

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Report, Published Version

Bouwmann, E.; Friedhoff, B.; Gronarz, A.

SIMUBIN - Modellierung und Simulation der realitätsnahen Schiffsbewegungen auf Binnenwasserstraßen. Teil A: Zusammenfassung; Bericht 1939 - Juni 2009

DST-Bericht

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107247>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

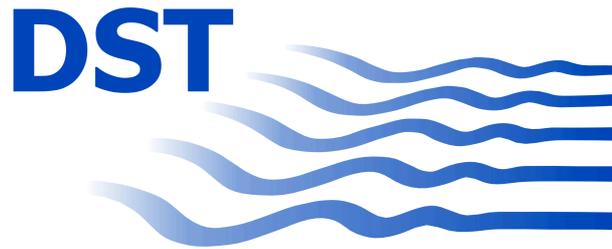
DST - Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V. (Hg.) (2009):
SIMUBIN - Modellierung und Simulation der realitätsnahen Schiffsbewegungen auf
Binnenwasserstraßen. Teil A: Zusammenfassung; Bericht 1939 - Juni 2009. Duisburg: DST
- Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V. (DST-Bericht, 1939).

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 Wirtschaft und Technologie
Förderkennzeichen 03SX222

SIMUBIN - Modellierung und Simulation der realitätsnahen
Schiffsbewegungen auf Binnenwasserstraßen
Teil A: Zusammenfassung

Bericht 1939 - Juni 2009

von

Dipl.-Ing. E. Bouwmanns
Dipl.-Ing. B. Friedhoff
Dr.-Ing. A. Gronarz
Dipl.-Ing. R. Henn
Dipl.-Math. R. Kaiser
Dipl.-Ing. S. List
Dr.-Ing. C. Thill

Projektleiter:

Dr.-Ing. T. Jiang
Dr.-Ing. C. Thill

Direktor:

Prof. Dr. P. Engelkamp

**SIMUBIN – Modellierung und Simulation der realitätsnahen
Schiffsbewegungen auf Binnenwasserstraßen**

Teil A: Zusammenfassung

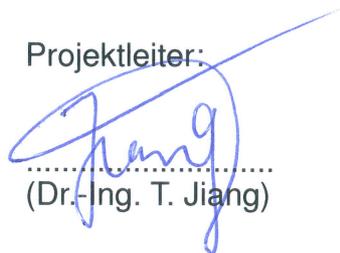
Duisburg, im Juni 2009

Fachbereich Schiffshydrodynamik

Bearbeiter:


.....
(Dr.-Ing. C. Thill)

Projektleiter:


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

Projektleiter:


.....
(Dr.-Ing. C. Thill)

DST – Entwicklungszentrum für
Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.


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

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Überblick	2
2	Methoden	3
2.1	Experimente	3
2.1.1	Modelle	3
2.1.2	Versuche	4
2.1.3	Auswertung der Modellversuche	10
2.2	Numerische Methoden	17
2.2.1	UNOPAM	17
2.2.2	Lock	18
2.2.3	BELock	19
2.2.4	BEShiWa	20
2.2.5	MOUSE	22
2.2.6	CFX	26
3	Ergebnisse	31
3.1	Experimente	31
3.2	Numerische Berechnungen	37
3.2.1	Berechnungen mit dem Boussinesq-Ansatz	37
3.2.2	Berechnungen mit dem RANSE-Ansatz	41
4	Zusammenfassung	48

Abbildungsverzeichnis

1	Änderung des Trimms beim Überfahren einer Bodenschwelle	5
2	Binnen-Großcontainerschiff beim Passieren eines Brückenpfeilers in Strömung	6
3	Jumbo-Containerschiff an der PMM-Anlage	6
4	Extremfall: Jumbo-Containerschiffsmodell (2093 kg) überholt Binnenschiffsmodell (48 kg)	8
5	Strömungsvektoren in der Hafenumündung	9
6	Container-Feederschiff in der Hafenumündung mit Strömung	9
7	Gütermotorschiff bei der Einfahrt in die Schleuse	10
8	Auswerteprogramm für die instationären Versuche	11
9	Datenbankprogramm für die Passierversuche	12
10	Genereller Verlauf von Kräften, Momenten, Absenkung und Trimm beim Passieren	13
11	Interaktive nichtlineare Regression im Datenbankprogramm	14
12	Beispiel für die Interpolation mit DARWIN (Zielfunktion und 10 beste Funktionen)	15
13	Beispiel für die Extrapolation mit DARWIN (10 Funktionen bei Längensvariation)	16
14	Bestimmung der Strömungsverteilung über die Schiffslänge (Hafenausfahrt)	16
15	Zusammenhang zwischen Seitenkraft und mittlerer Queranströmung	17
16	Wasseroberflächenverformung aus UNOPAM	17
17	Beiwerte der Seitenkraft und des Giermomentes	18
18	Schematische Darstellung der Gitterverknüpfungen	24
19	Schematische Darstellung der Randbedingungen	29
20	Änderung der Längskraft beim Überholvorgang mit unterschiedlichen Längen	31
21	C_{YB} und C_{NB} bei unterschiedlicher Länge	32
22	C_{YB} und C_{NB} beim Begegnen zweier GMS	32
23	Absenkung z über der Geschwindigkeit	33
24	Gleichgewichtsbedingung bei Fahrt entlang einer Wand	33
25	Feeder - Seitenkraft und Giermomente für alle Kursrichtungen	34
26	Schleuse - freie Schleuseneinfahrt mit hoher Geschwindigkeit	35
27	Unterschiedliche Strömungsverteilungen	35
28	Wendemanöver in inhomogener Strömung	36

29	Absenkung der Großausführung als Funktion der Geschwindigkeit für verschiedene Wassertiefen-Tiefgangs-Verhältnisse	38
30	Geometrie der Schleuseneinfahrt (links) und Geschwindigkeit-Weg-Diagramm (rechts)	39
31	Vergleich der mit BELock berechneten Wellen mit dem Experiment	40
32	Beispiel einer überlagerten Bewegung mit sechs Freiheitsgraden	41
33	Beispiel zweier gegenläufiger Rotoren	42
34	Einbettung zweier Oversetgitter in ein Hintergrundgitter	42
35	Beispiel zweier Körper mit sich kreuzenden Bahnen	42
36	Verlauf der Seitenkraft beim Überholvorgang	43
37	Verlauf der dimensionslosen Seitenkraft (links) und Giermoment (rechts) in Abhängigkeit vom Driftwinkel	44
38	Strömungsbild bei großen Driftwinkeln	45
39	Verlauf der Seitenkraft bei sehr großen Driftwinkeln, gemessen und gerechnet (links), vollständig gerechnet (rechts)	45
40	Vergleich Seitenkraft	46
41	Abhängigkeit der Ruderkraft von der Wassertiefe	46
42	Abhängigkeit der Ruderkraft vom Ruderwinkel	47

Tabellenverzeichnis

1	Versuchsschiffe	3
2	Baukastensystem	4
3	Überblick über die Modelle	7
4	Modellkombinationen	8

1 Einleitung

Die Binnenschifffahrt leistet in Deutschland einen wichtigen Beitrag zur Bewältigung der Verkehrsaufgaben. Dennoch werden die Potentiale dieses umweltfreundlichen Verkehrsträgers [1] bisher nur unbefriedigend genutzt. Gerade aus gesamtwirtschaftlicher Sicht ist aber eine stärkere Einbindung aller Verkehrsträger erforderlich, um die steigende Verkehrsnachfrage zu bewältigen. Auch von politischer Seite wird immer wieder betont, dass die wirtschaftliche Entwicklung durch Engpässe im Verkehrsbereich gefährdet wird, wenn nicht die Potentiale aller Träger genutzt werden. Neben zusätzlichen Investitionsmitteln wird deshalb eine optimale Nutzung der vorhandenen Wasserstraßeninfrastruktur gefordert, damit Schiffe mit hinreichender Größe und Abladetiefe eingesetzt werden können.

Mit *hinreichender Größe und Abladetiefe* ist gemeint, dass bei einer Vergrößerung des Schiffskörpers der spezifische Verbrauch bei gleicher Transportleistung sinkt. Solche maßstabsvergrößerten Binnenschiffe dürfen aber die Sicherheit des Transports nicht herabsetzen und müssen daher ihre Manövriereigenschaften möglichst bereits in der Planungsphase ausreichend unter Beweis stellen. Hierzu müssen Schiffsbewegungen auf Binnenwasserstraßen realitätsnah modelliert werden können; dafür hat dieses Projekt weitere notwendige theoretische und erfahrungsmäßige Grundlagen bereitgestellt.

Die Attraktivität des Berufsbildes in der Binnenschifffahrt sowie die vergleichsweise lange Ausbildung kann dabei zu Engpässen im Personalbereich führen, sodass die weitere Entwicklung der Binnenschifffahrt nachteilig beeinträchtigt werden kann.

Ein Instrument zum Abbau dieser Defizite und zur Stärkung der deutschen Binnenschifffahrt bildet ein spezifischer Flachwasserfahr Simulator, der sowohl

1. für flachwasserorientierte F+E-Projekte als auch
2. für die Erstausbildung und Weiterbildung von Binnenschiffern und Schiffsführern

eingesetzt werden kann. Dabei handelt es sich bei dem Flachwasserfahr Simulator um ein sehr anspruchsvolles Projekt, bei dessen Umsetzung realistischerweise nur ein schrittweises Vorgehen möglich ist. Dies liegt vor allem daran, dass ein den Anforderungen genügender Flachwasserfahr Simulator nicht zum Standardprogramm der Hersteller zählt, sondern neben diverser Anpassungen umfangreicher Entwicklungsarbeiten

bedarf, die entsprechendes Fachwissen auf dem Gebiet der Flachwasserhydrodynamik voraussetzen. Das vorliegende Projekt SimuBin versteht sich als Beitrag zu einem dieser Schritte.

Kernziel des Forschungsvorhabens SimuBin war die Entwicklung eines umfassenden mathematischen Modells, welches eine realitätsnahe Simulation der Schiffsbewegungen in unterschiedlichen Flachwasserumgebungen und Verkehrssituationen ermöglicht. Letztinstanzlich wird dieses Projekt zur Optimierung neuer Binnenschiffe beitragen und damit die Voraussetzungen zu einer Netto- CO_2 -Reduktion durch einen stimulierten Modalshift schaffen.

Bei der Durchführung dieses Projekts ist experimentell und theoretisch, d.h. durch Anwendung von CFD-Methoden, vorgegangen worden. Zu beiden Ansätzen liegen entsprechende detaillierte Abschlussberichte vor. Der vorliegende Bericht soll eine Zusammenfassung des ganzen Projekts bieten, dazu wird, wo nötig, auf die ausführlichere Beschreibung in den Teilberichten verwiesen.

