die Auslenkung der freien Oberfläche bezogen auf die ungestörte Wasserlinie dargestellt. Wiederum ist die Interaktion beider Schiffe gut zu erkennen. Insbesondere findet eine deutliche Verstärkung der Oberflächenabsenkung zwischen den Schiffen statt, wodurch eine hohe anziehende Seitenkraft insbesondere auf das kleinere Schiff ausgeübt wird.

In diesen Bildern ist eine Besonderheit der Overset-Methode erkennbar. So scheint es, als seien die Schiffe mit Wasser gefüllt. Dies ist natürlich nicht der Fall. Vielmehr existiert im Inneren der Schiffe weiterhin das unveränderte Hintergrundgitter, in das die schiffsfesten Gitter mittels Overset-Methode eingesetzt wurden. Aufgrund der höheren Priorität der Lösung auf den Schiffsgittern und der Tatsache, dass die Oberflächenrandbedingung an den Schiffskörpern auf diesen Gittern berücksichtigt wird, ist die in den Bildern dargestellte Lösung im Inneren der Schiffe ohne jeglichen Belang und somit lediglich als kosmetischer Fehler aufzufassen. Eine Korrektur dieser Darstellung (Option in der Plotmethode) konnte bis zum Zeitpunkt der Drucklegung noch nicht abschließend implementiert werden. Es sei aber nochmals deutlich darauf hingewiesen, dass sich in den Schiffen nur „virtuelles“ Wasser befindet, dieser Teil der Lösung also keinerlei Rückwirkung auf die Simulation der Umströmung hat.

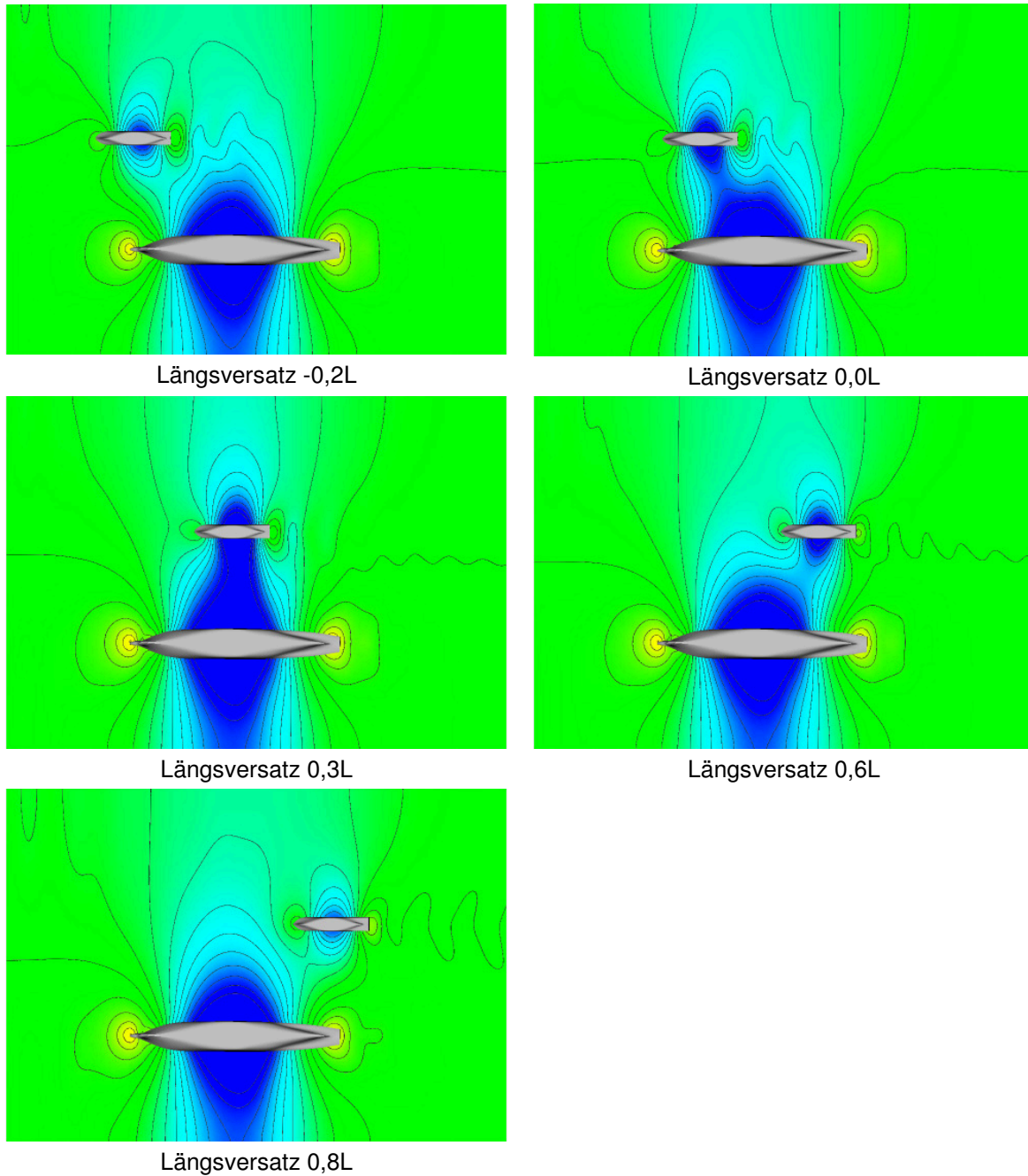


Abb. 5.18 Bodendruckfeld bei verschiedenen Längsversätzen

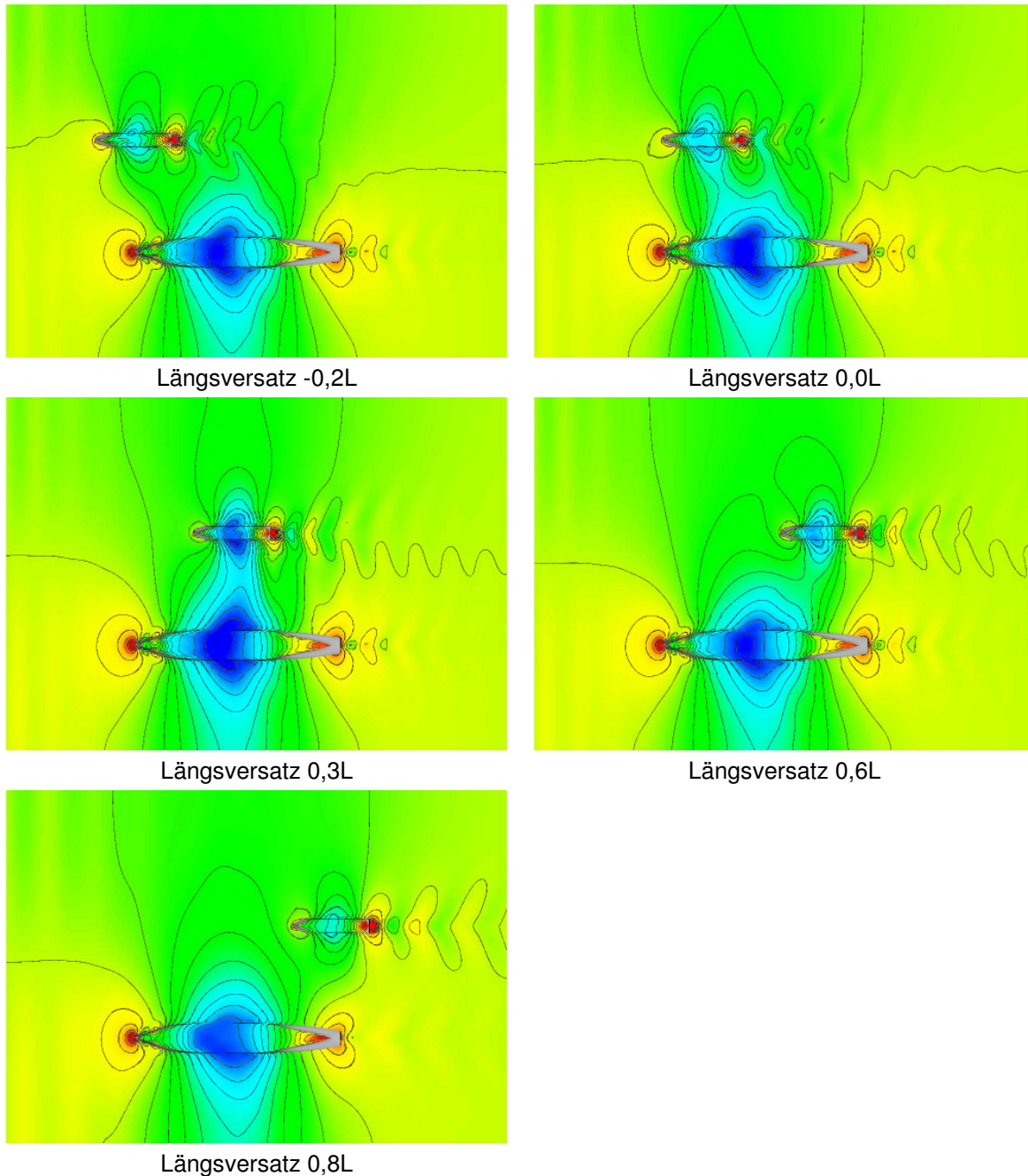


Abb. 5.19 Oberflächenauslenkung bei verschiedenen Längsversätzen

Anhand obiger Rechenergebnisse wurde festgestellt, dass die in der Simulation ermittelten Kräfte deutlich kleiner waren, als dies in den ebenfalls quasistationären Experimenten gemessen wurde. Ein wesentlicher Unterschied hierbei war, dass sich die Schwimmlage (Höhe und Nickwinkel) der Schiffe in den Experimenten frei einstellen konnte. Die Simulationen waren jedoch mit starren Positionen, die der jeweiligen Ruhe-Schwimmlage entsprachen, ausgeführt. Beobachtet man nun, dass durch Interaktion eine deutliche Absenkung der Oberflächen, vor allem zwischen den Schiffen auftritt, legt dies den Schluss nahe, dass die zu suchenden Abweichungen in der fehlenden Berücksichtigung der Absenkung der Schiffe selbst zu suchen sind.

