

**NUMERISCHE SIMULATION DES STRÖMUNGSFELDES UM BINNEN-
SCHIFFE MITTELS COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)**

***NUMERICAL SIMULATION OF THE CURRENT FIELD AROUND IN-
LAND SHIPS APPLYING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)***

von

Tobias LINKE

Jens SCHEFFERMANN

Mark STOCKSMEYER

A B S T R A C T

As a result of a ship movement current- and wave fields occur around the ship inducing hydraulic impacts, which in particular in restricted waters cause significant damages at the fairway boundaries. Therefore, well directed protection measures are to be taken in order to secure the fairway boundaries, whereby the correlation between impacts and damages is still a topic of world-wide research. In addition to prototype- and model tests more and more numerical simulations on the basis of Computational Fluid Dynamics (CFD) come into operation, whereby the main focus until now was in the optimization of the ship shape rather than in the description of the hydraulic impacts on the fairway, why it was sufficient up to now to apply in the numerical simulation an approach with a non moving ship in flowing water. To eliminate this problem a new approach with a moving ship on basis of a MOVING MESH was implemented in a numerical simulation and tested.

For this purpose a typical situation for inland waterways in Germany was selected as test case, for which complementary measurements of the current- and wave fields were available from model tests. In the numerical simulation, applying the CFD-System StarCD, the wave field and its interaction with the current field was neglected as a first approach.

To sum up, applying the approach of a moving ship on basis of a MOVING MESH in a numerical simulation reproduces the current field in a wide area around the ship both qualitatively and quantitatively correct. In order to improve the results, in the future supplementary to the current field the wave field should be considered.

Z U S A M M E N F A S S U N G

Bei der Bewegung eines Schiffes werden um dieses herum Strömungs- und Wellenfelder erzeugt, die hydraulische Belastungen bedingen, welche insbesondere in begrenzten Fahrwässern zu erheblichen Schäden an den Fahrwasserrändern führen können. Gezielte Sicherungsmaßnahmen zum Schutz der Fahrwasserränder sind deshalb notwendig, wobei die Zusammenhänge zwischen den Belastungen und den Schäden Gegenstand weltweiter Forschungen sind. Neben Natur- und Modelluntersuchungen kommen hierfür mittlerweile auch vermehrt numerische Simulationen auf der Basis von Computational Fluid Dynamics (CFD) zum Einsatz, wobei das Hauptaugenmerk bisher bei der Optimierung der Schiffsform und nicht in der Beschreibung der hydraulischen Belastungen auf die Fahrwässer lag, weswegen es bisher ausreichte, bei der numerischen Simulation einen Ansatz zu wählen, bei dem das Schiff sich nicht selber bewegt, sondern vom Wasser umströmt wird. Zur Beseitigung dieses Problems wurde deshalb ein neuer Ansatz, bei dem ein sich bewegendes Schiff auf der Basis eines MOVING MESH abgebildet wird, in eine numerische Simulation implementiert, und auf seine Möglichkeiten hin untersucht.

Als Untersuchungsfall hierfür wurde ein für deutsche Binnenwasserstraßen typischer Lastfall herangezogen, für den ergänzende Messungen der Strömungs- und Wellenfelder aus Modelluntersuchungen vorlagen, wobei bei der numerischen Simulation mit dem CFD-System StarCD in erster Näherung das Wellenfeld sowie seine Interaktion mit dem Strömungsfeld vernachlässigt wurde.

Insgesamt zeigte sich dabei, daß es mit dem Ansatz eines sich bewegenden Schiffes auf der Basis eines MOVING MESH in einer numerischen Simulation möglich ist, das Strömungsfeld in weiten Bereichen um das Schiff sowohl qualitativ als auch quantitativ korrekt abzubilden, wobei zur Verbesserung der Ergebnisse in Zukunft zusätzlich zum Strömungsfeld auch das Wellenfeld berücksichtigt werden sollte. Erste Untersuchungen hierzu sind vielversprechend.

INHALT

1	EINLEITUNG	148
2	COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS	148
2.1	Allgemeines	148
2.2	Mathematische Grundlagen	148
2.2.1	RANSE	148
2.2.2	k/ε-Modell	149
2.3	Moving Mesh	149
3	UNTERSUCHUNGSFALL	150
4	UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE	151
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	153
6	SCHRIFTTUM	153