1.1 Überblick

In den experimentellen und theoretischen Untersuchungen innerhalb des Projekts SimuBin wurde die naturnahe Nachbildung von z.B. Schleusen und Hafeneinfahrten und eine weite Bibliothek an Schiffstypen realisiert. Durch systematische Analysen von Messungen wurden fundierte physikalische Grundkenntnisse über die Interaktion zwischen Schiff und Fahrwasserbegrenzung erzielt. In den numerischen Untersuchungen wurden einerseits ein RANSE-Löser unter Berücksichtigung der Verformung der Wasseroberfläche für die Berechnung der Schiffsumströmung in einem Hafenbecken mit und ohne Strömung und andererseits ein auf der Flachwassertheorie basierendes Programm für die Berechnung der Schiffswellen und der dynamischen Tiefertauchung erfolgreich eingesetzt. Dabei konnten die umfangreichen numerischen Berechnungen effizient nur mit dem im Projekt bereitgestellten Rechen-Cluster durchgeführt werden.

2 Methoden

Bei der Bearbeitung des Forschungsvorhabens wurden sowohl Modellversuche (Experimental Fluid Dynamics - EFD) als auch Computersimulationen (Computational Fluid Dynamics - CFD) durchgeführt. Bei den Experimenten ist im Wesentlichen auf eine systematische Variation von Schiffstypen und Umweltbedingungen (Geometrie z.B. der Schleuse etc.) geachtet worden. Bei den Simulationen sind verschiedene Programme angewendet worden, d.h. eigene Entwicklungen wie MOUSE und BESHwa aber auch kommerzielle RANSE-Löser (CFX-5).

2.1 Experimente

Neben den numerischen Untersuchungen sind systematische Modellversuche durchgeführt worden. Die Notwendigkeit hierfür ergibt sich aus den folgenden Gründen:

- verlässliche Vergleichswerte für die Validierung der numerischen Berechnungen bereit zu stellen,
- die Datenbasis effizient zu erweitern, da ein einmal aufgebautes Experiment schneller und kostengünstiger Variationen von regelbaren Parametern zulässt.

2.1.1 Modelle

Während im vorangegangenen Projekt „*Sicherbin*“ nur Binnenschiffe untersucht wurden, wurden in „*Simubin*“ auch Seeschiffstypen verwendet, da auch diese Schiffe in begrenzter Wassertiefe operieren. Folgende Typen wurden im Maßstab 1:40 bzw. in einem Fall auch im Maßstab 1:16 verwendet:

Tab. 1: Versuchsschiffe

Typ	Jumbo	Panmax	Feeder	Bulker	Binnenschiff
Lpp	345,00 m	229,00 m	126,00 m	244,00 m	110,00 m
B	46,00 m	32,20 m	21,30 m	35,50 m	11,40 m
T	13,20 m	10,80 m	7,40 m	13,40 m	2,80 m
C_B	0,64	0,64	0,63	0,85	0,88
Maßstab	40	40	40	40	16

Für eine spezielle Ergänzungsuntersuchung, deren Erfordernis sich im *Sicherbin*-Projekt ergab, wurde zusätzlich noch eine Modellkombination zum Thema „Längenvariation“ verwendet. Dabei handelte es sich um ein Baukastensystem, aus dem mit vorhandenen

Modellteilen eine Paarung von Schiffen zwischen 50 und 250 m mit einer ungefähren Schrittweite von 25 m zusammengestellt werden konnte. Basis für die Längenvariation war der Typ „Binnenschiff“ im Maßstab 1:16 mit einer Breite von 11,4 m und einem Tiefgang von 2,8 m.

2.1.2 Versuche

Längenvariation Da bei dieser Untersuchung die unterschiedlichen Schiffslängen im Vordergrund standen, sind diese Experimente alle mit konstanter Wassertiefe von 4 m (alle Angaben für die Großausführung) und einem konstanten lichten Abstand von 10 m durchgeführt worden. Bei den Begegnungsversuchen wurden gleiche Geschwindigkeiten verwendet (10 und 15 km/h), bei den Überholversuchen überholte ein Schiff mit 15 km/h ein Schiff, welches mit 10 km/h fuhr. Durch das Baukastenprinzip konnten viele Längenverhältnisse L_1/L_2 zwischen 0,2 und 5,0 untersucht werden. Beispielhaft sei an dieser Stelle ein zusammengefasstes Ergebnis dieser Untersuchungsreihe wiedergegeben. Die Daten sind über die relative Längenposition $x_r = \frac{x}{0,5 \cdot (L_1 + L_2)}$ aufgetragen.

Tab. 2: Baukastensystem

Typ	Bezeichnung	Länge [m]
Hinterschiff	A	33,2
Hinterschiff	B	70,2
paralleles Mittelschiff	C	11,6
paralleles Mittelschiff	D	24,0
paralleles Mittelschiff	E	39,4
paralleles Mittelschiff	F	65,0
Vorschiff	G	17,5
Vorschiff	I	32,9
Vorschiff	J	38,3
Vorschiff	K	76,8
Baukasten	gerundete Länge	tatsächliche Länge [m]
AG	50	50,7
ADG	75	74,7
ADJ	100 a	95,5
BI	100 a	103,1
BDI	125 a	127,1
BEG	125 b	127,1
BEJ	150	147,9
BDK	175	171,0
BDFJ	200	197,5
BEFK	250	251,4

Untiefe Eine weitere Untersuchung, die die Ergebnisse von SicherBin abrunden soll, ist das Überfahren eines Wassertiefensprungs. Im vorlaufenden Projekt wurden Bodenschwellen untersucht, die jedoch im Verhältnis zur Schiffslänge sehr kurz waren. Hier wurde jetzt eine Schwelle angeordnet, die einer Wassertiefenverminderung von wiederum 80 cm in der Großausführung entspricht, nun aber mit einer Ausdehnung mehr als der 2-fachen Schiffslänge.

Damit konnte das Verhalten des Schiffes auf Wassertiefensprünge bei verschiedenen Wassertiefen untersucht werden. Die folgende Abbildung 1 zeigt die geglätteten Werte des Trimms beim Überfahren der Untiefe.

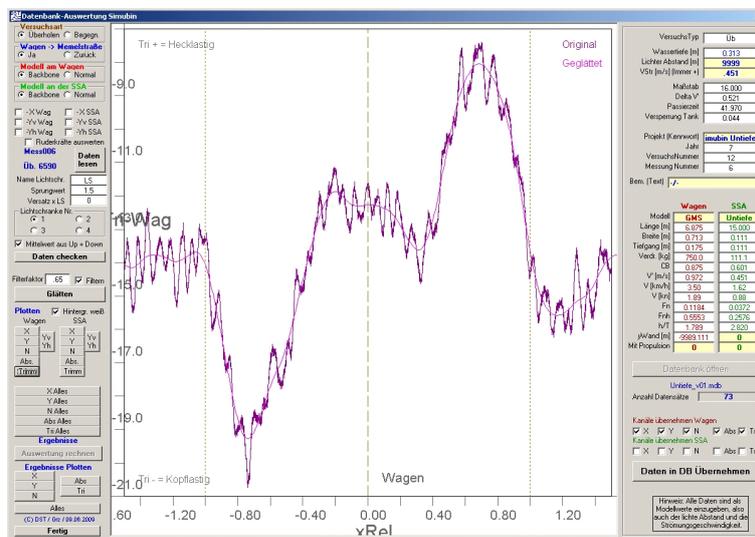


Abb. 1: Änderung des Trimms beim Überfahren einer Bodenschwelle

Brückenpfeiler in Strömung In einer dritten Versuchsreihe wurde das Passieren von Brückenpfeilern in Strömung untersucht. Aufbauend auf den Erfahrungen mit einem kleinen Brückenpfeiler in SicherBin wurden diesmal relativ massive (historische) Pfeiler ausgewählt, die in verschiedenen Längen und Breiten hergestellt wurden. Zusätzlich zum Einzelpfeiler wurde auch ein Brückentor eingebaut, das die Modelle bei Strömung gefesselt passieren mussten. Das Foto in Abbildung 2 zeigt ein Beispiel, bei dem ein Großmotorschiff einen neuen Pfeiler passiert.



Abb. 2: Binnen-Großcontainerschiff beim Passieren eines Brückenpfeilers in Strömung

PMM-Versuche Zur Identifikation der hydrodynamischen Beiwerte wurden mit den gebauten Modellen der drei Containerschiffe Planar-Motion-Versuche durchgeführt, siehe Abbildung 3.



Abb. 3: Jumbo-Containerschiff an der PMM-Anlage

Diese beinhalteten generell Schrägschleppversuche sowie Sway-, Yaw- und Yaw & Drift-Versuche mit dem „bare hull“ (Schiffsrumpf ohne Propeller und Ruder). Zusätzlich wurden mit dem Panmax-Containerschiff auch Versuche mit Ruder und Propeller durchgeführt, um Daten für die detaillierte Modellierung von Antrieb und Ruder bereitzustellen. Mit diesem Modell wurde auch eine feine Abstufung der Wassertiefen untersucht, die

Aufschluss über die Wassertiefenabhängigkeit der einzelnen hydrodynamischen Koeffizienten geben wird. Die Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Modelle und die untersuchten Wassertiefen bzw. das Verhältnis h/T (Wassertiefe zu Tiefgang).

Tab. 3: Überblick über die Modelle

Modell	Lpp	Zustand	Wassertiefe	h/T
Feeder	126 m	bare hull	12,5 m	1,7
			17 m	2,3
Panmax	229 m	Propeller & Ruder	17 m	1,7
			17 m	1,7
		bare hull	16 m	1,6
			15 m	1,5
			14 m	1,4
			13 m	1,3
			12 m	1,2
Jumbo	345 m	bare hull	11,5 m	1,15
Jumbo	345 m		17 m	1,3
			22,5 m	1,7

Überholen und Begegnen In Ergänzung zu den im Vorgängerprojekt „Sicherbin“ durchgeführten Untersuchungen, die im vergangenen Berichtszeitraum noch durch Spezialversuche (Längenvariation) ergänzt wurden, wurden auch Überholversuche mit Seeschiffen durchgeführt. Als Fahrtgebiet für die meisten Untersuchungen wurde die Elbe mit einer angenommenen Wassertiefe von 17 m festgelegt. Hauptvariationsparameter waren die Geschwindigkeiten und die seitlichen Abstände sowie für eine Modellkombination (Panmax - Feeder) auch die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung bzw. für Jumbo - Feeder auch die Wassertiefe. Während der Versuche wurde auch noch ein zusätzliches Modell aus dem Bestand des DST hinzugenommen, nämlich ein Tanker, der sich durch einen besonders großen Völligkeitsgrad C_B auszeichnete und der von den Abmessungen mit dem Panmax-Containerschiff vergleichbar war. Tabelle 4 gibt eine Übersicht über die Modellkombinationen, die untersucht wurden.