In einer weiteren Sequenz wurden daher die Simulationen wiederholt, wobei diesmal die jeweiligen Absenkungen des kleineren Seeschiffes aus den Versuchsdaten übernommen und somit in guter Näherung berücksichtigt wurden:

Längsversatz	-0,2L	0,0L	0,3L	0,6L	0,8L
Absenkung [mm]	19,69	28,99	36,31	31,24	21,8

In Abb. 5.20 ist der Vergleich zwischen den experimentellen Daten und den numerischen Rechnungen mit und ohne Berücksichtigung der Absenkung dargestellt. Die in der Legende angegebenen Symbole beziehen sich je auf die Simulation ohne Berücksichtigung der Absenkung (15kn 15kn), die Simulation mit Absenkung (15kn 15kn Absenkung) und das Experiment (15kn 15kn Exp). Es zeigt sich bei den Simulationen mit Absenkung eine sichtbar bessere Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen. Dies vor allem für Längskräfte und Giermomente.

Bezüglich der Seitenkraft besteht noch ein nicht unerheblicher Unterschied bei kleinen Werten von L , also zu Beginn des Überholvorgangs. In dieser Phase ermittelt das Experiment im Vergleich zu beiden Simulationsläufen eine etwa doppelt so hohe abstoßende Seitenkraft. Dieser Effekt ist Gegenstand einer noch offenen Diskussion, insbesondere da Längskräfte und Giermomente gut übereinstimmen. Interessant ist daher, dass die hohe Abweichung in einem Bereich hohen Giermoments auftritt. Dies legt den Verdacht nahe, dass die Elastizität der Modellaufhängung des kleinen Schiffs im Experiment zu einem geringen Gierwinkel führte, der seinerseits einen zusätzlichen, abstoßenden Seitenauftrieb zur Folge gehabt hätte. Der Verdacht kann allerdings noch nicht abschließend erhärtet werden. Es sollen jedoch weitere Untersuchungen, vor allem Simulationen mit geringen Schrägstellungen des kleineren Schiffs angestellt werden, deren Ergebnisse ggf. in die mechanische Auslegung der Modellaufhängungen für zukünftige Versuche einfließen soll.

5.6.1.2 Instationäre Simulation des Überholvorganges zweier Seeschiffe und Vergleich mit dem Experiment

Berechnet wird ein instationärer Überholvorgang der beiden Schiffe aus dem vorherigen Abschnitt. Das große Seeschiff fährt mit 15 kn und überholt das kleinere Seeschiff, welches mit 11 kn fährt. Für diese Simulation wurden die beiden Netze der Schiffe in ein neues Hintergrundgitter eingesetzt. Dieses Hintergrundgitter hat die gleiche Auflösung wie das Hintergrundgitter aus dem vorhergehenden Abschnitt, die Ausdehnung in Längsrichtung ist jedoch größer, um den Überholvorgang darstellen zu können.

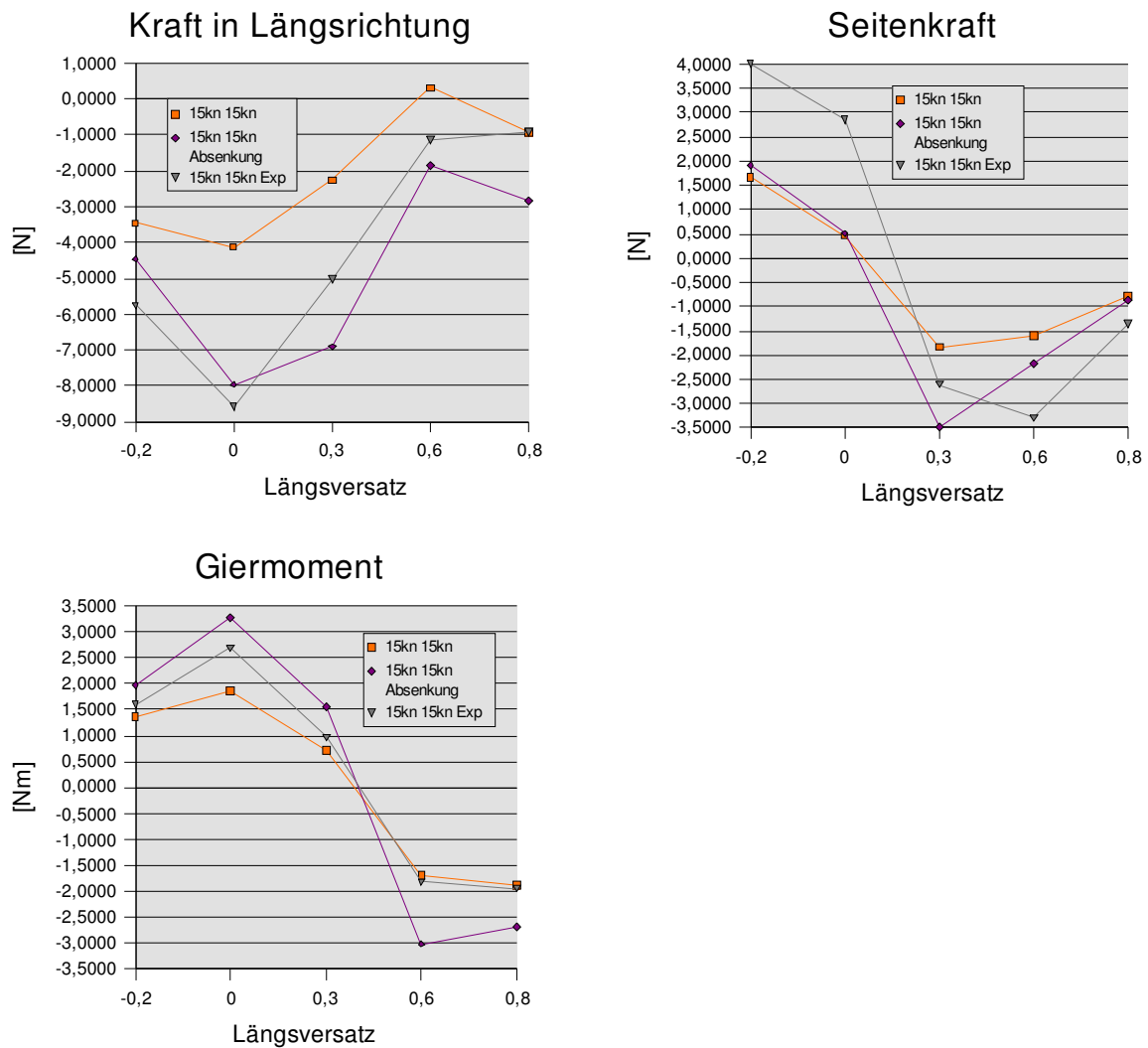


Abb. 5.20 Berechnete und gemessene Längs- und Seitenkräfte und Giermomente

Als Anfangsbedingung wird eine quasistationäre Lösung mit transformierter Geschwindigkeit wie in Abschnitt 4.4.1 bestimmt, Abb. 5.21. Der vollständig instationäre Überholvorgang kann nun unmittelbar aus dieser Lösung heraus gestartet werden, ohne dass eine weitere Beschleunigungsphase des schnelleren, großen Schiffes erforderlich ist.

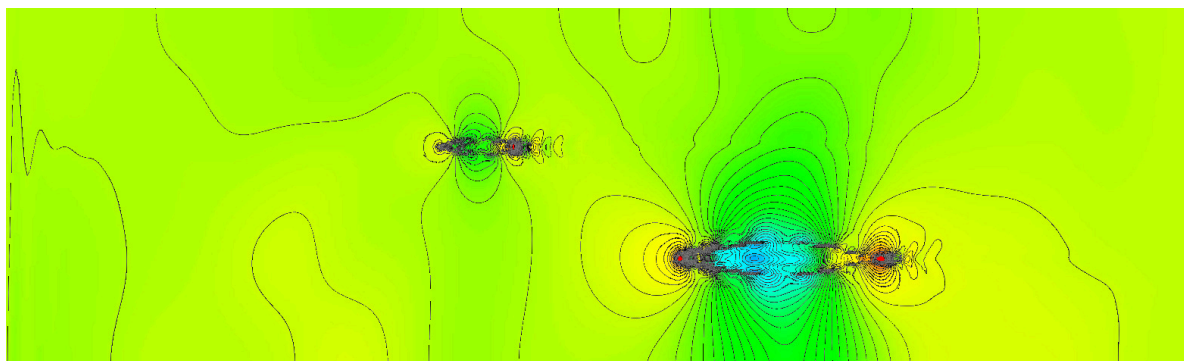


Abb. 5.21 Startlösung für den Überholvorgang Längsposition -1,25L

In Abb. 5.22 bis Abb. 5.30 wird zu den unterschiedlichen Längsversatz-Positionen (definiert wie in Abb. 4.1) die Verformung der Oberfläche dargestellt. Aus den Bildern geht sehr gut die gegenseitige Beeinflussung hervor. Vor und nach dem Überholvorgang hat jedes Schiff sein eigenes Primärwellensystem, welches sich bei der Position $0,3L$ zu einem vereinen. Im Laufe des Überholvorganges wird das Sekundärwellensystem des überholten Schiffes sehr stark gestört und bildet sich nach dem Überholvorgang wieder aus.