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2-1: Anfänglicher Aufbau des Berechnungsgitters zur Abbildung eines sich bewegenden Schiffes auf der Basis eines MOVING MESH in einer numerischen Simulation	149
Abb. 2-2: Umbau des Berechnungsgitters zur Abbildung eines sich bewegenden Schiffes auf der Basis eines MOVING MESH in einer numerischen Simulation im zeitlichen Verlauf	150
Abb. 3-1: Typische Modelluntersuchung zu den Strömungs- und Wellenfeldern um sich bewegende Binnenschiffe in der Versuchsanlage Schiffsrinne des FRANZIUS-INSTITUTS FÜR WASSERBAU UND KÜSTEN-INGENIERWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER	150
Abb. 3-2: Detail des Berechnungsgitters für die numerische Simulation im unmittelbaren Bereich des Schiffsbugs	150
Abb. 4-1: Vergleich der Strömungsverläufe parallel zur Schiffslängsachse aus numerischer Simulation und Modelluntersuchung an ausgewählten Positionen neben dem Schiff (x = Laufindex entlang der Schiffslängsachse - positiv in Fahrtrichtung des Schiffes; y = Laufindex quer zur Schiffslängsachse – positiv, wenn vom Schiff weg gerichtet (Nulllage auf Höhe Schiffswand); z = Laufindex vertikal zur Schiffslängsachse – positiv, wenn zum Schiffsboden gerichtet (Nulllage auf Höhe Ruhewasserspiegellage)	152
Abb. 5-1: Vergleich der Strömungsverlaufes parallel zur Schiffslängsachse aus numerischer Simulation (Variante 1: ohne Wellenfeldberücksichtigung; Variante 2: mit Wellenfeldberücksichtigung) und Modelluntersuchung an einer ausgewählten Position neben dem Schiff (x = Laufindex entlang der Schiffslängsachse; y = Laufindex quer zur Schiffslängsachse; z = Laufindex vertikal zur Schiffslängsachse)	153

SYMBOLVERZEICHNIS

$c_{1\varepsilon}, c_{2\varepsilon}$	=	Konstanten des k/ε -Modells [-]
f	=	Massenkräfte $[ML/T^2]$
i, j	=	Laufindizes [-]
k	=	Turbulente kinetische Energie $[L^2/T^2]$
p	=	Druck $[M/LT^2]$
t	=	Zeit [T]
t_{Kanal}	=	Wassertiefe [L]
u	=	3D Strömungsvektor $[L/T]$
v_{Schiff}	=	Schiffsgeschwindigkeit $[L/T]$
v_x	=	Strömungsgeschwindigkeit $[L/T]$
x	=	3D Raumvektor [L]; Laufindex entlang der Schiffslängsachse [L]
y	=	Laufindex quer zur Schiffslängsachse [L]
z	=	Laufindex vertikal zur Schiffslängsachse [L]
B_{Schiff}	=	Schiffsbreite [L]
L_{Schiff}	=	Schiffslänge [L]
ε	=	Dissipation $[L^2/T^3]$
ν	=	Kinematische Zähigkeit $[L^2/T]$
ν_t	=	Wirbelviskosität $[L^2/T]$
ρ	=	Dichte des betrachteten Stoffes $[M/L^3]$
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	=	Konstanten des k/ε -Modells [-]

1 Einleitung

Bei der Bewegung eines Schiffes werden um dieses herum Strömungs- und Wellenfelder erzeugt, die hydraulische Belastungen bedingen. In unbegrenztem Fahrwässern, wie in offener See, sind diese Belastungen nur von untergeordneter Bedeutung, während sie in begrenzten Fahrwässern, wie in Kanälen und Flüssen, zu erheblichen Schäden an Sohle und seitliche Begrenzungen führen können, weil die Ausbreitung der Wellen und Strömungen beschränkt ist und das Ausbreitungsverhalten zusätzlich durch Reflektionen an den Fahrwasserrändern beeinflusst wird (Messing, 1998). Gezielte Sicherungsmaßnahmen zum Schutz der Fahrwasserränder sind deshalb notwendig. Problematisch gestaltet sich dabei jedoch, daß die Zusammenhänge zwischen den Belastungen und den Schäden derzeit noch nicht abschließend beantwortet werden können. Hieran wird weltweit geforscht, wobei als gängige Hilfsmittel Natur- und Modelluntersuchungen und seit den 80-iger Jahren auch vermehrt numerische Simulationen auf der Basis von Computational Fluid Dynamics (CFD) zur Beschreibung der hochkomplexen dreidimensionalen Vorgänge zum Einsatz kommen.

In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, daß allen gängigen CFD-Systemen weiterhin Grenzen gesetzt sind, weshalb Erweiterungen unerlässlich sind. So wurden die CFD-Systeme erst in neuester Zeit für die Beschreibung der Strömungs- und Wellenfelder um sich bewegende Schiffe auch in begrenzten Fahrwässern angepaßt (Laudan et al., 1996; Schumann, 1998), wobei jedoch in der Regel weiterhin Wellen- und Strömungsfelder aus rechenzeittechnischen Gründen in voneinander unabhängigen Programmsystemen berechnet werden, d. h. das Wellenfeld wird in einem auf der Potentialtheorie basierenden Programmsystem berechnet und findet im Anschluß daran als Randbedingung Eingang in ein CFD-System zur Berechnung des Strömungsfeldes (Rieck, 1999). Ein weiteres Problem stellt die Tatsache dar, daß das Hauptaugenmerk bei der Anwendung der CFD-Systeme zur Beschreibung der Strömungs- und Wellenfelder um sich bewegende Schiffe bisher bei der Optimierung der Schiffsform und nicht in der Beschreibung der hydraulischen Belastungen auf die Fahrwässer lag, weswegen es bisher ausreichte für die numerische Simulation einen Ansatz zu wählen, bei dem das Schiff sich nicht selber bewegt, sondern vom Wasser umströmt wird, vergleichbar Untersuchungen von beispielsweise Kraftfahrzeugen in einem Windkanal. Zur Beseitigung dieses Problems könnte ein neuer Ansatz, bei dem ein sich bewegendes Schiff in eine numerische Simulation implementiert wird, beitragen. Die Umsetzung eines derartigen Ansatzes in eine numerische Simulation sowie seine