Auf die Durchführung von Begegnungsversuchen wurde zugunsten einer detaillierteren Parametervariation bei den Untersuchungen von Überholvorgängen verzichtet. Dies ist darin begründet, dass wegen der hohen Differenzgeschwindigkeiten beim Begegnen $dV = V_1 + V_2$ ($dV = V_1 - V_2$ beim Überholen) das Manöver so schnell abläuft, dass die Schiffe in der Realität wegen der großen Trägheiten beim Begegnen nur wenig Zeit haben, um z.B. durch Kursänderungen auf die wirkenden Interaktionskräfte zu reagieren. Aus diesem Grund ist das Gefahrenpotenzial beim Begegnen durch die weniger

Tab. 4: Modellkombinationen

Jumbo	Feeder
Panmax	Feeder
Panmax	GMS
Feeder	GMS
Jumbo	GMS
Tanker	GMS
Feeder	Tanker
Panmax	Tanker

stark ausgeprägten Kraftwirkungen erheblich geringer, wenn auch das Ausmaß eines Schadens bei Kollisionen wegen der höheren Relativgeschwindigkeit wächst. Ein Beispiel für die „fühlbare“ Wechselwirkung und vor allem die bisweilen lange Dauer eines gefährlichen Überholmanövers ist in Abbildung 4 zu sehen.



Abb. 4: Extremfall: Jumbo-Containerschiffsmodell (2093 kg) überholt Binnenschiffsmodell (48 kg)

Hafeneinfahrt in Strömung Um die Abhängigkeit der am Schiff wirkenden Kräfte und Momente durch über der Länge unterschiedlicher Strömungsverteilung darzustellen, wurde im Schlepptank eine Hafeneinfahrt aufgebaut, an der das Wasser entlang strömen konnte. Mit den Modellen Panmax, Feeder (Abbildung 6) und GMS (Binnenschiff) im Maßstab 1:40 wurden die wirkenden Kräfte für eine Vielzahl verschiedener Positionen (x, y und Kurswinkel) des Modells in der Hafenmündung aufgezeichnet und diese dem aktuellen Strömungszustand, der vorher ohne Modelle gemessen wurde, gegenübergestellt. In Abbildung 5 sind die gemessenen Strömungsvektoren und eine beispielhafte Position des Feeders wiedergegeben.

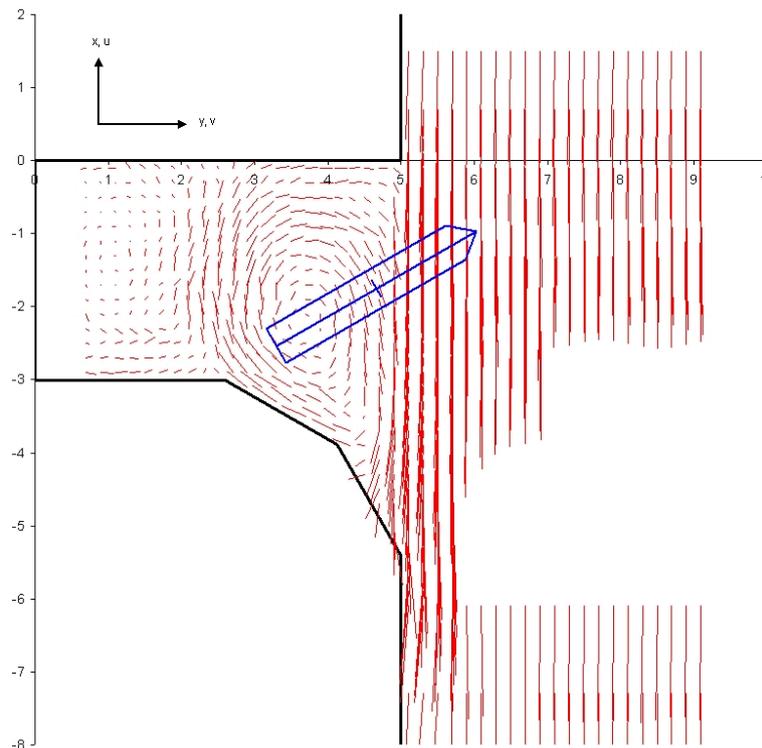


Abb. 5: Strömungsvektoren in der Hafenumündung



Abb. 6: Container-Feederschiff in der Hafenumündung mit Strömung

Schleuseneinfahrt mit Binnenschiff Mit der oben angesprochenen Hafenumündung wurde zeitgleich eine Schleuse (aber diesmal im Maßstab 1:16) aufgebaut. Mit dem Modell eines Binnenschiffs (GMS) wurden für verschiedene Beladungszustände und

Anlaufgeschwindigkeiten sowohl gefesselte als auch frei gefahrene Ein- und Ausfahrten aus der Schleuse durchgeführt, siehe Abbildung 7. Bei den gefesselten Versuchen wurden die Längskraft sowie Trimm und Absenkung gemessen, bei den frei gefahrenen Ein- und Ausfahrten die genaue Lage und Geschwindigkeit des Modells aufgezeichnet. Zusätzlich wurden die Strömungsgeschwindigkeiten an der Einfahrt und in der Schleuse sowie an verschiedenen Positionen der aktuelle Wasserstand abgespeichert. Diese Daten sollen dazu dienen, ein Zustandsmodell des Falles „Schiff in Schleuse“ zu erstellen, mit welchem für verschiedene Ausgangsparameter die Ein- und Ausfahrt im Simulator realitätsnah dargestellt werden kann.



Abb. 7: Gütermotorschiff bei der Einfahrt in die Schleuse

2.1.3 Auswertung der Modellversuche

Auswertung der instationären Kraftmessung Sowohl die Überholversuche (bewegtes Target) als auch die Passierversuche an Hindernissen wurden mit der gleichen neu entwickelten Software ausgewertet. Diese basiert auf den im vorangegangenen Projekt „SicherBin“ gemachten Erfahrungen und stellt eine deutliche Weiterentwicklung dar. In der Abbildung 8 ist die Auswertung mit dem Programm beispielhaft wiedergegeben. Im Gegensatz zu der auf Excel basierenden „Datenbank“ wurde zu einer echten Access-Datenbank übergegangen. Dies war wegen der Menge an Daten erforderlich, die von einer Tabellenkalkulation nicht mehr bewältigt werden konnte.

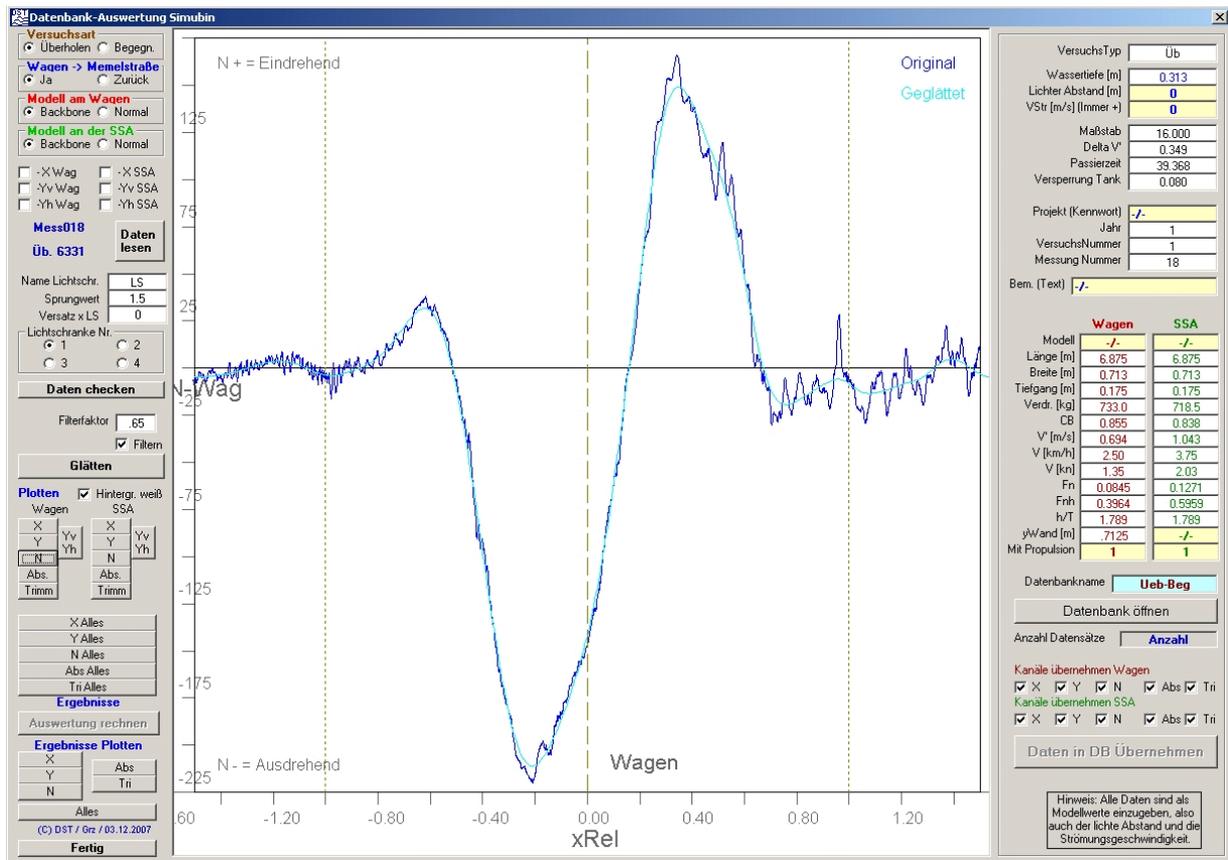


Abb. 8: Auswerteprogramm für die instationären Versuche

Die Datenbankapplikation erlaubt es jetzt, aus dem gesamten Datenbestand (SicherBin und SimuBin) Gruppen von Messungen nach verschiedensten Kriterien zu selektieren, zu plotten und in verschiedensten Arten für eine weitere Bearbeitung zu exportieren. In Abbildung 9 ist die Benutzeroberfläche dieses Programms dargestellt.