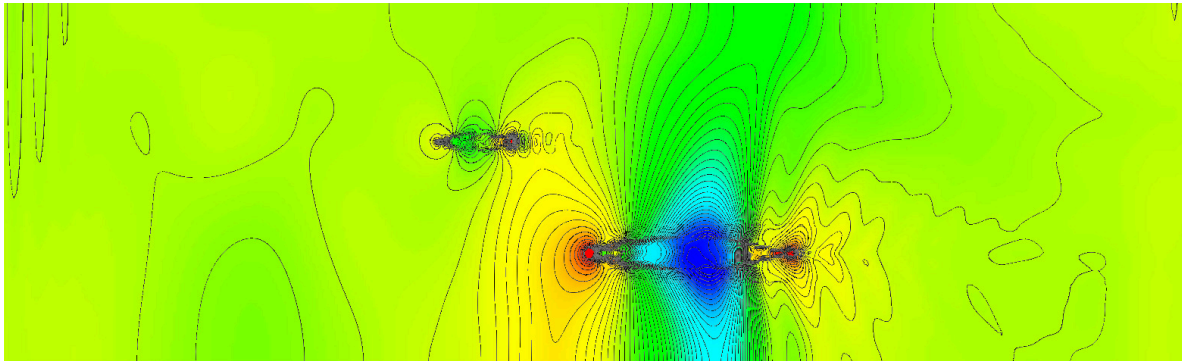


Abb. 5.22 Längsversatz $-0,8L$

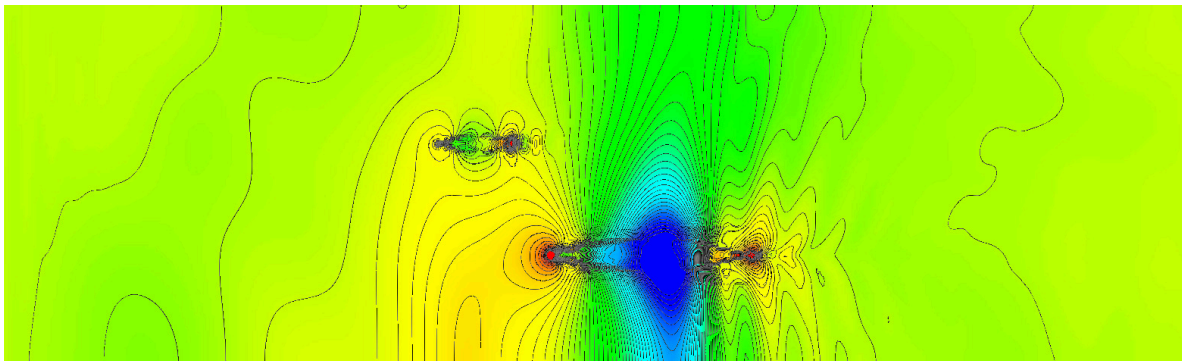


Abb. 5.23 Längsversatz $-0,6L$

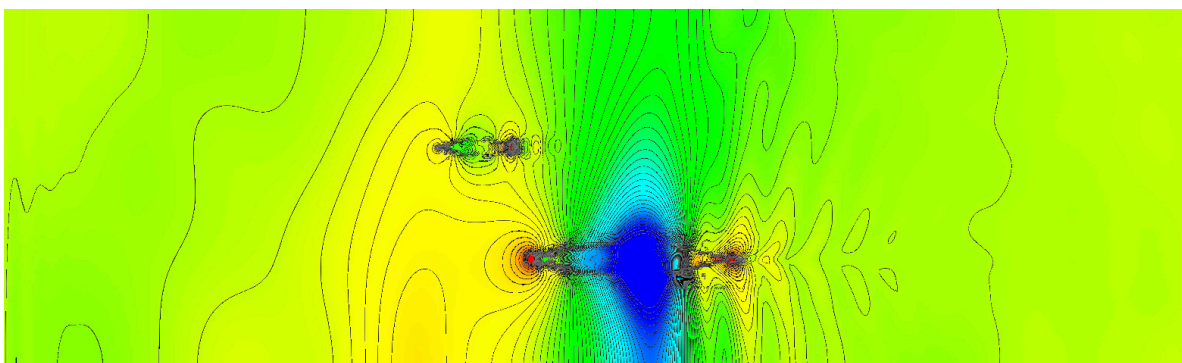


Abb. 5.24 Längsversatz $-0,4L$

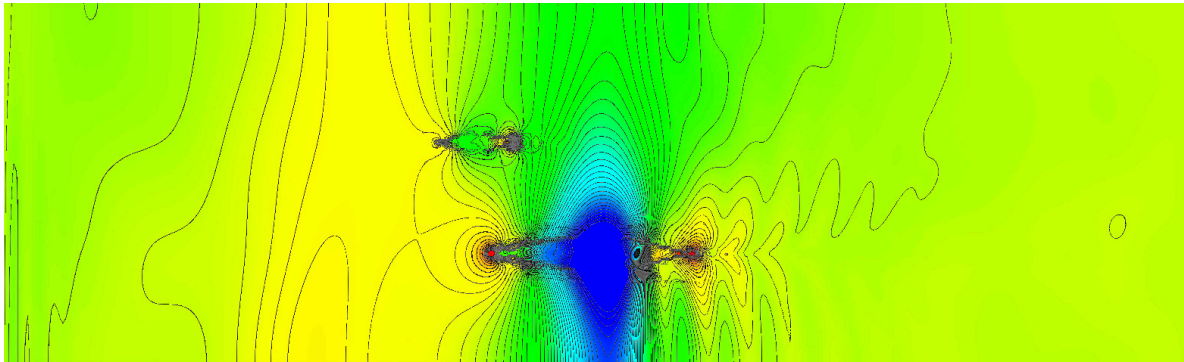


Abb. 5.25 Längsversatz $-0,2L$

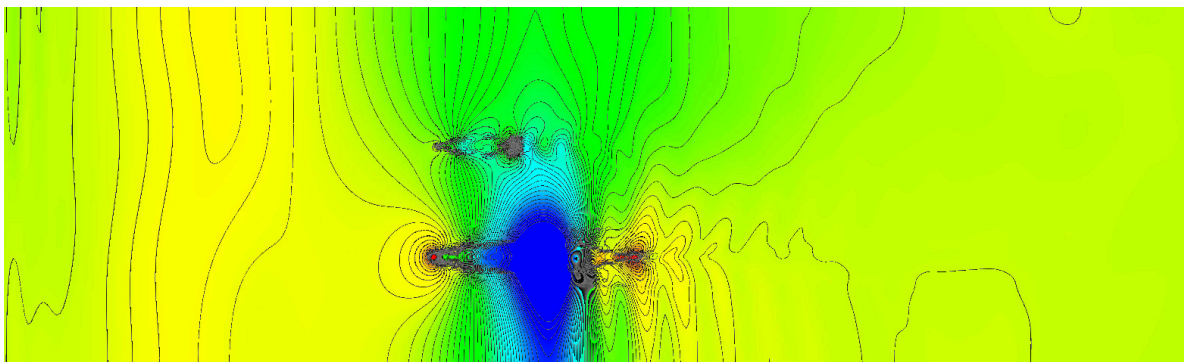


Abb. 5.26 Längsversatz $0,0L$

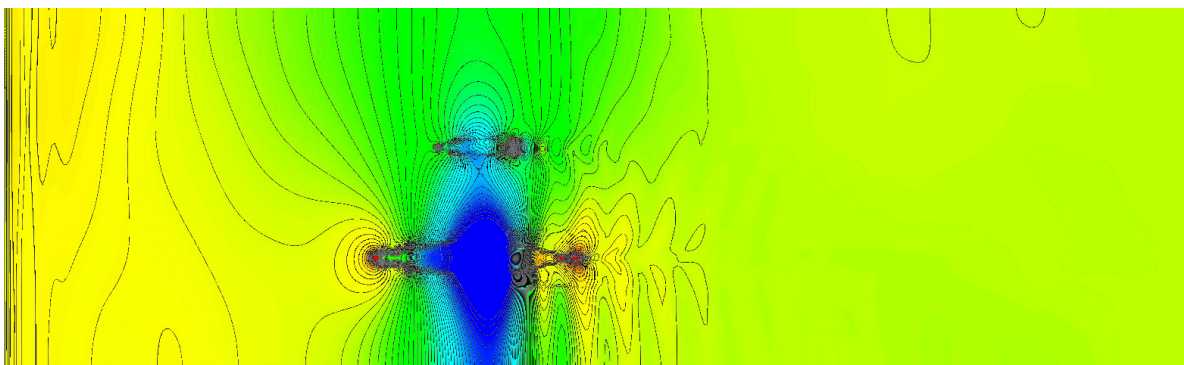


Abb. 5.27 Längsversatz $0,3L$

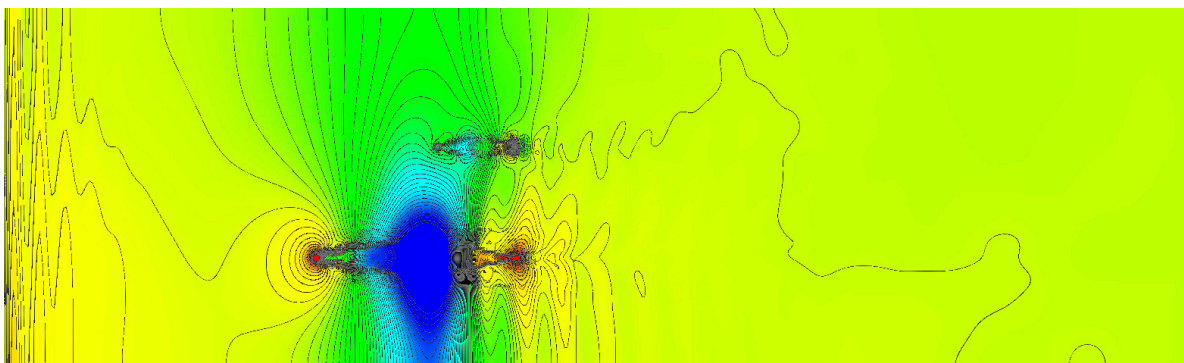


Abb. 5.28 Längsversatz $0,6L$

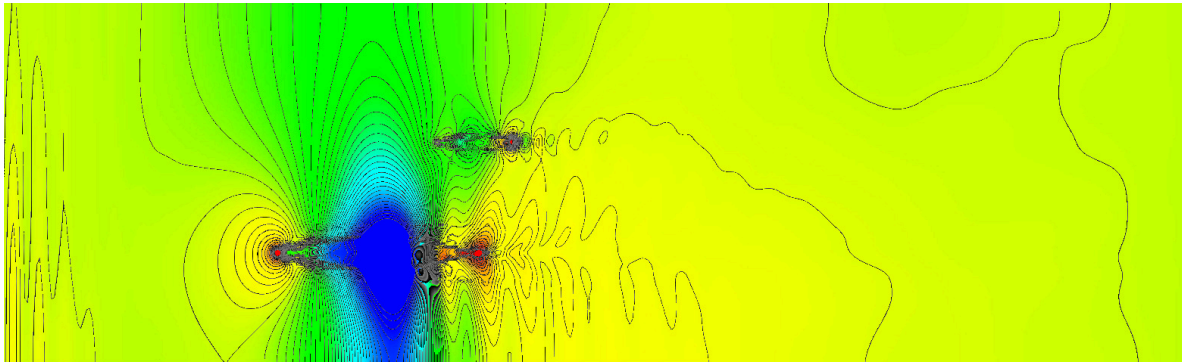


Abb. 5.29 Längsversatz 0,8L