Möglichkeiten sollen daher im folgenden vorgestellt bzw. untersucht werden.

2 Computational Fluid Dynamics

2.1 Allgemeines

Die mathematische Beschreibung von Strömungsprozessen ist mittels der Grundgleichungen der Strömungsmechanik, d. h. den Gleichungen für die Erhaltung von Masse, Impuls und Energie, möglich. Hierbei handelt es sich um Differentialgleichungen, welche die Änderungen von Zustandsgrößen kontinuierlich in Raum und Zeit beschreiben. Zur Lösung dieser Gleichungen werden numerische Methoden angewandt, die das Differentialgleichungssystem in ein algebraisches Gleichungssystem überführen, was auf einem Berechnungsgitter, welches das Strömungssystem beschreibt, unter Berücksichtigung von Anfangs- und Randbedingungen gelöst werden kann (Ferziger et al., 1996).

2.2 Mathematische Grundlagen

Unter der für Fluidströmungen in der Regel geltenden Voraussetzung eines inkompressiblen Newton'schen Fluids¹ konstanter Dichte, beschreiben die Kontinuitätsgleichung (Gl. 2-1) und die Navier-Stokes-Gleichungen (Gl. 2-2) die Erhaltung von Masse, Impuls und Energie in einem Strömungssystem vollständig. Dabei geben die Kontinuitätsgleichung die zeitliche Änderung der in einem Volumen enthaltenen Masse und die Navier-Stokes-Gleichungen die zeitliche Änderung des Impulses in einem Volumen wieder.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{Gl. 2-1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{1}{\rho} f_i \quad \text{Gl. 2-2}$$

mit

f	= Massenkräfte [kgm/s ²]
i, j	= Laufindizes [-]
p	= Druck [kg/ms ²]
t	= Zeit [s]
u	= 3D Strömungsvektor [m/s]
x	= 3D Raumvektor [m]
ν	= Kinematische Zähigkeit [m ² /s]
ρ	= Dichte des betrachteten Stoffes [kg/m ³]

2.2.1 RANSE

Die Kontinuitätsgleichung und die Navier-Stokes-Gleichungen zusammen bilden ein Differentialgleichungssystem für das analytische Lösungen nur in Ausnahmefällen existieren. Für die praktische Anwendung werden daher die momentanen Strömungs-

¹ Ein Newton'sches Fluid ist ein Fluid, welches einer Formänderung nur geringen Widerstand entgegen setzt.

geschwindigkeiten und der momentane Druck in den Gleichungen als zeitliche Mittelung (Index „ - “) mit einer Schwankungsrate (Index „ ‘ “) betrachtet. Dies ist möglich, da meistens die zeitabhängigen Strömungsparameter und nicht die kleinsten turbulenten Strukturen in einem Strömungssystem von Interesse sind. Hieraus ergeben sich die zeitlich gemittelte Kontinuitätsgleichung (Gl. 2-3) und die zeitlich gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (Gl. 2-4). Letztere werden auch als RANSE (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-Equations) bezeichnet.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{Gl. 2-3}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \rho \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \overline{u_i u_j} \right] + \bar{f}_i \quad \text{Gl. 2-4}$$

mit

$$\nu_t = \text{Wirbelviskosität [m}^2\text{/s]}$$

Durch die zeitliche Mittelung entstehen in den Navier-Stokes-Gleichungen zusätzliche Terme, die als Reynolds-Spannungen bezeichnet werden. Durch diese werden die turbulenten Schwankungen berücksichtigt, die nicht vom Strömungssystem selbst abgebildet werden können, da die Wirbel kleiner als die Auflösung des Strömungssystems sind. Der Zusammenhang zwischen den Navier-Stokes-Gleichungen und den Reynolds-Spannungen muß dabei durch ein Turbulenzmodell, welches das Gleichungssystem schließt, hergestellt werden (Breuer, 1995).