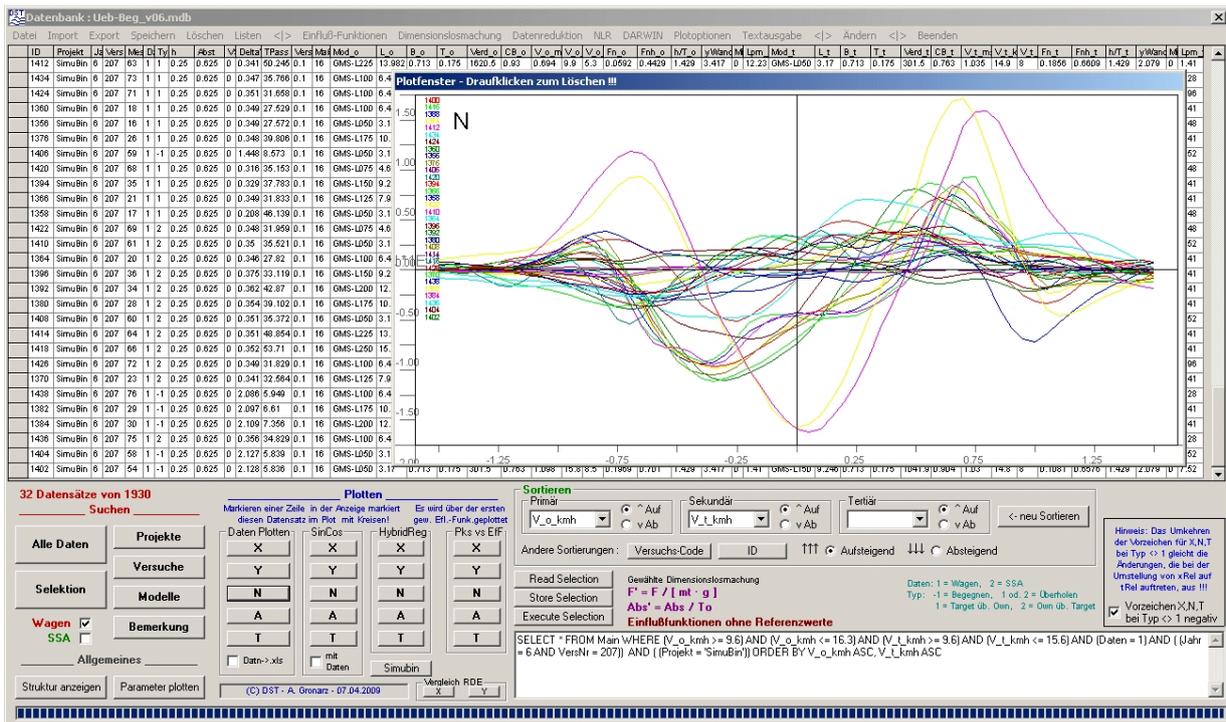


Abb. 9: Datenbankprogramm für die Passierversuche

Aus der Datenbank können Teil-Datensätze exportiert werden, um mit einem nichtlinearen Regressionsverfahren weiter verarbeitet zu werden, um eine mathematische Modellierung für die Kräfte und Momente beim Überholen, Begegnen und Passieren zu finden. Als Alternative sind beide unten aufgeführten Verfahren zur Modellbildung bzw. Interpolation (NLR und DARWIN) in das Datenbankprogramm integriert worden, um mit direktem Zugriff auf die Datenbank die Analysen durchführen zu können.

Konservative Modellierung durch nichtlineare Regression (NLR) Allen Passierversuchen, sei es Überholen und Begegnen, aber auch die Passage von Brückenpfeilern oder Untiefen ist zueigen, dass das „Ereignis“ in Form eines instationären Kraftverlaufes sich innerhalb der Bereiche -1 (=erste Überlappung) Bug mit dem Objekt, 0 (=Situation Mitte an Mitte) und $+1$ (=letzte Überlappung Heck) mit dem Objekt skalieren lässt. Hierbei ist es unerheblich, ob das Objekt ein Schiff, ein Brückenpfeiler oder eine Bodenschwelle ist. Mit dieser Betrachtungsweise und der Kenntnis, dass es sich, wie aus der allgemeinen Darstellung der Kräfte eines Überholvorgangs (siehe Abbildung 10) hervorgeht, um eine gedämpfte harmonische Schwingung handelt, kann ein allgemeiner Ansatz für eine Modellierung entwickelt werden.

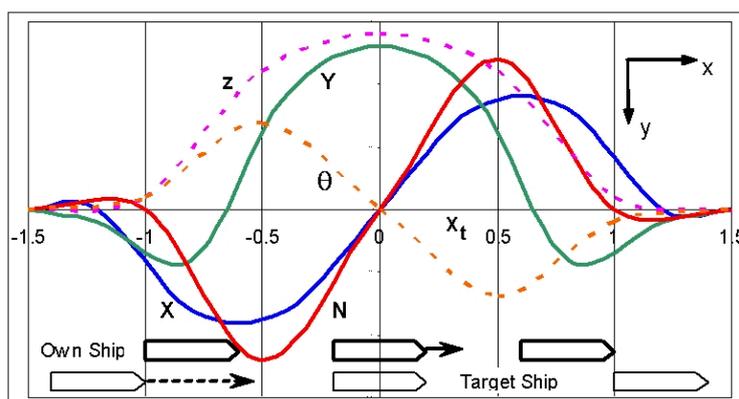


Abb. 10: Genereller Verlauf von Kräften, Momenten, Absenkung und Trimm beim Passieren

Dieser Ansatz gliedert sich in einen Term für die Amplitude, die Dämpfung und die Schwingung und ist in der Lage, alle oben dargestellten Verläufe nachzubilden.

$$F = A \cdot e^{(-1.5|x_r|^B)} \cdot \sin(\pi \cdot C \cdot x_r - D) \quad (1)$$

Die Variablen A , B , C und D bestimmen die Charakteristik dieser Funktion und können selbst von den Zustandsparametern, die den Passiervorgang beschreiben, abhängig gemacht werden. Dies geschieht durch so genannte Einflussfunktionen, die aus den Parametern gebildet werden. Durch Wahl eines geeigneten Exponenten kann für jede Einflussfunktion festgelegt werden, wie stark Veränderungen in der Gesamtformel von der spezifischen Einflussfunktion abhängen. Damit lässt sich z.B. die Amplitude A wie folgt beschreiben:

$$A = y^{Ay} \cdot h^{Ah} \cdot V^{AV} \cdot m^{Am} \quad (2)$$

Die gleiche Vorgehensweise kann bei der Spannweite der Dämpfung B , der Frequenz der Schwingung C sowie der Phasenverschiebung D angewandt werden, wobei die Anzahl und Auswahl der Einflussfunktionen von der festgestellten Änderung und der damit verbundenen Korrelation abhängen. Die fertige, höchst komplizierte Formel ist nichtlinear und lässt sich mit herkömmlichen linearen Regressionsverfahren nicht bearbeiten. Ein nichtlineares Verfahren nach Levenberg-Marquardt [2] ermöglicht die Bestimmung der einzelnen Exponenten und wurde in das Datenbankprogramm implementiert (siehe Abbildung 11).

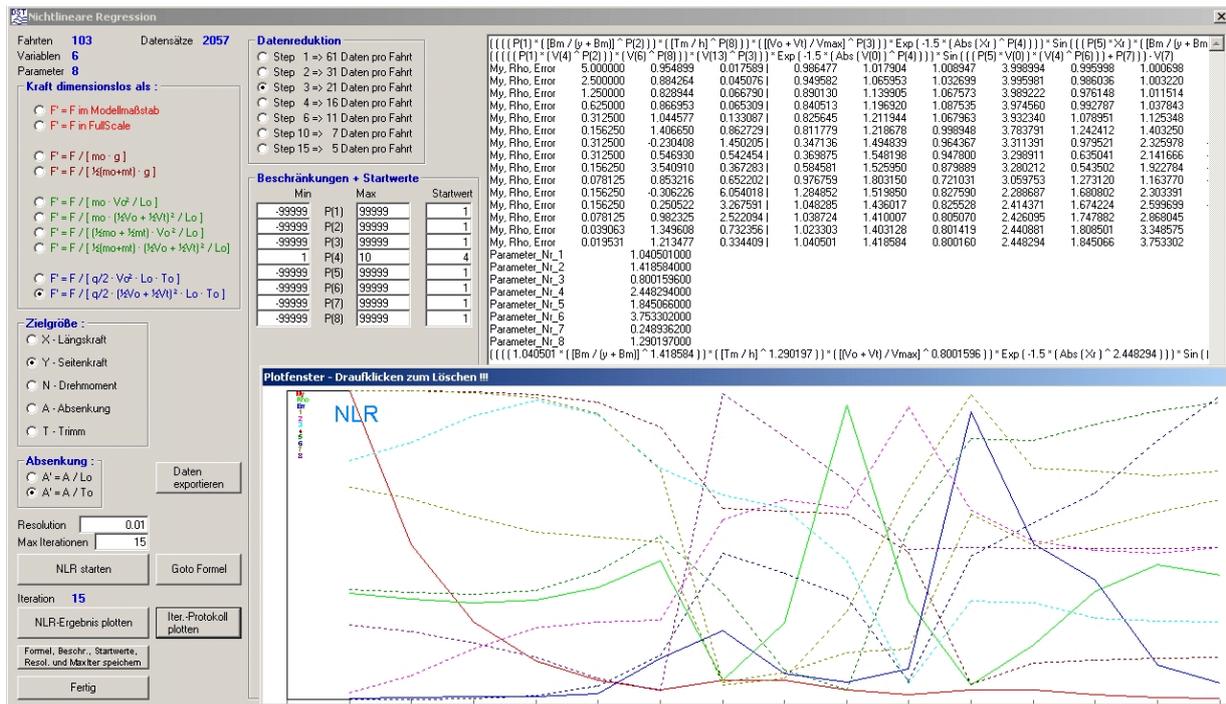


Abb. 11: Interaktive nichtlineare Regression im Datenbankprogramm

Für einfache Fälle ergeben sich bereits sehr komplexe mathematische Zusammenhänge; das Hinzukommen von Einflüssen wie Strömung, unterschiedliche Längen oder Blockkoeffizienten verkompliziert die Zusammenhänge jedoch derart, dass hier die Suche nach einer geeigneten Formulierung praktisch nicht mehr durchführbar wird. Hinzu kommt noch, dass gerade bei der Längenvariation (siehe die Längskraft für das extreme Verhältnis $L_1/L_2 = 0,2$ in der Darstellung zu den Versuchen im vorangegangenen Kapitel) die Charakteristik der Kurven deutlich von dem abweicht, was durch die gedämpfte harmonische Schwingung dargestellt werden kann. Damit entwickelt sich die „konservative Modellierung“ zu einer strategischen Sackgasse, aus der nur durch eine gänzlich andere Vorgehensweise ein Ausweg gefunden werden kann.