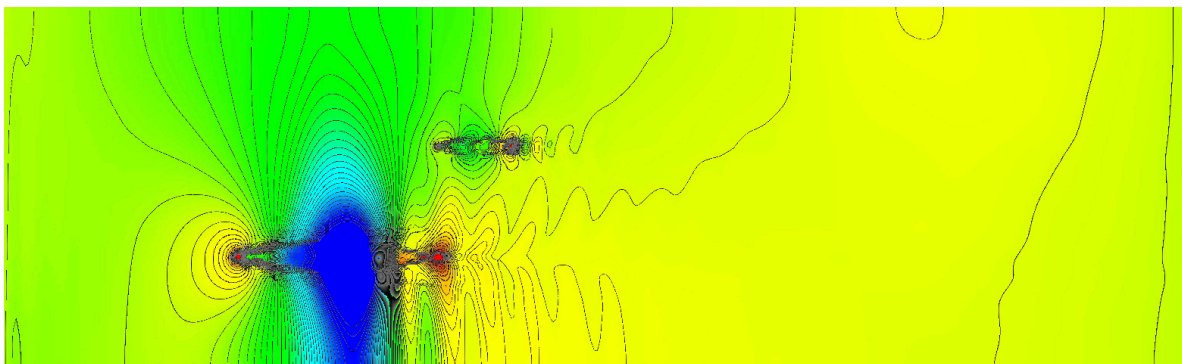


Abb. 5.30 Längsversatz 1,0L

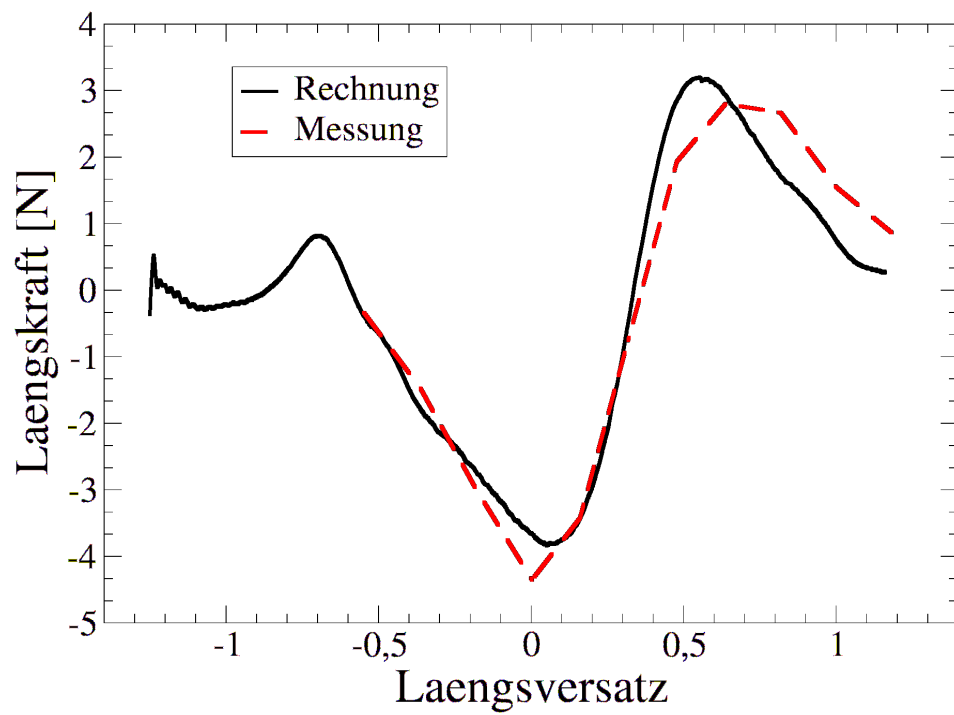


Abb. 5.31 Kraft in Längsrichtung

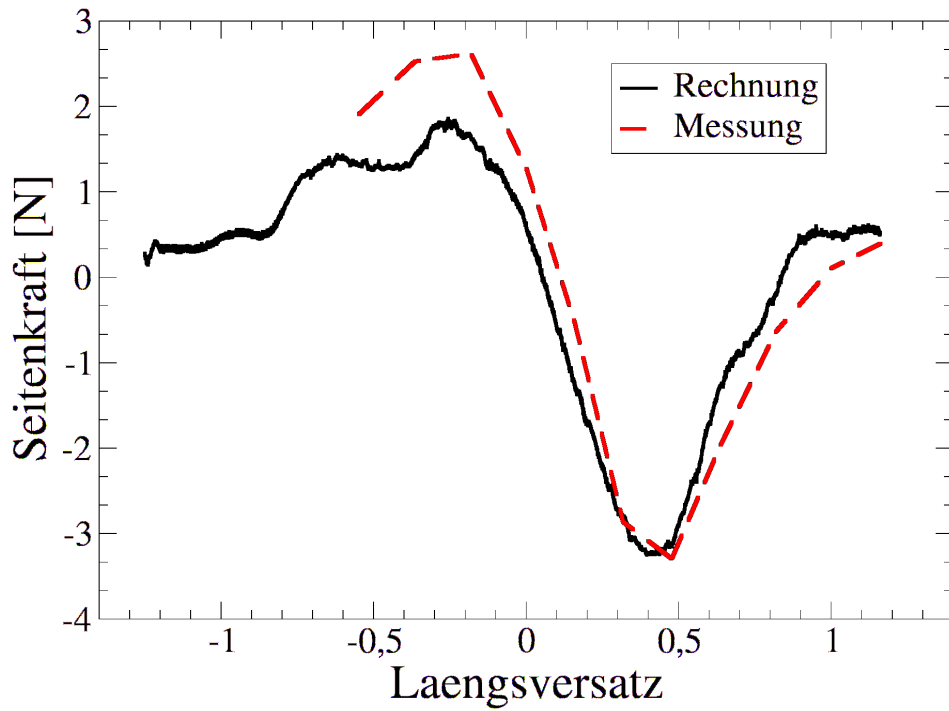


Abb. 5.32 Seitenkraft

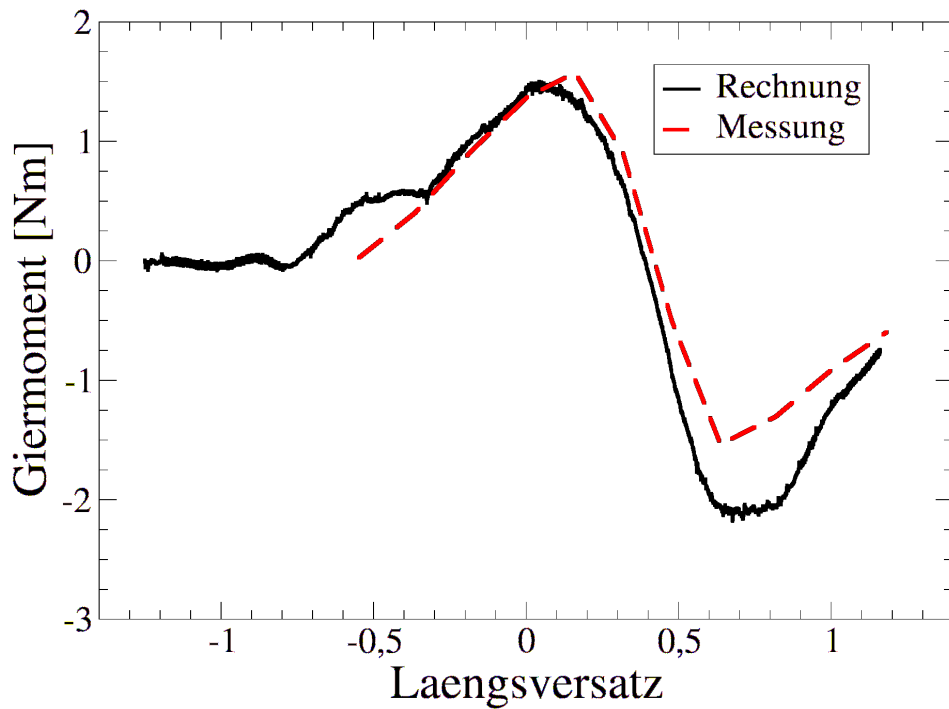


Abb. 5.33 Giermoment

Wie aus Abb. 5.31 bis Abb. 5.33 zu ersehen ist, wird der Verlauf der Längskräfte, der Seitenkräfte und der Verlauf des Giermomentes sehr gut wiedergegeben. Hier wäre

es nun interessant zu wissen, wie sich Absenkung und Vertrimmung in Abhängigkeit des großen Schiffes auf das kleine Schiff im zeitlichen Verlauf auswirken.