2.2.2 k/ε-Modell

Die einfachsten Turbulenzmodelle basieren auf dem Prinzip der Wirbelviskosität, welches besagt, daß die Reynolds-Spannungen in den zeitlich gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen proportional zum Geschwindigkeitsgradienten sind (Tennekes et al., 1972). Allerdings kann dadurch der Transport der turbulenten Strömung mit der mittleren Strömung nicht abgebildet werden. Hierfür sind im Laufe der Zeit eine Vielzahl komplexerer Turbulenzmodelle, die an spezifische Problemstellungen angepaßt sind, entwickelt worden (Rodi, 1993), von denen das k/ε-Modell das am weitesten verbreitete ist, da es für viele technisch relevante Strömungen zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Dieses Turbulenzmodell beschreibt die zeitliche Änderung der turbulenten kinetischen Energie (Gl. 2-5) sowie deren Dissipationsrate (Gl. 2-6) in einem Strömungssystem (Brenneisen, 1999).

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \overline{u_i u_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad \text{Gl. 2-5}$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u_i u_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad \text{Gl. 2-6}$$

mit

- $c_{1\varepsilon}, c_{2\varepsilon}$ = Konstanten des k/ε-Modells [-]
- k = Turbulente kinetische Energie [m²/s²]
- ε = Dissipation [m²/s³]
- $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ = Konstanten des k/ε-Modells [-]

2.3 Moving Mesh

Zur Abbildung einer sich bewegenden Struktur in einer numerischen Simulation ist die Implementierung eines MOVING MESH unerlässlich, da aus programmtechnischen Gründen die Struktur selbst innerhalb des Berechnungsgitters nicht bewegt werden kann, sondern stattdessen das Berechnungsgitter um die Struktur herum bewegt werden muß. Da MOVING MESHES grundsätzlich an die spezielle Problemstellung angepaßt werden müssen, wird im folgenden nur noch auf die Implementierung eines MOVING MESH zur Abbildung eines sich bewegenden Schiffes in einer numerischen Simulation eingegangen.

Hierfür ist ein speziell aufgebautes Berechnungsgitter zu erzeugen. Im Detail muß dieses aus drei voneinander unabhängigen Teilen, sogenannten Blöcken, aufgebaut sein. In einem dieser Blöcke, dem statischen Block (Block 3 in Abb. 2-1) ist dabei das Schiff zu integrieren. Eine wesentliche Eigenschaft dieses Blockes ist, daß sich sein Aufbau während der numerischen Simulation nicht verändert.

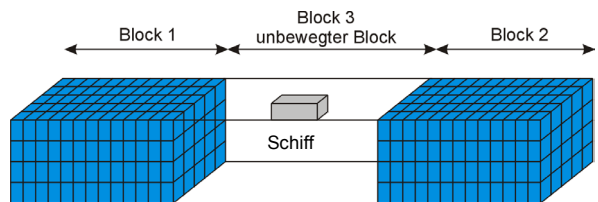


Abb. 2-1: Anfänglicher Aufbau des Berechnungsgitters zur Abbildung eines sich bewegenden Schiffes auf der Basis eines MOVING MESH in einer numerischen Simulation

Der statische Block ist in Bewegungsrichtung des Schiffes von zwei identisch aufgebauten, sogenannten dynamischen Blöcken (Blöcke 1 und 2 in Abb. 2-1) umgeben, deren Aufbau im Gegensatz zum Aufbau des statischen Blocks während der numerischen Simulation verändert wird. Dies geschieht durch die Aktivierung und Deaktivierung einzelner Zellschichten in diesen Blöcken, wodurch nur ausgewählte Bereiche des Berechnungsgitters Eingang in die numerische Simulation im zeitlichen Verlauf finden. Der Umbau des Berechnungsgitters im zeitlichen Verlauf der numerischen Simulation ist dabei durch Erweiterung der

vorhandenen Programmierung zu implementieren. Im Prinzip ist dabei derart vorzugehen, daß zu Beginn der numerischen Simulation alle Zellschichten in einem der beiden dynamischen Blöcke deaktiviert und in dem anderen dynamischen Block aktiviert werden. Bis zum Ende der numerischen Simulation sind dann alle aktivierten Zellschichten zu festgelegten Zeitschritten und in festgelegter Reihenfolge zu deaktivieren und umgekehrt. Als Folge dessen erfährt das Schiff eine Bewegung auf einer vorgeschriebenen Bahn mit einer vom Zeitschritt abhängigen Geschwindigkeit in Richtung des dynamischen Blocks, in dem die aktivierten Zellschichten zum Beginn der numerischen Simulation zu finden waren (Abb. 2-2).