Datenreduzierungs- und Wichtungsinterpolation (DARWIN) Ein solcher Ausweg ist in einer Abkehr von der Modellierung durch Formeln gegeben. Da den Formeln auch immer das Problem der „Statik“ (Bindung an die der Regression zugrunde liegenden Daten) anhaftet, ist ein „dynamisches“ Verfahren durch höhere Flexibilität gekennzeichnet. Das hier entwickelte Verfahren DARWIN (vorher noch „multidimensionale gewichtete Interpolation“ genannt) erfüllt diese dynamischen Eigenschaften, da es zur Berechnung der Kräfte und Momente (aber auch von Trimm und Absenkung) immer auf den vorhandenen Gesamtdatenbestand z.B. die hier erstellte Datenbank zugreift.

Für eine beliebige Kombination von Zielparametern wie Wassertiefe, Seitenabstand, Geschwindigkeiten und Objektmessungen werden die Einflussfunktionen (analog zu NLR) bestimmt und die Einflussfunktionen der in der Datenbank abgelegten Versuchsergebnisse analysiert. Normierung und Bestimmung des euklidischen Abstandes in der multidimensionalen Wolke aller Einflussfunktionen führt zu einer Rangfolge der Versuche, die am besten zu der Zielparameterkonfiguration passen. Die nun folgende Bestimmung der Wichtung ermöglicht es dann, die Einzelergebnisse der selektierten Messungen unter Multiplikation mit den ermittelten Wichtungen zu einem Zielwert aufzusummieren. Im Beispiel in den Abbildungen 12 und 13 wurde DARWIN dazu benutzt, um zu einem existierenden Versuch, bei dem der „Jumbo“ den „Feeder“ überholt, einen alternativen Verlauf der Seitenkraft zu berechnen. In Abbildung 12 sind das Ergebnis sowie die gefundenen 10 „besten“ passenden Messungen dargestellt. Für den Fall, dass die Einflussfunktionen der Zielparameterkonfiguration den durch die Messungen der Datenbank gestützten Raum überschreiten, ist noch ein spezielles Verfahren zur Generierung von Stützwerten auf der Basis der vorhandenen Daten implementiert, um die Extrapolation stabil zu gestalten, vgl. Abbildung 13. Durch die Loslösung von physikalischen Zusammenhängen und damit auch von statischen Formeln ist es jetzt auch möglich, eine Längenvariation zu berechnen. Abgesehen von dem Vorzeichen, das auf eine mittlerweile geänderte Definition von x_r zurückzuführen ist, ist es erstaunlich, wie gut die doch extrem unterschiedlichen Verläufe der Längskraft bei einer Veränderung von L_0 von 1 m auf 20 m (bei $L_t = 8,625$ m) wiedergegeben werden.

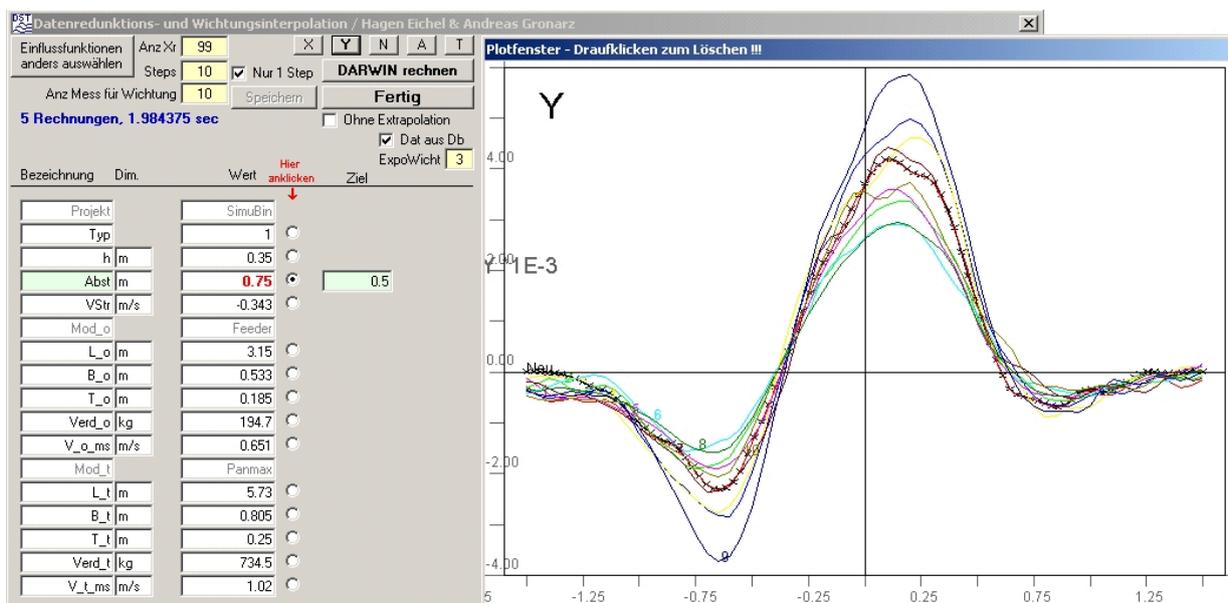


Abb. 12: Beispiel für die Interpolation mit DARWIN (Zielfunktion und 10 beste Funktionen)

Auswertung der Versuche mit inhomogener Strömung Für die Erfassung der Kraftwirkung auf ein Schiff in inhomogener Strömung wurde ein Rechenverfahren entwickelt, welches es erlaubt, aus der Verteilung der Strömungsvektoren in der Umgebung des Schiffes die Verteilung der Längs- und Querkomponenten der Strömung entlang der Schiffsachse (im schiffsfesten Koordinatensystem) zu bestimmen. Diese Verteilung (siehe Abbildung 14) wird mit den gemessenen Kräften in Relation gesetzt, um die mathematische Formulierung für den Einfluss der inhomogenen Strömung zu ermitteln. Für die Seitenkraft Y und den Driftwinkel in Abbildung 15 ergibt sich für einen bestimmten Schiffstyp eine klar ersichtliche Abhängigkeit.

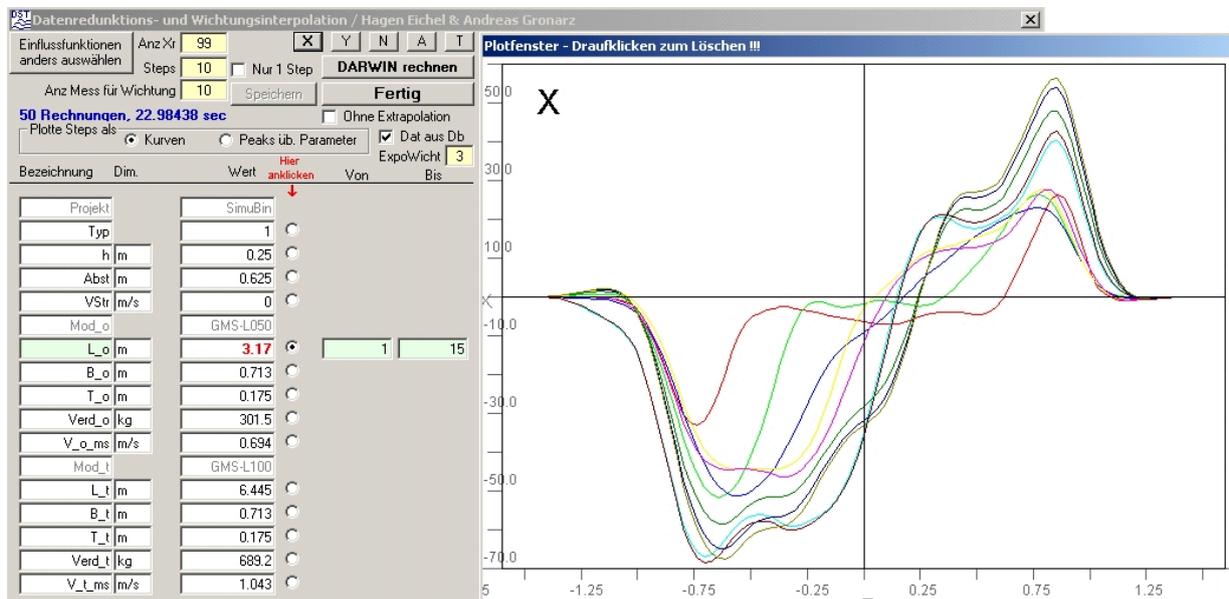


Abb. 13: Beispiel für die Extrapolation mit DARWIN (10 Funktionen bei Längenvariation)

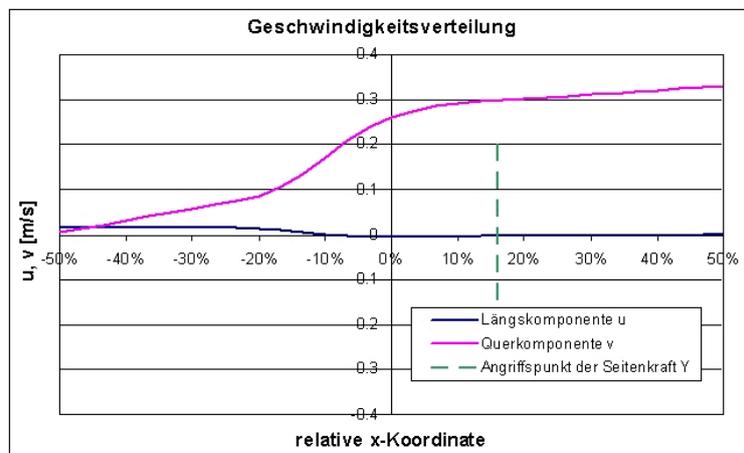


Abb. 14: Bestimmung der Strömungsverteilung über die Schiffslänge (Hafenausfahrt)

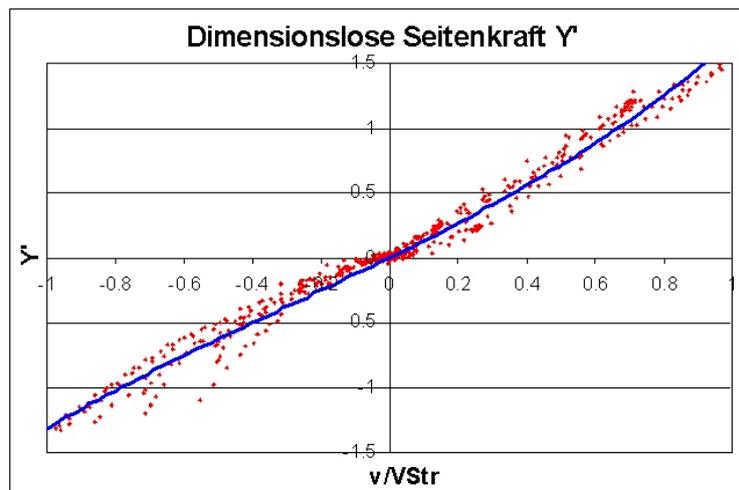


Abb. 15: Zusammenhang zwischen Seitenkraft und mittlerer Queranströmung

2.2 Numerische Methoden

2.2.1 UNOPAM

Um die Einsatzmöglichkeiten des Programmpaketes UNOPAM für Berechnungen bei größeren Gierwinkeln (größer 2 Grad) für geringe Wassertiefen und für völlige Binnenschiffe zu erweitern, wurden Veränderungen implementiert, die aber nur zu unwesentlichen Verbesserungen führten. Für die Berechnungen bei kleinen Gierwinkeln bis 2 Grad können die Oberflächenverformung des Wassers und die integralen Größen ausreichend genau ermittelt werden.