Obige Rechnung stellt den Stand der derzeit seitens der Autoren möglichen Simulationstechnik dar. Die unerwartet gute Übereinstimmung der instationären Simulation mit den experimentellen Ergebnissen bestätigt die Entwicklungsansätze und rechtfertigt den hiermit verbundenen, hohen algorithmischen und numerischen Entwicklungsaufwand. Da die Methode noch nicht auf Parallelrechnern einsatzfähig war, musste auf eine große Skalarmaschine zurückgegriffen werden. Die Rechenzeit auf einem Prozessor aktueller Architektur für obigen Fall belief sich auf knapp 3 Wochen bei einem Speicherbedarf von knapp 2 GB. Die guten Ergebnisse bei leider unhandlich langer Rechenzeit rechtfertigen nach Ansicht der Autoren die Fortsetzung der Bemühungen zur Parallelisierung der Overset-Methoden, die in Kürze abgeschlossen sein sollten. Auf der aktuellen Rechenanlage des DST werden Laufzeiten von ca. 1 Stunde für vergleichbare Simulationen im Parallelbetrieb angestrebt.

5.6.2 Simulation der Begegnung zweier Seeschiffe

Für den Fall sich begegnender Schiffe wurde ebenfalls wieder auf die Schiffstypen aus den vorherigen Beispielen zurückgegriffen. Das betrachtete Simulationsgebiet entspricht einem Wasserbecken von 10,594 Schiffslängen des großen Seeschiffes. Es wird nicht durchströmt und befindet sich zu Beginn der Simulation in Ruhe. Der Abstand zwischen den beiden Bugs beträgt 8,5 Schiffslängen des großen Schiffs. Die Schiffe fahren beide mit einer Geschwindigkeit von 15 kn auf einer vorgegebenen Trajektorie in einem Abstand von 150 m aneinander vorbei. Beide Schiffe starten aus der Ruhe heraus schlagartig mit ihrer jeweiligen Fahrgeschwindigkeit (impulsive start). Dies bedeutet, dass einige Zeit benötigt wird, bis sich ein charakteristisches Wellenbild um die beiden Schiffe ausgebildet hat. Die Berechnung ist ansonsten völlig vergleichbar mit der obigen Simulation des Überholvorgangs.

In Abb. 5.34 bis Abb. 5.48 ist eine Sequenz der Simulation der Begegnung dargestellt. Sie reicht vom Beginn der Schiffsbewegung, über die Ausbildung der Schiffsumströmung, bis zur Begegnung und Vorbeifahrt der beiden Schiffe. Der Vergleich mit dem Experiment gestaltet sich als sehr schwierig, da das betrachtete Rechengebiet wesentlich kleiner ist als der Versuchstank. Im Versuch wird langsam beschleunigt, um die entstehende Anfahrwelle so gering wie möglich zu halten. Aus diesem Grund werden die berechneten Ergebnisse lediglich auf Plausibilität untersucht. Abb. 5.34 bis Abb. 5.39 entsprechen der Startphase bis zur Ausbildung eines charakteristischen Wellenbildes. Das Schiff mit den größeren Abmessungen benötigt im Vergleich zum kleineren eine wesentlich längere Anlaufstrecke zur Strömungsausbildung, als das kleinere Schiff. Des Weiteren ist ersichtlich, wie sich eine Anfahrwelle im Bugbereich des großen Schiffs ausbildet, löst und sich anschließend annähernd mit der charakteristischen Wellenausbreitungsgeschwindigkeit im flachen Wasser bewegt, Tabelle 5.1. In Abb. 5.49 sind die Widerstandskraft und die Seitenkraft des

kleineren Schiffes in dimensionslosen Größen über der dimensionslosen Zeit dargestellt. Aus dieser Abbildung ist ersichtlich, wie die Anfahrwelle des entgegenkommenden, großen Schiffs zunächst eine deutliche Widerstandserhöhung hervorruft. Dieses Ergebnis ist durch die Anfahrssituation bestimmt und korreliert somit nicht mit den zu erwartenden Kräften bei realen Begegnungsfahrten. Der Zeitpunkt der maximalen Längskraft entspricht etwa dem in Abb. 5.40. Es schließt sich die Begegnung der Schiffe an, die vor allem durch hohe Seitenkräfte gekennzeichnet ist, Abb. 5.44 und Abb. 5.46. Eine Besonderheit kann in Abb. 5.45 beobachtet werden. Zu diesem Zeitpunkt fährt das kleine Schiff in das Wellental des großen ein. Dies hat eine entsprechend große Druckdifferenz zwischen Bug und Heck zur Folge und führt somit kurzfristig zu einem negativen Widerstand. Dieser Effekt kann je nach Fall auch experimentell beobachtet werden.

Tabelle 5.1: Ausbreitungsgeschwindigkeit der Anfahrwelle als Differenz des zurückgelegten Weges zwischen den angegebenen Abbildungen und der vergangenen Zeit

Abbildungen	5.37 und 5.39	5.39 und 5.41	5.41 und 5.43	5.43 und 5.48
	0,93	0,97	0,85	0,85