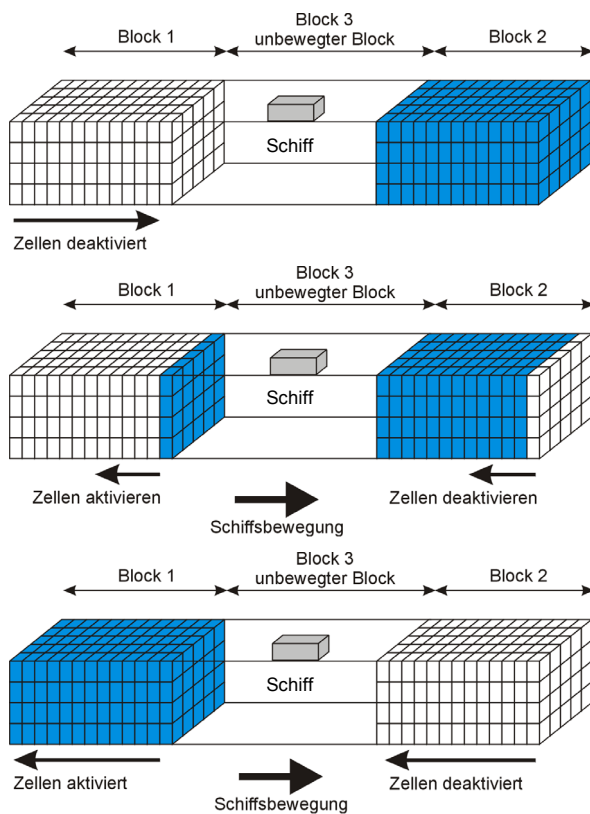


Abb. 2-2: Umbau des Berechnungsgitters zur Abbildung eines sich bewegenden Schiffes auf der Basis eines MOVING MESH in einer numerischen Simulation im zeitlichen Verlauf

3 Untersuchungsfall

Um die Möglichkeiten zur Beschreibung der Strömungs- und Wellenfelder um ein sich bewegendes Schiff im begrenzten Fahrwasser durch die Abbildung eines sich bewegenden Schiffes auf der Basis des Ansatzes eines MOVING MESH in einer numerischen Simulation zu untersuchen, wurde ein für deutsche Binnenwasserstraßen typischer Lastfall, die mittige Fahrt eines Schiffes mit einer Länge von 80 m bei einer Breite von 11,40 m in einem rechteckförmigen Kanalprofil mit einer Wasserspiegelbreite von 42 m bei einer Wassertiefe von 4 m bei einer unter diesen Randbedingungen üblichen Schiffsgeschwindigkeit

von 8 km/h und einem Schiffstiefgang von 2 m herangezogen. Für diesen Fall lagen zusätzlich hochaufgelöste Messungen der Strömungs- und Wellenfelder aus Modelluntersuchungen (Abb. 3-1) in der Versuchsanlage Schiffsrinne des FRANZIUS-INSTITUTS FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER vor (Pical, 2000).



Abb. 3-1: Typische Modelluntersuchung zu den Strömungs- und Wellenfeldern um sich bewegende Binnenschiffe in der Versuchsanlage Schiffsrinne des FRANZIUS-INSTITUTS FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER

Für die numerische Simulation kam das CFD-System StarCD (Computational Dynamics Limited, 1999) auf einer SGI Origin 200 Workstation zum Einsatz. Unter Berücksichtigung der oben genannten Randbedingungen wurde ein Berechnungsgitter aus insgesamt etwa 100000 Zellen generiert, wobei die Kantenlänge der Zellen zwischen 0,05 m im unmittelbaren Bereich des Schiffes und 0,5 m mit zunehmender Entfernung vom Schiff variiert wurde (Abb. 3-2). Weiterhin kam zur Turbulenzmodellierung das k/ϵ -Modell mit seinen Standardparametern zum Einsatz. Anzumerken ist noch, daß nur das Strömungsfeld um das sich bewegende Schiff berücksichtigt wurde, wogegen das Wellenfeld und seine Interaktion mit dem Strömungsfeld sowie das dynamische Bewegungsverhalten des Schiffes in erster Näherung vernachlässigt wurden.

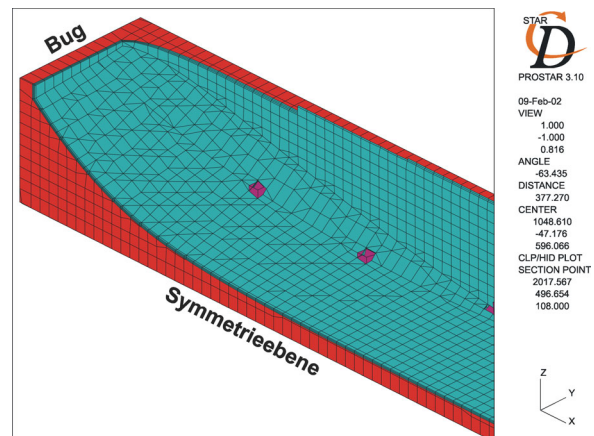


Abb. 3-2: Detail des Berechnungsgitters für die numerische Simulation im unmittelbaren Bereich des Schiffsbugs

4 Untersuchungsergebnisse

Die Abb. 4-1a bis 4-1f stellen jeweils vergleichend den in der Modelluntersuchung gemessenen und den in der numerischen Simulation nach etwa 72 Stunden Rechendauer berechneten Strömungsverlauf parallel zur Schiffslängsachse an einer ausgewählten Position neben dem Schiff gegenüber.