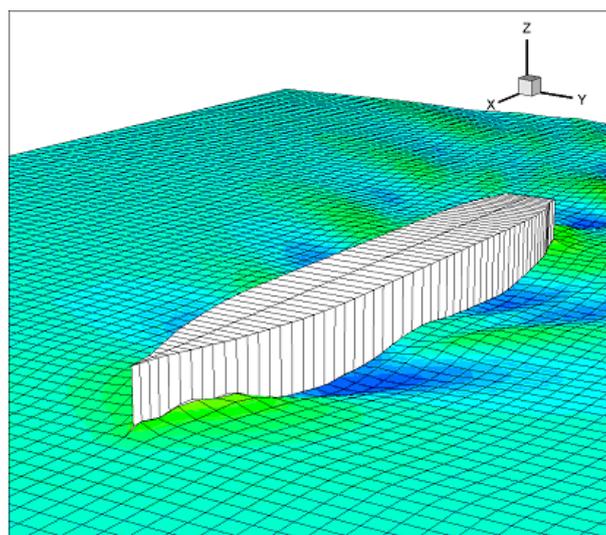


Abb. 16: Wasseroberflächenverformung aus UNOPAM

Die Abbildung 16 zeigt die Verformung der Wasseroberfläche bei einem Gierwinkel von 2 Grad und bei extremen Flachwasserbedingungen. Für größere Gierwinkel und kleinere h/T -Werte traten Konvergenzprobleme auf, die auch durch Modifikationen im UNOPAM-Code nicht wesentlich abgestellt werden konnten.

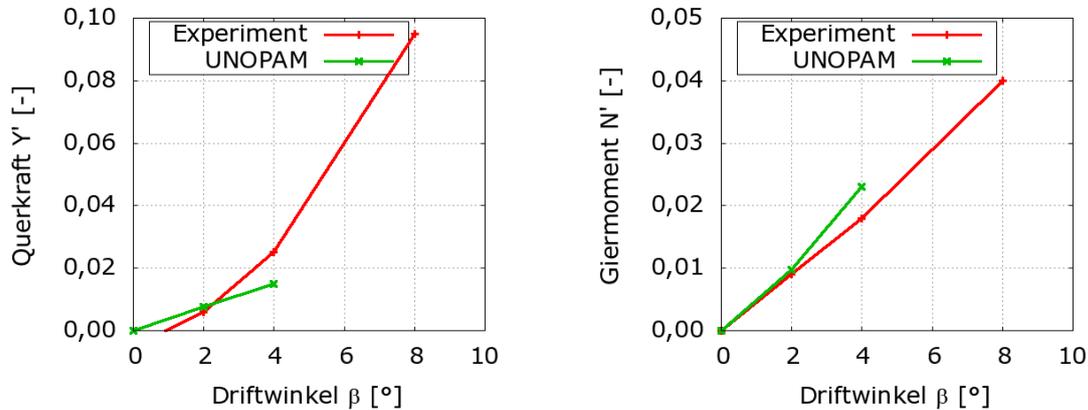


Abb. 17: Beiwerte der Seitenkraft und des Giermomentes

Nach Verbesserung des Konvergenzverhaltens konnten zwar auch Berechnungen mit größeren Gierwinkeln durchgeführt werden, jedoch wurde die Seitenkraft nicht korrekt ermittelt. In der Abbildung 17 sind die Beiwerte der Seitenkraft und des Giermomentes in Abhängigkeit vom Gierwinkel beispielhaft für eine Geschwindigkeit dargestellt. Die Berechnungsergebnisse wurden mit den experimentellen Untersuchungen verglichen und zeigen eine deutliche Abweichung bei einem Gierwinkel von 4 Grad.

Da für die Simulation von Manövern aber die Kräfte und Momente bei gerade solchen Driftwinkeln erforderlich sind, sind keine weiteren Anstrengungen mehr auf die Anpassung dieses Codes verwendet worden und sind weitere systematische Berechnungen mit den im Folgenden beschriebenen RANSE Codes ausgeführt worden.

2.2.2 Lock

Für die numerische Berechnung der Schleusenmanöver wurde das Programm Lock verwendet. Dieses wurde im DST entwickelt und bereits in einigen Projekten erfolgreich angewendet. Die Aufgabe ist, das Programm anhand der durchgeführten Modellversuche zu validieren, damit es zur Gewinnung der Datenbasis für die Flachwasserfahrtsimulation eingesetzt werden kann.

Programmbeschreibung Lock simuliert die instationäre Einfahrt in oder Ausfahrt aus einer Schleuse. Die Strömungsgleichungen werden durch analytische Vorbetrachtungen auf ein eindimensionales (d.h. durch Ausnutzung der Symmetrie vereinfachtes) numerisches Problem reduziert, wodurch sich ein sehr schnelles Berechnungsverfahren ergibt. In die Berechnung fließen die Dynamik des Schiffs (Trägheit, Rumpfkkräfte, Propellerkräfte) und die Geometrie des Zufahrtkanals und des Schleusenbeckens ein. Das Programm berechnet die instationär auf das Schiff wirkenden Kräfte in Längs- und Vertikal-Richtung und das Wellenbild. In der Berechnung wird entweder der Schub T oder die Propellerdrehzahl n konstant gehalten. Im ersten Fall kann der Schub durch den Gleichgewichtswert vor Erreichen des Trogtores ermittelt werden. Bei konstanter Drehzahl kann die quasistatische Propellerkurve K_T über J verwendet werden, um den momentanen Schub zu berechnen. Der Reibungswiderstand R_f wird permanent mit Hilfe der ITTC-1957 Formel und einer empirischen Geschwindigkeitserhöhungskorrektur ähnlich der von Emerson [3] aktualisiert. Die Längs-Bewegung ist linear entkoppelt von Absenkung und Vertrimmung, jedoch sind die Absenkung und die Vertrimmung gekoppelt.

2.2.3 BELock

Zur Verbesserung der Simulation von Schleusenmanövern wurde das neue Programm BELock entwickelt, das teilweise auf den theoretischen Grundlagen des alten Programms Lock von X.-N. Chen aufbaut, siehe vorherigen Abschnitt. Die Entwicklung von BELock erfolgte auf der Basis des Flachwasserlösers BESHiWa.

Das Programm simuliert die instationäre Einfahrt in oder Ausfahrt aus einer Schleuse. Die Strömungsgleichungen werden durch analytische Vorbetrachtungen auf ein eindimensionales numerisches Problem reduziert, wodurch sich ein sehr schnelles Berechnungsverfahren ergibt. In die Berechnung fließen die Dynamik (Trägheit, Rumpfkkräfte, Propellerkräfte) und die Kinetik (Tauch-, Stampf- und Längsbewegung) des Schiffs und die Geometrie des Zufahrtkanals und des Schleusenbeckens ein.

Beschreibung des Verfahrens Das Programm berechnet die instationär auf das Schiff wirkenden Kräfte in Längs- und Vertikal-Richtung und die daraus resultierenden Bewegungen sowie das Wellenbild. Alle diese Größen stehen in einer engen Wechselwirkung und können nicht unabhängig voneinander berechnet werden.

Mit den in Teil C des Abschlussberichts beschriebenen Ansätzen und Vereinfachungen ergibt sich folgendes Gleichungssystem, welches für die Simulation verwendet wird:

$$w_0 \zeta_t - S_t + u(A_{0x} + w_0 \zeta_x + w_{0x} \zeta - S_x) + u_x(A_0 + w_0 \zeta - S) = 0 \quad (3)$$

$$u_t + uu_x - \frac{h}{2}(h_{xx}u_t + h_x u_{tx} + hu_{txx}) + \frac{h^2}{6}(u_{txx}) + g\zeta_x = 0 \quad (4)$$

Zudem werden neben den üblichen Randbedingungen für (freie) Oberflächen die dynamische Trimm- und Tauchbewegung des Schiffs berücksichtigt. Die numerischen Berechnungen mit BELock wurden anhand der Experimente validiert.

2.2.4 BESHwa

Zur numerischen Berechnung der dynamischen Schwimmlage wird der Flachwasserlöser BESHwa verwendet. Dieses Programm kann die Berechnungen mit hoher Geschwindigkeit durchführen und somit in einer wirtschaftlichen Zeit einen großen Parameterraum bearbeiten. Die daraus gewonnenen Werte fließen in die Datenbasis zur multidimensionalen Interpolation ein.

Beschreibung des Verfahrens 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. 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 Wellenerhe-

bung $\zeta(x,y,t)$ und der vertikal gemittelten horizontalen Geschwindigkeitskomponenten

$$\bar{u}(x,y,t) = \frac{1}{h(x,y) + \zeta(x,y,t)} \int_{-h}^{\zeta} u(x,y,t) dz \quad (5)$$

und

$$\bar{v}(x,y,t) = \frac{1}{h(x,y) + \zeta(x,y,t)} \int_{-h}^{\zeta} v(x,y,t) dz \quad (6)$$

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. Details zum weiteren analytischen Lösungsweg werden im Abschlussbericht Teil C beschrieben.