Abb. 5.34 $t=0.064191$ nach 500 Zeitschritten



Abb. 5.35 $t=0.639506$ nach 5000 Zeitschritten



Abb. 5.36 $t=1.35714$ nach 10000 Zeitschritten

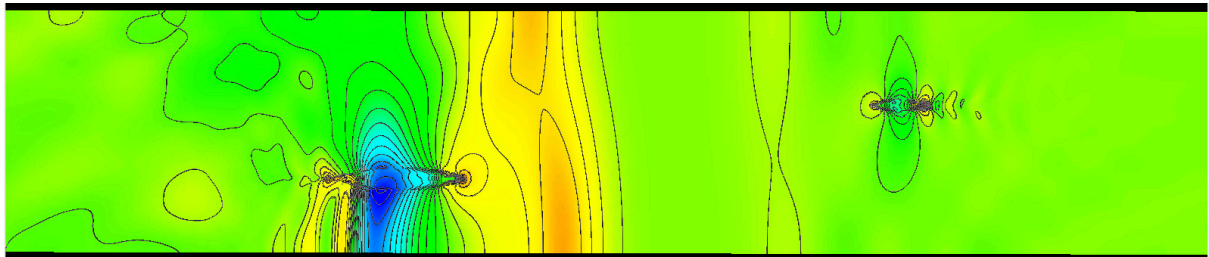


Abb. 5.37 $t = 2.66153$ nach 15000 Zeitschritten

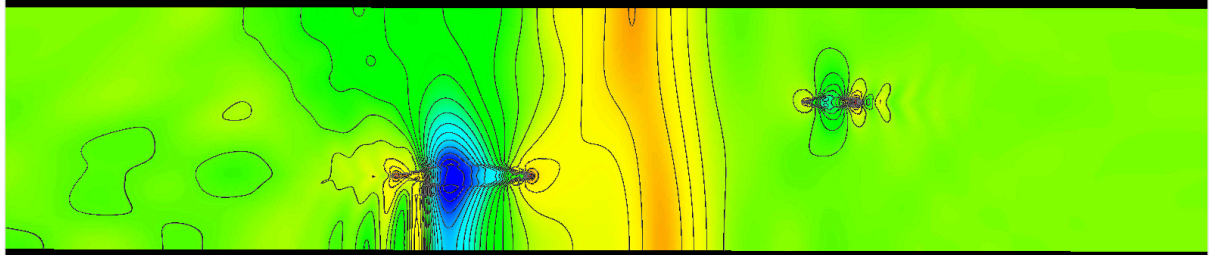


Abb. 5.38 $t = 3.1832$ nach 17000 Zeitschritten

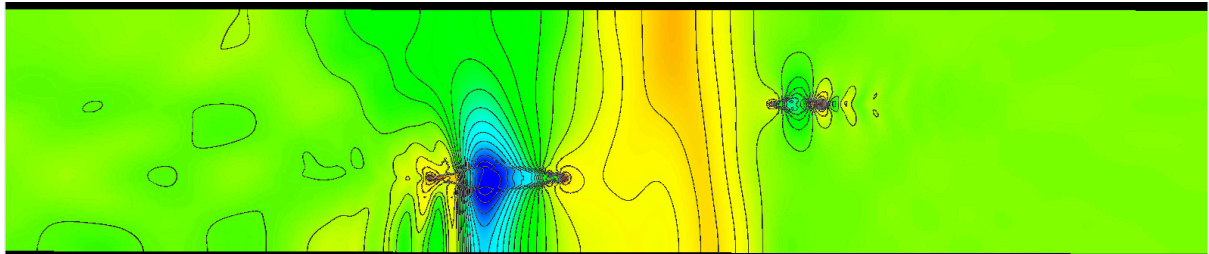


Abb. 5.39 $t = 3.4445$ nach 18000 Zeitschritten

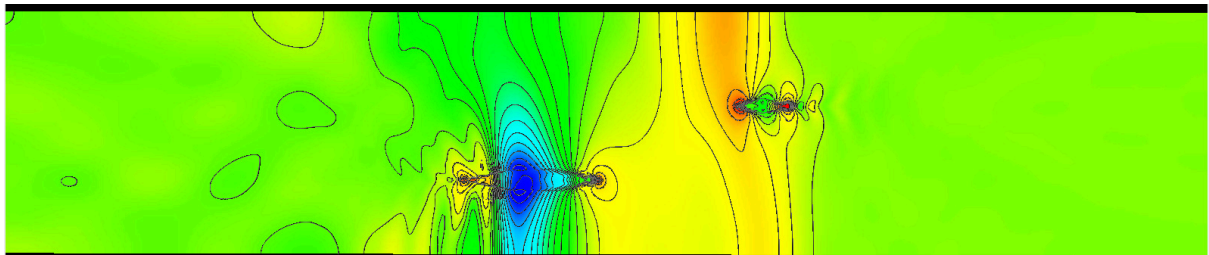


Abb. 5.40 $t = 3.70309$ nach 19000 Zeitschritten

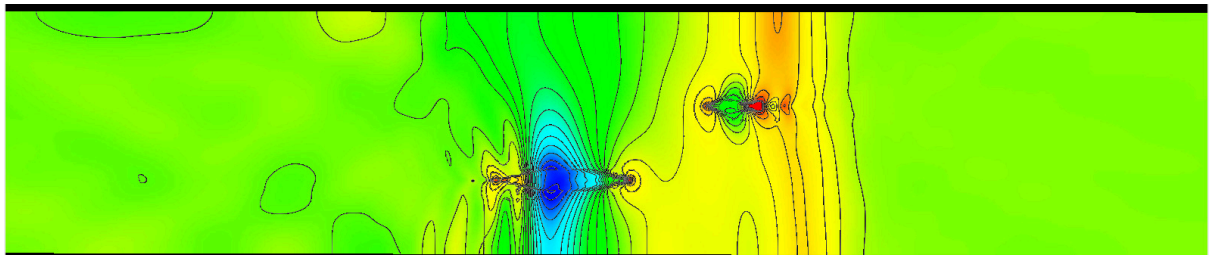


Abb. 5.41 $t = 3.94484$ nach 20000 Zeitschritten

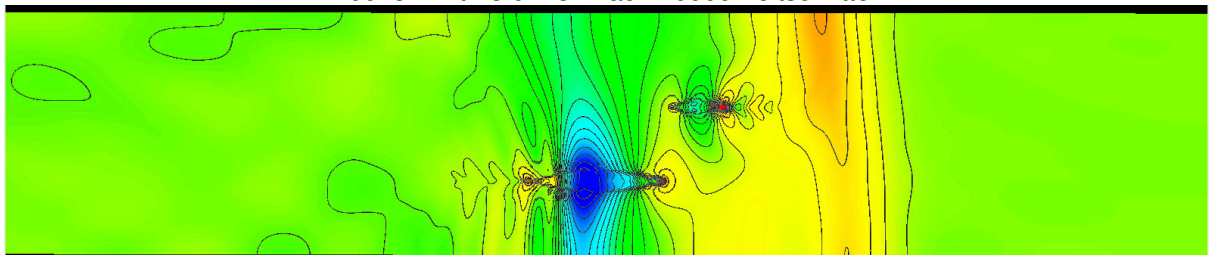


Abb. 5.42 $t = 4.19635$ nach 21000 Zeitschritten

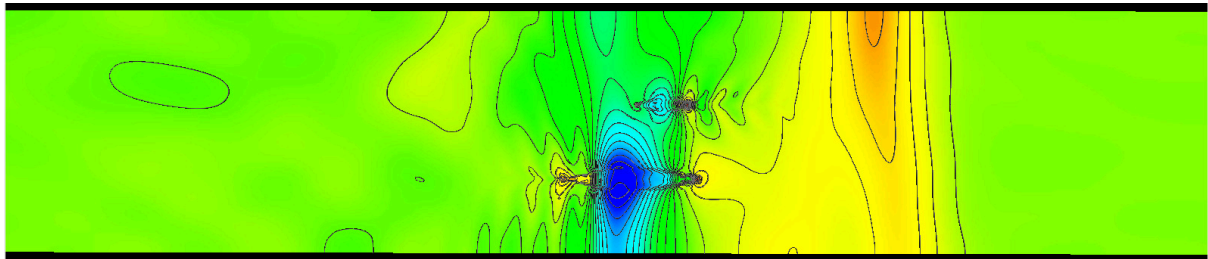


Abb. 5.43 $t=4.46096$ nach 22000 Zeitschritten

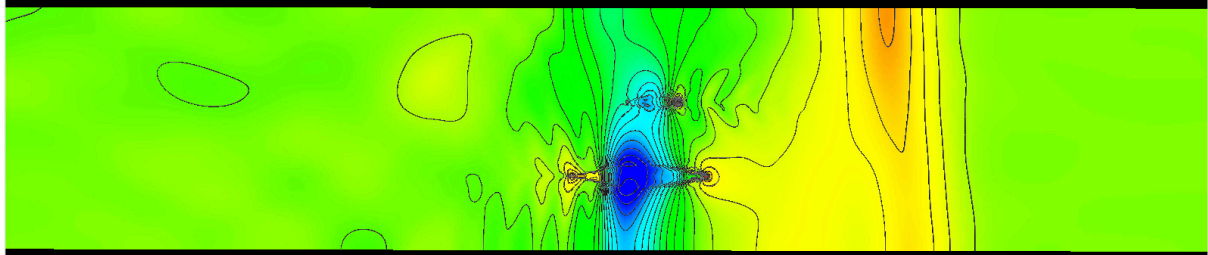


Abb. 5.44 $t=4.53063$ nach 22250 Zeitschritten

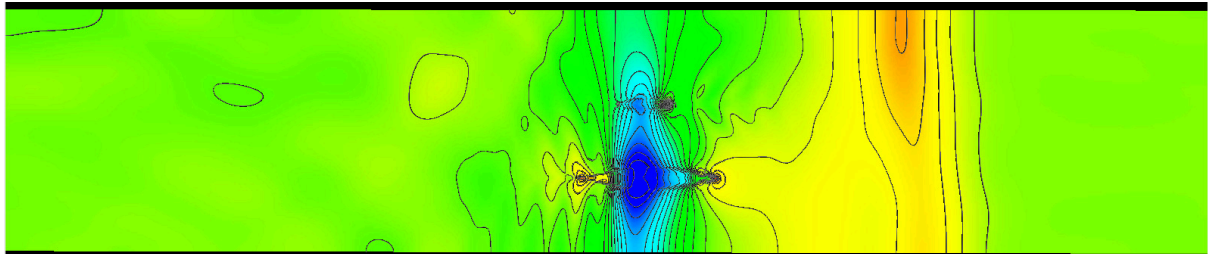


Abb. 5.45 $t=4.60364$ nach 22500 Zeitschritten

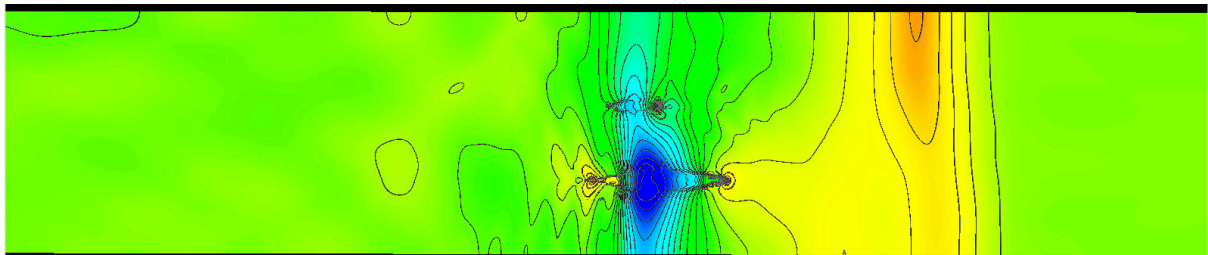


Abb. 5.46 $t=4.68066$ nach 22750 Zeitschritten

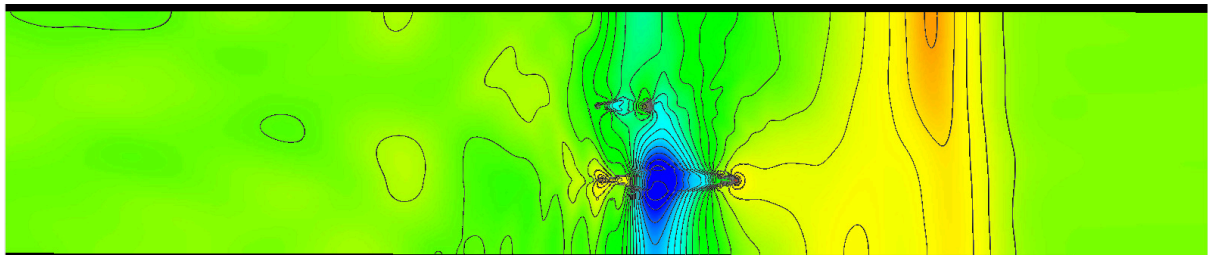


Abb. 5.47 $t=4.75852$ nach 23000 Zeitschritten

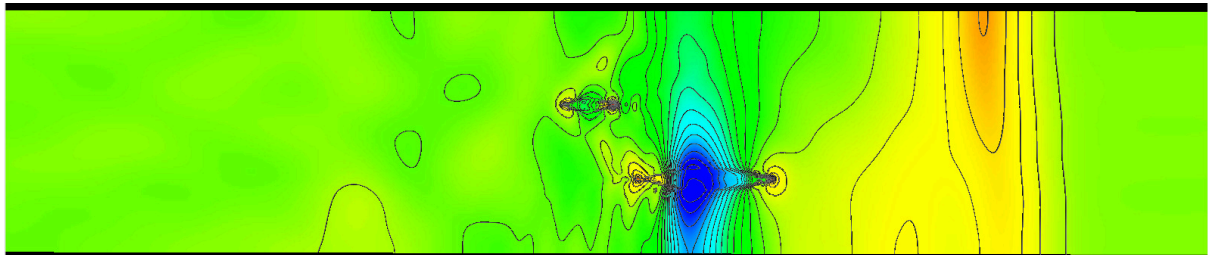


Abb. 5.48 $t=5.03216$ nach 24000 Zeitschritten

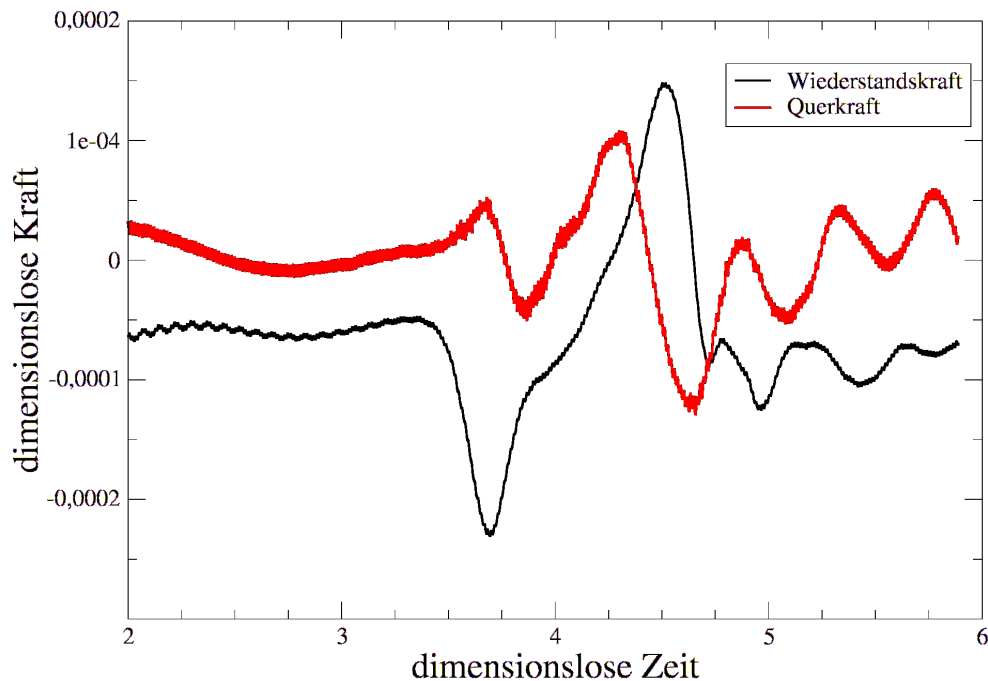


Abb. 5.49 Zeitlicher Verlauf der Längs- und der Seitenkraft

5.7 Simulation der Begegnung zweier Leichter

Als ein weiteres Beispiel für den Fall einer Schiffsbegegnung wird die Begegnung zweier Leichter, Länge 76,5 m, betrachtet.

Die Geometrien der Leichter sind vergleichsweise einfach. Dies bedeutet jedoch nicht, dass eine numerische Simulation weniger anspruchsvoll wäre. Die kastenförmige Grundgeometrie erlaubt relativ enge Passagen hoher relativer Verdrängung, sowohl im Experiment als auch in vergleichenden Simulationen. Obwohl Leichter in Natura nicht eigenständig fahren und der Testfall somit als akademisch zu bezeichnen ist, können Stärken und Schwächen der Methoden an diesem besonders gut studiert werden.

Wie im vorigen Beispiel wird das Simulationsgebiet zu Beginn, als in Ruhe befindliches Wasserbecken angenommen. Die beiden Leichter starten aus der Ruhe heraus schlagartig mit einer Geschwindigkeit von je 13,4 km/h und fahren aufeinander zu. Sie passieren sich in einem relativ geringen Abstand von nur 10 m. Es handelt sich somit wiederum um eine vorgegebene, lineare Bewegungsform. Die Wassertiefe beträgt 4 m und der Tiefgang der Leichter ist 2,8 m. Entsprechend sind die Froudezahlen $Fr_h = 0,594$ bezogen auf die Wassertiefe, bzw. $Fr = 0,136$ bezogen auf die Leichterlängen. Beide Leichter besitzen die gleiche Geometrie, so dass die gegenseitige Beeinflussung wesentlich größer ist, als bei dem vorangegangenen Beispiel, bei dem die Größen der Schiffe stark unterschiedlich waren. An dieser Stelle sei bemerkt,

dass die Overset-Methode es erlaubt, die gleiche Geometrie und Vernetzung für beide Leichter zu verwenden und beliebig neu anzuordnen. Die Netzgenerierung für den vorliegenden Fall beschränkt sich somit zunächst auf die Erstellung eines relativ engen Tetraedernetzes um die Leichtergeometrie und die hier einfache kartesische Vernetzung des Gewässers.