Zunächst einmal zeigt sich dabei an allen Positionen der aus der Literatur (Kuhn, 1994) bekannte qualitative Strömungsverlauf um ein sich bewegendes Schiff mit einer vor dem Schiff in Fahrtrichtung verlaufenden Vorausrömung, einer neben dem Schiff entgegen der Fahrtrichtung verlaufenden Rückströmung und einer hinter dem Schiff in Fahrtrichtung verlaufenden Nachlaufströmung sowohl in der Modelluntersuchung als auch der numerischen Simulation. Beim quantitativen Vergleich der Ergebnisse aus numerischer Simulation und Modelluntersuchung zeigen sich jedoch Diskrepanzen, wobei grundsätzlich festzustellen ist, daß die Strömungsgeschwindigkeiten aus der numerischen Simulation die der Modelluntersuchung übertreffen. Im einzelnen zeigt sich an allen Positionen eine vom Betrag um bis zu 25 % größere Vorausrömung in der numerischen Simulation im Vergleich zur Modelluntersuchung, wobei die Abweichungen mit zunehmender Wassertiefe und Entfernung vom Schiff (Abb. 4-1a, 4-1b, 4-1e und 4-1f) auf unter 10 % absinken. Weiterhin ist bei der Betrachtung sowohl der Rückströmung als auch der Nachlaufströmung festzustellen, daß an allen Positionen die Strömungsumkehr von der Vorausrömung zur Rückströmung bzw. von der Rückströmung zur Nachlaufströmung in der numerischen Simulation und der Modelluntersuchung analog verläuft und die betragsmäßigen Abweichungen der Rückströmung bzw. Nachlaufströmung aus numerischer Simulation und Modelluntersuchung bis auf die Randbereiche, wo die Abweichungen bis zu 300 % betragen (Abb. 4-1f), unter 10 % liegen (Abb. 4-1a, 4-1c und 4-1d).

Anzumerken ist, daß die Ursachen für die Diskrepanzen zwischen numerischer Simulation und Modelluntersuchung in diesem Fall im wesentlichen in der Vernachlässigung des Wellenfeldes und seiner Interaktionen mit dem Strömungsfeld in der numerischen Simulation begründet liegen, da hierdurch Energieverrichtungsprozesse im Strömungssystem durch Wellenbildung verhindert werden und entsprechend der Kontinuitätsgleichung im numerischen Modell zwangsläufig größere Strömungsgeschwindigkeiten im Vergleich zur Modelluntersuchung auftreten müssen, wobei diese Effekte am stärksten in den Randbereichen ausgeprägt sind, da hier zusätzlich Reflektionen von Strömungen und Wellen das Strömungsgeschehen insgesamt beeinflussen.