Randbedingungen Im Gegensatz zu potentialtheoretischen Panelverfahren 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 BESHwa 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. Ergänzend sind Reibungsterme berücksichtigt worden. Es hat sich allerdings gezeigt, dass die Bodenreibung ohne vorhandene Grundströmung wenig Einfluss auf die Wellenbildung und die dynamische Schwimmelage der Schiffe hat.

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 schiffsnahe Strömung und die Fernfeldströmung asymptotisch verknüpft. So ergibt sich die mittlere transversale Geschwindigkeitskomponente aus der asymptotischen Außenentwicklung der Nahfeldlösung für das Fernfeld:

$$\bar{v}|_{y \rightarrow 0 \pm} = \mp \frac{1}{2(h + \zeta)} [S(x, t)(V - \bar{u})]_x \quad (7)$$

Die Spantflächen $S(x, t)$ werden aus der dreidimensional beschriebenen Schiffsgeometrie bei der Berechnung der Schwimmage ermittelt. Nach jedem Iterationsschritt wird die Schwimmage des Schiffes neu berechnet. Hierbei müssen das Kräftegleichgewicht in vertikaler Richtung und das Momentengleichgewicht um die Querachse erfüllt sein. Eine zuverlässige Berechnung der vertikalen Kräfte, die auf den Schiffsrumpf wirken, kann mit dieser Methode durchgeführt werden.

2.2.5 MOUSE

Die detaillierte Simulation der Umströmung von Schiffen ist je nach Anforderung an die Lösungsqualität und Aussagekraft sehr komplex. Im Gegensatz zu den meisten technischen Strömungssimulationsaufgaben ist zunächst die freie Oberfläche von Bedeutung, da diese einen inneren Rand der flüssigen Umströmung darstellt, dessen Verlauf von der Lösung selbst abhängt. Weiterhin werden Schiffe in erheblichem Maß von Umwelteinflüssen (Seegang, Strömungen, ...) beeinflusst und ihre Umströmung steht je nach Verkehrssituation in Wechselwirkung mit anderen Schiffen, Uferbegrenzungen oder Wasserbauten. Letzteres gilt aufgrund der relativen Enge besonders für die Binnenschifffahrt und für Verkehre in Hafenbereichen.

Zusammenfassend sind ausgehend von einer 3D inkompressiblen Strömungssimulationsmethode folgende zusätzliche Eigenschaften gefordert:

- freie Oberflächenmodelle
- relativ bewegte Objekte, ggf. rekursiv beweglich
- dynamische Rückkopplung

Die Grundlagen der auf dem Löserpaket MOUSE basierenden Entwicklungen werden im Folgenden kurz skizziert.

Eine ausführlichere Darstellung der Methoden ist z.B. in Stuntz [9] für die Oberflächenmethoden bzw. in Jiang [4] und Kaiser [5] für die Relativbewegung zu finden. Das in

MOUSE integrierte Oberflächenmodell basiert auf einem Level-Set Ansatz. In diesem ist die Position der Oberfläche als ausgezeichnete Iso-Wert, typischerweise 0, einer skalaren Feldfunktion dargestellt, die über eine Transportgleichung, im vorliegenden Fall passiv, bewegt wird. Die Level-Set Methode steht zunächst im Gegensatz zu den mittlerweile weit verbreiteten VOF-Methoden, die über die Massenerhaltung zweier Spezies definiert ist. Für beide Methoden lassen sich je deutliche Vor- und Nachteile finden, die hier jedoch nicht detailliert zur Diskussion stehen. Es sei jedoch vorweggenommen, dass VOF und Level-Set je auf Transportmodellen aufbauen und interessante Mischformen die Vorteile beider Methoden vereinen können, siehe Schneider [8].

Besonders anspruchsvoll ist die Relativbewegung verschiedener Objekte in gemeinsamer Simulation. Wiederum sind ausgehend von klassischen Simulationsmethoden verschiedene, im Wesentlichen drei, Ansätze möglich. Zunächst sei die Gitterverzerrung genannt, bei der Gitterbereiche zwischen den relativ zueinander bewegten Rändern mittels Relaxationsverfahren verformt und somit angepasst werden können. Bei unstrukturierten Gittern ist zudem eine periodische Umverknüpfung bis hin zur Entstehung bzw. Löschung von Elementen möglich (Vilsmeier [10]). Damit können großräumige Bewegungen prinzipiell realisiert werden; die Einschränkung auf unstrukturierte Gitter und die kaum denkbare Portierung auf parallele Rechner lassen die Methode ungeeignet erscheinen.

Wesentlich einfacher stellt sich die Methode der abgleitenden Gitter dar, welche vor einigen Jahren im Rahmen der MOUSE-Entwicklung bereits erprobt wurde. Ein Vorteil ist die relativ einfache Implementierung, weswegen diese Methoden vor allem in marktgängigen Softwareprodukten zu finden sind. Nachteilig sind jedoch die geometrischen Beschränkungen, da Relativbewegungen nur über abgleitbare Flächen (i.A. Ebenen, keilförmige Mantelflächen oder Kugelflächen) realisiert werden können. Für die Simulation komplexer Schiffsverkehre scheiden die auf abgleitenden Gittern basierenden Verfahren somit aus. Beispielsweise können mit ihnen keine Trajektorienkreuzungen simuliert werden, wie sie bei Schiffsbewegungen vorkommen können.

Als dritte Variante der Simulation relativ bewegter Objekte sind Overset-Gitter Methoden zu nennen. Bei diesen erfolgt eine Teilüberlappung bzw. Überlappung starrer Gitterbereiche, die gegeneinander bewegt werden können. Nachteilig an der Overset-Methode ist der vergleichsweise hohe Aufwand, verschiedene Gitterbereiche auf unterschiedlichen Gitterebenen zu verwalten und deren Lösungen zu koppeln. Die Vorteile hinsichtlich der Flexibilität bzgl. möglicher Bewegungstrajektorien sowie der Vernetzung der Teilgitter überwiegen die Nachteile im schiffstechnischen Umfeld nach Ansicht der Autoren jedoch bei weitem, weswegen diese Methode hier gewählt wurde. Die in MOUSE

entwickelte Variante basiert auf unterschiedlichen Gitterebenen, zugleich Prioritätsebenen, die ggf. auch rekursiv aufgebaut sein können. So ist es z.B. prinzipiell möglich in einem Gewässer (Ebene 0) Schiffe (Ebene 1) zu bewegen, an denen sich zusätzlich rotierende Antriebsorgane (Ebene 2) befinden. Abbildung 18 verdeutlicht dies schematisch. Es sei jedoch vorweggenommen, dass derart umfangreiche Simulationen zum gegebenen Zeitpunkt mangels Rechenleistung noch nicht gelungen sind. Die in MOUSE implementierten Bewegungsmodelle lassen sich grundsätzlich in vorgegebene und lösungsabhängige Bewegungsformen unterteilen. Z.B. führt ein rotierendes Antriebsorgan eine vorgegebene Drehbewegung aus, während die Bewegungen eines Schiffes im Seegang von den aus der Umströmung resultierenden Kräften getrieben werden.

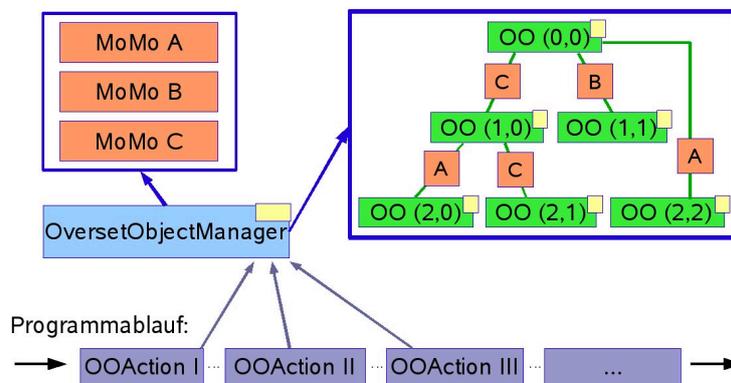


Abb. 18: Schematische Darstellung der Gitterverknüpfungen

Diese dynamische Rückkopplung ist somit eine lösungsabhängige Rückwirkung auf die Bewegung und zeitliche Position eines jeweiligen Objekts. In den Freiheitsgraden einer Rechnung ist hierzu eine zweifache Integration der resultierenden Beschleunigungskräfte und -momente erforderlich. Unter MOUSE können für unterschiedliche Bewegungsformen verschiedene Freiheitsgrade dynamisch aktiviert werden. Sind alle Freiheitsgrade dynamisch aktiviert, wird in diesem Zusammenhang von 6DOF¹ gesprochen.

Parallelisierung der Overset-Methode Aufgrund der hohen Komplexität der zu simulierenden Szenarien, die mittelfristig relativ bewegte Verkehre einer Vielzahl an Schiffen bei hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung ermöglichen soll, sind hohe Rechenleistungen unabdingbar. Aus wirtschaftlichen Überlegungen sind hierzu vor allem Linux-Cluster geeignet, die sich durch hohe Prozessoranzahlen bei verteiltem Speicher aus-

¹Six degrees of freedom

zeichnen. Es versteht sich, dass die Parallelisierung der Overset-Methode eine erhebliche informatische Herausforderung darstellt, da sich die Zuordnungen der zu koppelnden Stützstellen laufend verändern, gleichzeitig jedoch der Datenverkehr in der Rechenanlage minimiert werden muss um eine angemessene parallele Leistung zu erzielen. An dieser Stelle muss zunächst die Koppelmethode zwischen den Gitterebenen genauer betrachtet werden. Unter MOUSE erfolgt eine wechselseitige Interpolationskopplung mit Überlappungsband. Der hierfür erforderliche Datenzugriff erfolgt über eine Splittree basierte Such- und Interpolationsmethode, da im Fall der Bewegung wechselnde Interpolationspartnerschaften zu berücksichtigen sind. Im skalaren Fall ist diese Form des Datenaustauschs unauffällig, d.h. es werden keine nennenswerten Anteile der Rechenzeit hierfür verbraucht. Bei paralleler Abarbeitung auf Maschinen mit verteiltem Speicher stellt sich die Interpolationskopplung jedoch als sehr problematisch dar.