Leider führten erste Simulationsrechnungen zu enttäuschenden Ergebnissen. Eine Analyse des Problems ergab, dass aufgrund der für enge Passagen erforderlichen, dünn-schichtigen Vernetzung um die Leichtergeometrie eine ausreichende Rückkopplung der jeweiligen Lösung auf den Leichtergittern an das Hintergrundnetz nicht erfolgen konnte. So war die Auflösung des Hintergrundgitters (des Gewässers) zu grob, um eine ausreichende Verzahnung in den Leichtergittern zu erreichen. Aufgrund dieser Ergebnisse wird für künftige Entwicklungen u. a. angestrebt, die erforderlichen Netzeigenschaften exakt zu studieren und mathematisch belastbare Mindestanforderungen zu formulieren, bzw. diese direkt in den Generierungsprozess, ggf. sogar im Sinne einer Adaption während des Lösungsprozesses, einfließen zu lassen.

Im vorliegenden Fall konnte jedoch mit den bereits bestehenden Elementen der Overset-Methode Abhilfe geschaffen werden. Da keine Einschränkungen bzgl. der Anzahl an Gitterebenen bestehen und die Trajektorien der Leichter vorab bekannt sind, konnte ein statisches Zwischengitter eingesetzt werden, das sich im Sinne einer Netzstraße höherer und somit ausreichender Auflösung für die Leichter versteht, Abb. 5.50. In der untersten Prioritätsebene befindet sich weiterhin das Hintergrundgitter (blau) für das Gewässer. In der nächst höheren Ebene befindet sich das Zwischengitter (rot), auf dessen Gebiet die Lösung des Hintergrundgitters ungültig ist. In der höchsten Ebene befinden sich wiederum die beweglichen Leichternetze (hellgrün und orange), die statt an das Hintergrundgitter nun an das Zwischengitter gekoppelt sind. Es handelt sich somit um eine a priori Adaption des Netzes mittels Overset-Methode.

Aufgrund des begrenzten Rechengebiets, ca. acht Leichterlängen, müssen auch in diesem Beispiel wieder Anlaufphase, Ausbildung der Wellensysteme und Passieren der Leichter in vergleichsweise engen Räumen und entsprechend kurzen physikalischen Zeiten realisiert werden.

Der zeitliche Verlauf ist daher, wie im vorhergehenden Beispiel der Begegnung zweier Seeschiffe, durch eine Anlaufphase geprägt. Die zur Wand gerichteten Kräfte bei ca. $t = 0,8$ und bei $t = 1,3$, Abbildung Abb. 5.52, sind der Wirkung der Anfahrwelle auf die Wand zuzuordnen. Sie sind durch den unterschiedlichen Wandabstand der Leichter zeitversetzt. Zu Beginn der Begegnung, bei ca. $t = 2,5$ wirken aufgrund der gegenläufigen Bugwellen der Leichter abstoßende Kräfte. Während der Vorbeifahrt, Sequenz aus Abb. 5.51 bildet sich aus den jeweiligen Primärwellensystemen der Leichter ein gemeinsames, überlagertes Wellensystem. Das Wellental zwischen den Leichtern wird durch den geringen Passierabstand deutlich verstärkt, so dass in die-

ser Phase große anziehende Seitenkräfte wirken, Abb. 5.52. Zur Zeit $t = 3,1$ befinden sich die Leichter direkt nebeneinander (Hauptspant an Hauptspant). Die maximale anziehende Seitenkraft tritt bei beiden Leichtern geringfügig später ein, eine Beobachtung, die auch experimentell bestätigt werden kann. Gegen Ende der Vorbeifahrt treten aufgrund der Heckwellen beider Leichter nochmals deutlich abstoßende Seitenkräfte auf. Der Vorgang endet mit nachschwingenden Querkräften, die soweit nachvollziehbar, der Interaktion der Sekundärwellensysteme beider Leichter geschuldet sind.