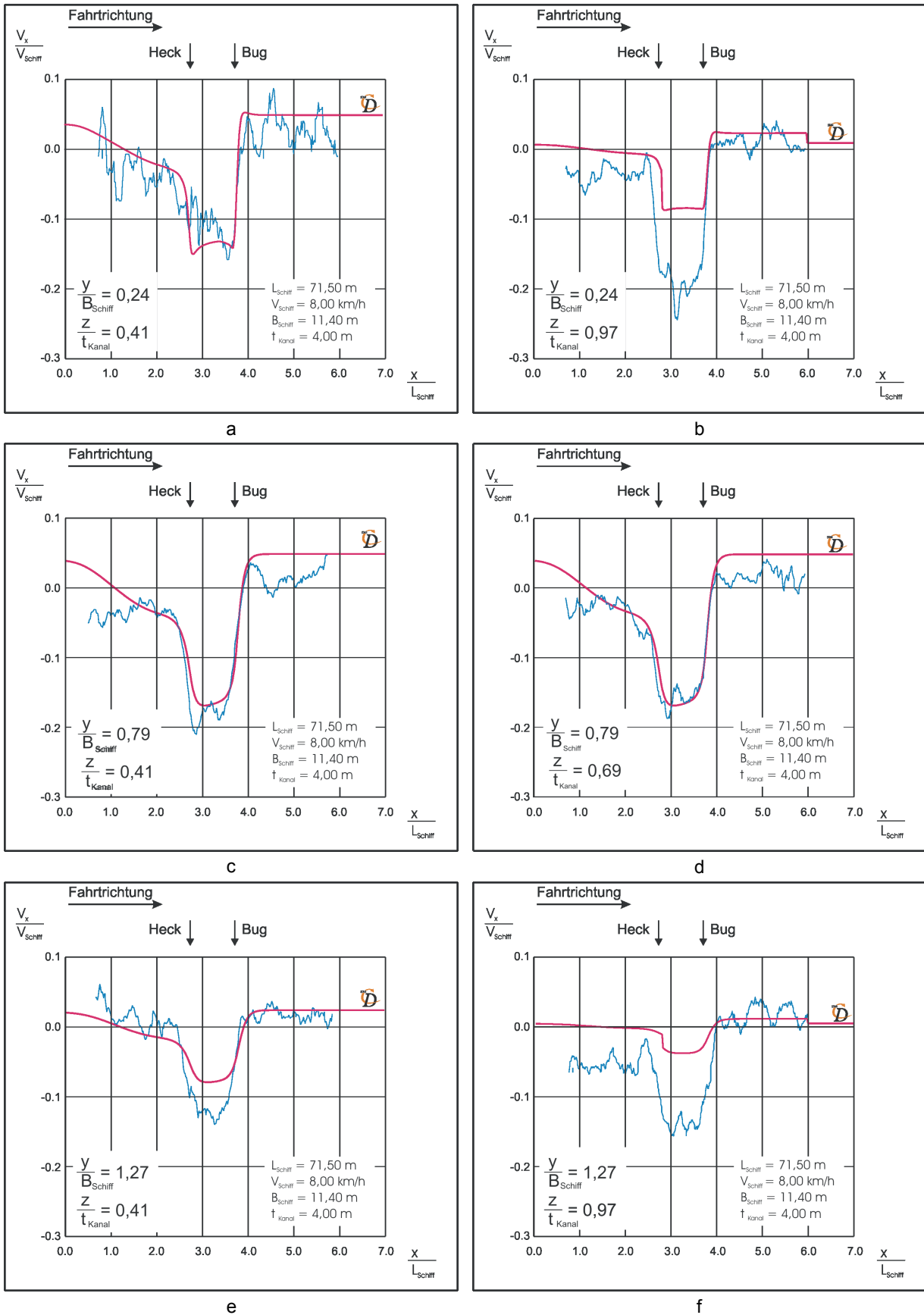


Abb. 4-1: Vergleich der Strömungsverläufe parallel zur Schiffslängsachse aus numerischer Simulation und Model-
 untersuchung an ausgewählten Positionen neben dem Schiff (x = Laufindex entlang der Schiffslängsachse - positiv
 in Fahrtrichtung des Schiffes; y = Laufindex quer zur Schiffslängsachse - positiv, wenn vom Schiff weg gerichtet
 (Nulllage auf Höhe Schiffswand); z = Laufindex vertikal zur Schiffslängsachse - positiv, wenn zum Schiffsboden
 gerichtet (Nulllage auf Höhe Ruhewasserspiegellage)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Bewegung eines Schiffes werden um dieses herum Strömungs- und Wellenfelder erzeugt, die hydraulische Belastungen bedingen, welche insbesondere in begrenzten Fahrwässern, wie Kanälen und Flüssen, zu erheblichen Schäden an den Fahrwasserändern führen können (Messing, 1998). Gezielte Sicherungsmaßnahmen zum Schutz der Fahrwasseränder sind deshalb notwendig, wobei die Zusammenhänge zwischen den Belastungen und den Schäden Gegenstand weltweiter Forschungen sind. Neben den gängigen Hilfsmitteln aus Natur- und Modelluntersuchungen kommen mittlerweile auch vermehrt numerische Simulationen auf der Basis der Computational Fluid Dynamics (CFD) Technik zur Beschreibung der hochkomplexen dreidimensionalen Vorgänge zum Einsatz. Ein wesentliches Problem stellt in diesem Zusammenhang die Tatsache dar, daß das Hauptaugenmerk bei der Anwendung der CFD-Systeme zur Beschreibung der Strömungs- und Wellenfelder um sich bewegende Schiffe bisher bei der Optimierung der Schiffsform und nicht in der Beschreibung der hydraulischen Belastungen auf die Fahrwässer lag, weswegen es bisher ausreichte bei der numerischen Simulation einen Ansatz zu wählen, bei dem das Schiff sich nicht selber bewegt, sondern vom Wasser umströmt wird. Zur Beseitigung dieses Problems wurde deshalb ein neuer Ansatz, bei dem ein sich bewegendes Schiff auf der Basis eines MOVING MESH, bei dem durch gezielte Manipulation des Berechnungsgitters dieses um das Schiff herum bewegt und hierdurch eine Bewegung des Schiffes hervorgerufen wird, in eine numerische Simulation implementiert und auf seine Möglichkeiten hin untersucht.

Als Untersuchungsfall hierfür wurde ein für deutsche Binnenwasserstraßen typischer Lastfall, die Fahrt eines zum Teil abgeladenen Schiffes in einem Kanal, herangezogen, für den ergänzende Messungen der Strömungs- und Wellenfelder aus Modelluntersuchungen in der Versuchsanlage Schiffsrinne des FRANZIUS-INSTITUTS FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER vorlagen (Pical, 2000). Anzumerken ist hierbei insbesondere, daß bei der numerischen Simulation mit dem CFD-System StarCD (Computational Dynamics Limited, 1999) in erster Näherung das Wellenfeld sowie seine Interaktion mit dem Strömungsfeld vernachlässigt wurde.

Insgesamt zeigte sich, daß es mit dem Ansatz eines sich bewegenden Schiffes auf der Basis eines MOVING MESH in einer numerischen Simulation möglich ist, das Strömungsfeld in weiten Bereichen um das Schiff sowohl qualitativ als auch quantitativ korrekt abzubilden. Bisher auftretende Diskrepanzen bei den Untersuchungen sind in erster Linie auf die Vernach-

lässigung des Wellenfeldes sowie dessen Interaktion mit dem Strömungsfeld in der numerischen Simulation zurückzuführen, weil hierdurch Energievernichtungsprozesse im Strömungssystem durch Wellenbildung verhindert werden, wobei diese Effekt am stärksten in den Randbereichen ausgeprägt sind, da hier zusätzlich Reflektionen von Strömungen und Wellen das Strömungsgeschehen insgesamt beeinflussen. In der Zukunft muß es daher das Ziel sein, zusätzlich zum Strömungsfeld das Wellenfeld um ein sich bewegendes Schiff zu berücksichtigen. Abb. 5-1 zeigt erste Ergebnisse hierzu. Dargestellt ist vergleichend der in der Modelluntersuchung gemessene und der in der numerischen Simulation nach etwa 120 Stunden Rechen-dauer berechnete Strömungsverlauf parallel zur Schiffs-längsachse an einer ausgewählten Position neben dem Schiff, wobei in Variante I das Wellenfeld unberücksichtigt blieb und in Variante II zusätzlich berücksichtigt wurde.

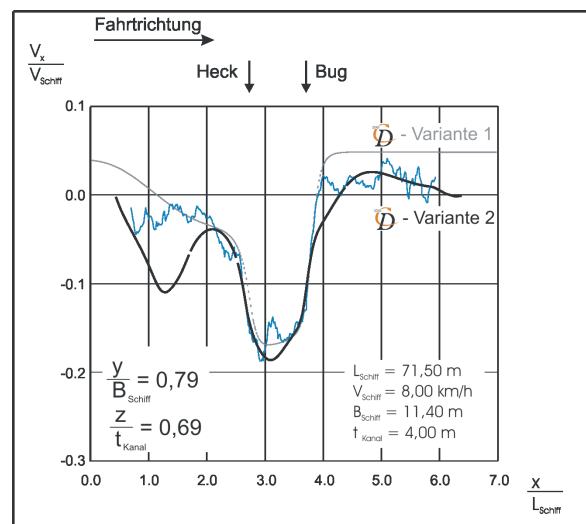


Abb. 5-1: Vergleich der Strömungsverlaufes parallel zur Schiffs-längsachse aus numerischer Simulation (Variante 1: ohne Wellenfeldberücksichtigung; Variante 2: mit Wellenfeldberücksichtigung) und Modelluntersuchung an einer ausgewählten Position neben dem Schiff (x = Laufindex entlang der Schiffs-längsachse; y = Laufindex quer zur Schiffs-längsachse; z = Laufindex vertikal zur Schiffs-längsachse)

6 Schrifttum

- Brenneisen, C. : Numerische Simulation und topologische Analyse dreidimensionaler Innenströmungen. Aachen, 1999
- Breuer, M. : Large-Eddy-Simulation. LTSM Erlangen, Erlangen, 1995
- Computational Dynamics Limited: Star-CD Methodology. London, 1999
- Ferziger, J. H. & Peric, M.: Computational Methodes for Fluid Dynamics. Berlin, 1996
- Kuhn, R.: Binnenverkehrswasserbau. Aachen, 1994

- Laudan, J. & Marzi, J.: Weiterentwicklung verfügbarer Rechenverfahren zur Anwendung in begrenztem Fahrwasser. HSVA Report Nr. 1615, Hamburg, 1996
- Messing, S.: Verkehrsbelastungen von Wasserstraßen und Messung schiffsfahrtinduzierter Belastungen in einem Kanal. Studienarbeit, FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER, Hannover, 1998 (unveröffentlicht)
- Pical, R.: Numerische Simulation des Strömungsfeldes um ein fahrendes Binnenschiff in begrenztem Fahrwasser. Diplomarbeit, FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER, Hannover, 2000 (unveröffentlicht)
- Rieck, K.: Numerische Berechnung der induzierten Geschwindigkeiten eines Binnenschiffs im Flussbett bei Bergfahrt. SVA Potsdam GmbH, Berlin, 1999
- Rodi, W.: Turbulence Models and their Application in Hydraulics. IAHR, Delft, 1993
- Schumann, C.: Berechnung von Schiffsumströmungen mit brechenden Wellen. HSVA Report Nr. 1624, Hamburg, 1998
- Tennekes, H. & Lumley, J. L.: A First Course in Turbulence. The MIT Press, Cambridge, 1972