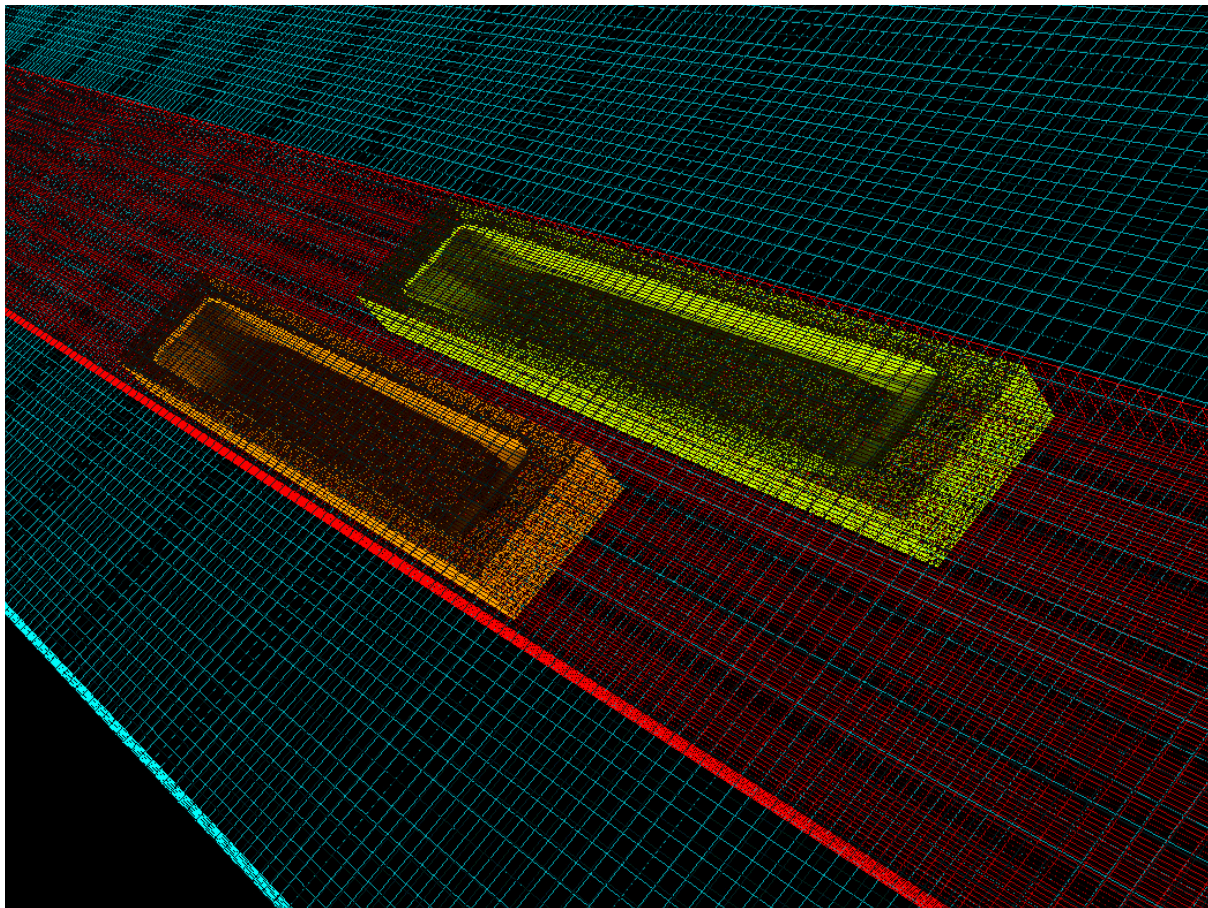


Abb. 5.50 Zwei Leichter in einem Kopplungsgitter zum Hintergrundnetz

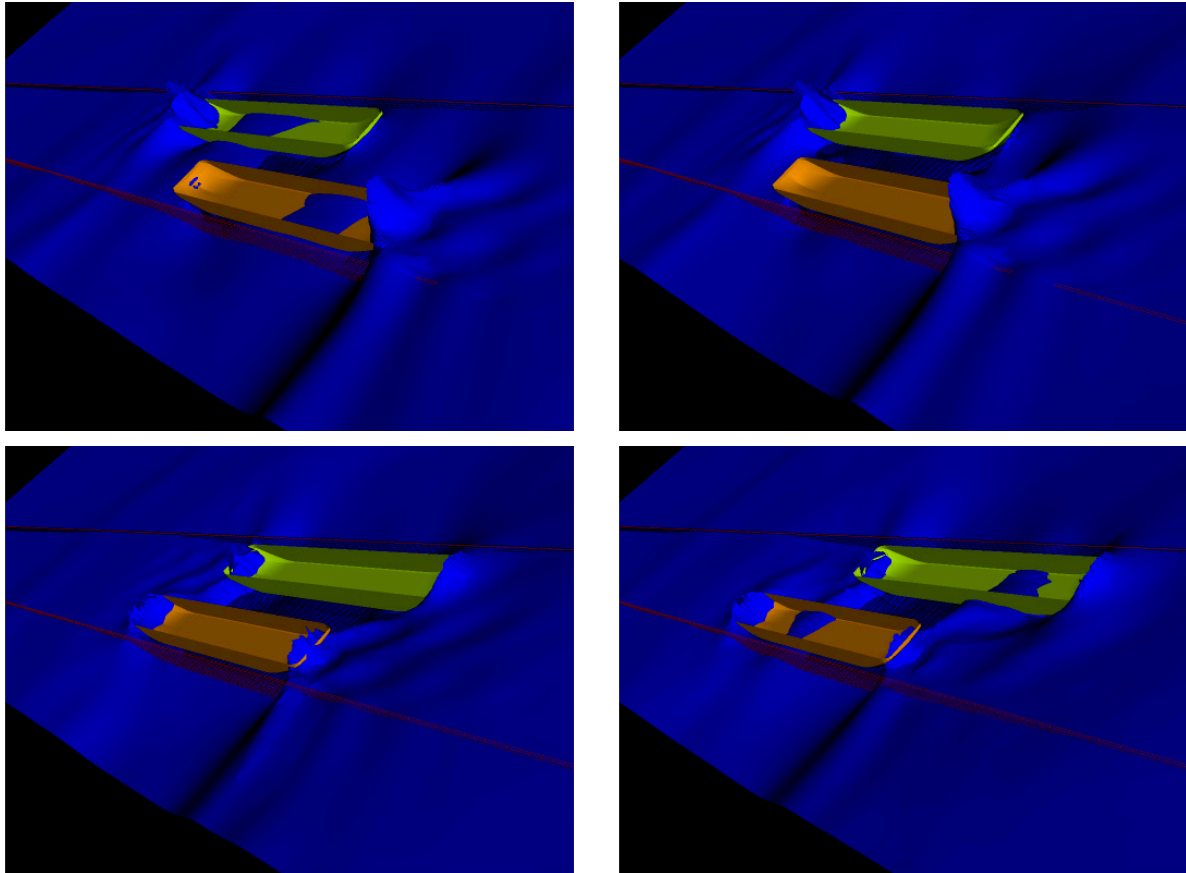


Abb. 5.51 Bildsequenz im Bereich der Vorbeifahrt zweier Leichter (oben links, oben rechts, unten links, unten rechts). Die Auslenkung der Oberfläche ist 10-fach überhöht dargestellt. Zusätzlich ist die seitliche Berandung des verfeinerten Zwischengitters gezeigt.

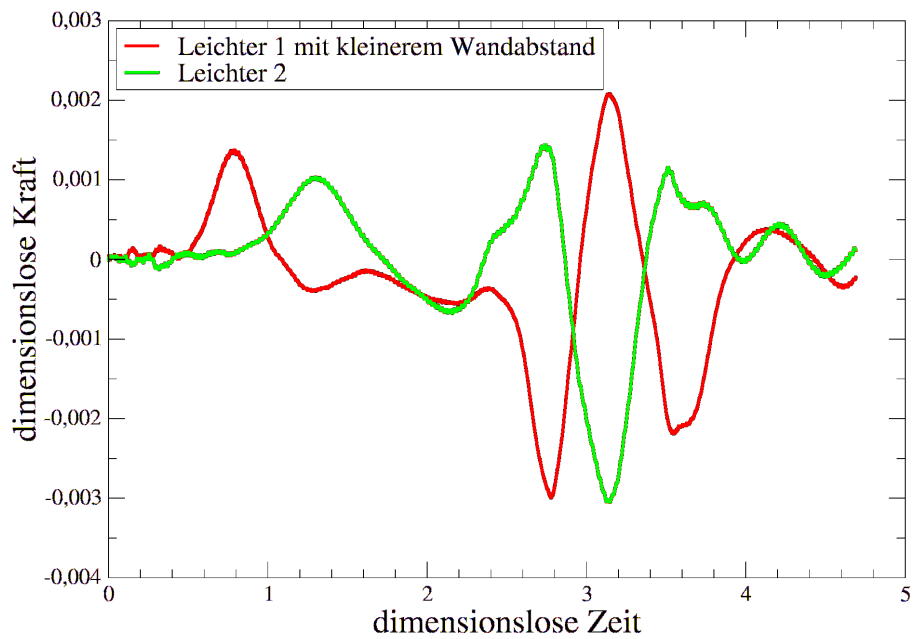


Abb. 5.52 Zeitlicher Verlauf der Seitenkräfte

Unter kritischer Betrachtung der Simulation ist festzuhalten, dass die eingangs erwähnte räumliche und somit auch zeitliche Begrenzung der gesamten Simulation zu einer nur mäßig ausgebildeten Umströmung der Leichter vor deren gegenseitiger Beeinflussung führt. Der Fall ist somit nur bedingt mit einer realen Begegnungsfahrt vergleichbar, bei der beide Schiffe bereits eine lange Fahrstrecke konstanter Geschwindigkeit zurückgelegt haben. Dieser Punkt trifft auch das Experiment in einem naturgemäß begrenzten Becken. Ihm wird begegnet indem die verfügbare Länge des Kanals im Experiment soweit wie nur möglich ausgeschöpft wird.

Zur Verbesserung der Simulation stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Einerseits kann je Schiff eine vorab zu bestimmende stationäre Lösung erzeugt werden, die dann unter Transformation der Geschwindigkeit als Startlösung der Begegnungsfahrt genutzt werden kann. Zum anderen kann durch Leistungssteigerungen des Programms auch eine Rechnung in sehr deutlich vergrößerten Rechengebieten erfolgen. Unter Berücksichtigung der mittelfristig verfügbaren großen Rechenanlagen wird dies sicher möglich sein. Wird beispielsweise die Gesamtpunktzahl der Simulation im Vergleich zum oben durchgeführten Beispiel lediglich um einen Faktor von ca. vier vergrößert, ermöglicht dies bereits eine rund fünf bis sechs mal größere Anlaufstrecke. Um derartige Rechnungen durchführen zu können, ist jedoch auf der bestehenden Rechnergeneration eine parallele Abarbeitung und somit eine vollständige Parallelisierung der Overset-Methode unerlässlich.

6 Literatur

[JI1]

Jiang, Tao: „Ship Waves in Shallow Water“, Fortschrittsberichte VDI, Reihe 12, Nr. 466, VDI Verlag, Düsseldorf 2001

[SL1]

Schlichting, Hermann: „Grenzschicht-Theorie“, Braun, Karlsruhe 1965

[TO2001]

Togashi, F., Nakahashi, K., Ito, Y., Iwamiya, T. and Shimbo, Y.: "Flow Simulation of NAL Experimental Supersonic Airplane/Booster Separation Using Overset Unstructured Grids," Computers & Fluids, Vol. 30, Issue 6, July 2001, pp. 673-688

[WA2005]

Wang, Z.J. and Kannan, R.: "An Overset Adaptive Cartesian/Prism Grid Method for Moving Boundary Flow Problems," AIAA-2005-0322.

<http://www.public.iastate.edu/~zjw/papers/aiaa-2005-0322.pdf>

[MO1]

Gloth, Oliver: "An object oriented finite volume framework and its application to fluid dynamics problems", Dissertation Universität Duisburg, 2003

[HY1]

Simulationssoftware für hydrodynamische Probleme - Schiff und Antrieb in begrenzten Gewässern, www.dst-org.de unter Web-Service 295. Mitteilung des DST

[FE1]

www.featflow.de/bench_all/paper.html

[ST1]

Stuntz, Norbert: „Numerische Simulation der Schiffsumströmung mit Berücksichtigung des Propellersogs“, Dissertation Universität Duisburg-Essen, 2006