Gebietszerlegungen Die in MOUSE implementierte Parallelisierung basiert, wie bei fast allen gängigen Lösungsverfahren, auf dem Konzept der Gebietszerlegung, d.h. jedem Prozess wird ein Teilstück des Gitters zugeordnet, das während des gesamten Rechenlaufs unveränderlich ist. Bei Simulationen mit nicht überlappenden Gittern (Eingitter-Rechnungen) ist dies sofort einsichtig, da lediglich ein einzelnes Gitter entsprechend zu zerlegen ist. Die Kopplung zwischen den Gitterbereichen der Zerlegung erfolgt über einen Datenaustausch an den Randpunkten. Diese der Parallelität geschuldete Kopplungsmethode zwischen den Gebieten einer Eingitterrechnung ist somit der Datenankopplung zwischen Overset-Gittern bereits sehr ähnlich. Es liegt somit nahe, eine vergleichbare Methode des Datenaustauschs auch bei paralleler Abarbeitung mit Overset-Gittern zu implementieren. Eine derartige Implementierung ist denn auch recht einfach, sofern sich die Gitterbereiche nicht gegeneinander bewegen.

Wechselnde Zuordnungen Relativ bewegte Overset-Gitter führen im Gegenzug zu wechselnden Zuordnungen, d.h. die Interpolationskopplung muss mit veränderlichen Zielprozessen durchgeführt werden. In diesem Zusammenhang sind lösungsabhängige Bewegungsformen besonders problematisch, da vorab definierte Zielprozesse nicht bestimmt werden können. Um die Allgemeinheit der Parallelisierung zu gewährleisten und zugleich eine bei vorgegebenen Bewegungsformen prinzipiell mögliche, aber auch sehr umfangreiche Tabellierung der Zielprozesse für die erforderlichen Interpolationen zu umgehen, muss die Suche der jeweiligen Zielprozesse laufend während des Rechenablaufs erfolgen. Die globale Suche in allen Prozessen einer parallelen Abarbeitung führt jedoch zu einem enormen Datenverkehr innerhalb der Maschine. Die Folgen

für die Rechenzeit können am besten anhand der numerischen Komplexität geklärt werden. Bezogen auf eine Interpolationsnachfrage, die von einem Prozess ausgeht, müssten alle weiteren Prozesse angesprochen werden, was zu einer Komplexität der Ordnung $O(NP)$, mit NP der Zahl der Prozesse, führt. Es ist deutlich, dass der Aufwand mit zunehmender Anzahl an Prozessen linear ansteigt, gleichbedeutend mit einem linearen Anstieg der Netzwerktransferzeiten mit der Anzahl der genutzten Prozesse. Das Verhalten ist somit exakt umgekehrt zum Ziel einer Rechenzeit- bzw. Turn around Zeitreduktion. Mit zunehmender Prozessanzahl wird somit die für die Interpolationskopplung erforderliche Netzwerktransferzeit dominant, weswegen eine globale Suche im Parallelbetrieb ausscheidet. Es wird eine gestufte Suchreduktion angesetzt, da die Gitter sich durch die relativ langsame Bewegung von Schiffen nur geringfügig von Zeitschritt zu Zeitschritt verschieben. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Interpolation im Verantwortungsbereich des Zielprozesses des vorherigen Zeitschritts erfolgreich ist, ist somit sehr hoch (ca. 98%). Aus diesem Grund wird zunächst eine Interpolation auf den bisherigen Zielprozessen versucht. Die in diesem Versuch nicht erfolgreichen Interpolationen werden in einer Fehlerliste verwaltet. Im MOUSE Konzept ist diese Fehlerliste schadenstolerant. Dies bedeutet, dass auch ein Verfehlen des Verantwortungsbereichs eines Zielprozesses noch eine mit Einschränkung korrekte Interpolation ermöglicht, da auch die Teilgitter der Gebietszerlegung durch Überlappungsbereiche umgeben sind. Dies erhöht die Erfolgswahrscheinlichkeit auf sehr hohe Werte, so dass im Allgemeinen keine Korrekturmaßnahmen über einige Zeitschritte erforderlich sind. Dennoch wächst die Fehlerliste jedes Prozesses i.A. kontinuierlich an, woraus sich der Bedarf an Korrekturmaßnahmen ableitet. Zurzeit werden hier noch vorgegebene Schranken für die Anzahl der Interpolationsnachfragen in den Fehlerlisten gesetzt. Eine Überschreitung des Schwellwerts oder aber eine einzelne Interpolationsnachfrage außerhalb des Toleranzbereichs löst eine Neuordnung aller Interpolationszuordnungen zwischen allen Partnern aus. Die hierzu ausgeführte Suche ist nur relativ selten erforderlich. Es zeigt sich allerdings, dass auch in diesem Fall eine weiter gestufte Suche sinnvoll ist, die an dieser Stelle jedoch nicht detailliert beschrieben wird. Obige Darstellung stellt eine sehr knappe grundsätzliche Beschreibung der Vorgehensweise dar. Eine deutlich ausführlichere Beschreibung der Methoden ist im Endbericht Teil C dokumentiert.

2.2.6 CFX

Neben der Weiterentwicklung und Anwendung des offenen Codes MOUSE ist auch der kommerzielle Löser CFX angewendet worden. So konnte die Leistungsfähigkeit der

Entwicklung und die Qualität der Ergebnisse verglichen werden, aber auch die Analyse von Experimenten unterstützt werden zu einem Zeitpunkt, da die Entwicklung des MOUSE Codes noch nicht abgeschlossen war.

Erhaltungsgleichungen und Turbulenzmodellierung Zur Berechnung der viskosen, inkompressiblen turbulenten Strömung mit dem kommerziellen RANSE-Löser ANSYS CFX wurde ein Standard Fahrgastschiff erzeugt und frei trimmend und tauchend gerechnet. Die Erhaltungsgleichungen für Masse und die Impulsgleichungen können die Bewegungen von Flüssigkeiten unter Berücksichtigung der Reibung vollständig beschreiben. Die Turbulenzen im Strömungsgebiet werden durch die Navier Stokes Gleichungen ebenfalls vollständig erfasst. Jedoch ist eine analytische Lösung für praxisrelevante Strömungsberechnungen mit der aktuellen Rechentechnik nicht möglich. Die Lösung des Gleichungssystems muss durch numerische Verfahren herbeigeführt werden. Die vollständige Auflösung der turbulenten Erscheinungen bei Strömungsberechnungen ist mit der vorhandenen Speicherkapazität und Rechnerleistung für praxisrelevante Aufgabenstellungen im Schiffbau nicht möglich. Aus diesem Grund werden für diese Berechnungen die Reynolds-Gemittelten-Navier-Stokes-Gleichungen (RANSE) eingesetzt. Dabei werden die Auswirkungen der turbulenten Erscheinungen auf die Strömung im Fluid durch sogenannte Turbulenzmodelle realisiert. Für die viskosen CFD-Untersuchungen in diesem Forschungsvorhaben werden das $k - \epsilon$ Modell und das $k - \omega - SST$ Modell von Menter [6] eingesetzt.

Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen Mit dem CFX Solver werden die Erhaltungsgleichungen nach der Finite-Volumen-Methode diskretisiert. Zur Anwendung dieses Verfahrens muss das gesamte Lösungsgebiet in Volumenelemente unterteilt werden. Zur Beschreibung der Schiffsgometrie werden nichtorthogonale randangepasste Volumenelemente verwendet. Die Erhaltungsgleichungen werden über die einzelnen Kontrollvolumen integriert. Druck und Geschwindigkeit werden für jeden diskreten Punkt gekoppelt berechnet.

Ermittlung der dynamischen Schwimmelage mit RANSE-Verfahren Die Rechnungen sind mit freier dynamischer Schwimmelage eines Schiffes, also ohne die Vorgabe von Trimm und Absenkung als Randbedingung, durchgeführt worden. Im Gegensatz zum stationären Standardberechnungsfall, bei dem das Schiff fest „eingespannt“ ist und vom Fluid mit der Schiffsgeschwindigkeit angeströmt wird, muss bei Berechnungen, bei

denen Trimm und Absenkung innerhalb der viskosen Rechnung ermittelt und berücksichtigt werden sollen, die Position des Schiffes im Berechnungsraum in Abhängigkeit von den am Schiffsrumpf wirkenden Kräften und Momenten ständig angepasst werden. Diese iterative Anpassung erfolgte durch Gitterverzerrungen mit dem Programmpaket ANSYS CFX. Diese Methode eignet sich für kleine Translations- und Rotationsbewegungen. Bei größeren Lageveränderungen des Schiffskörpers verschlechtert sich die Qualität des Gitters durch die Verzerrung der Volumenelemente so stark, dass eine konvergierende Lösung nicht zu erwarten ist.

Um das Konvergenzverhalten weiterhin positiv zu beeinflussen, wurde in einem ersten Schritt das Wellenbild am „fest eingespannten“ Schiff berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnung werden als Startlösung für den 2. Berechnungsschritt (Ermittlung der dynamischen Schwimmelage) vorgegeben. Dabei wird die Lage des Schiffes iterativ verändert, bis sich ein Kraft- und Momentengleichgewicht am Schiffskörper einstellt.

Verfahren zur Realisierung des Driftwinkels Am Beispiel des KRISO Containerschiffs wurde die Abhängigkeit der Längs- und Querkräfte sowie des Giermoments berechnet. Im Programmpaket ANSYS CFX sind unterschiedliche Modelle zur Realisierung von drehenden Objekten und der stationären Umgebung implementiert. Diese ursprünglich zur Berechnung von Rotationsbewegung eines Körpers genutzten Verfahren können auch genutzt werden, um einen beliebigen aber dann festgehaltenen Driftwinkel eines Schiffes effizient zu berechnen.

Um eine Vielzahl von Berechnungen durchführen zu können, wurden die Untersuchungen stationär durchgeführt. Hierbei wird ein Verfahren (Multiple Frame of Reference Model) angewandt, bei dem die Einzelkomponenten (rotierendes und festes System) in ihren jeweiligen Referenzsystemen betrachtet werden. Dadurch können die Strömungen in den jeweiligen Bereichen als stationär angesehen werden. Die Kopplung der Referenzsysteme erfolgt dann über ein Interface. Für diese Berechnungen wurde das „Frozen Rotor“ Interface angewendet.

Wirkung von Ruder und Propeller Die Wirkung eines Propellers auf das Ruder und die Wechselwirkung zwischen Rumpf und Propeller kann durch unterschiedliche Verfahren realisiert werden. Jedoch ist die vollständige geometrische Auflösung und die Realisierung der Drehung des Propellers nicht realisierbar, weil der zeitliche Aufwand für die Berechnung und der Aufwand für die Erzeugung der komplexen Volumengitter zu hoch ist. Eine Alternative für die Berücksichtigung der Wirkung des Propellers auf

das Ruder und den Schiffsrumpf ist die Anwendung eines sogenannten Kraftscheibenmodells (Aktuatordisk) dem Durchmesser und der Ausdehnung des Propellers entsprechend. In den Elementen der Propellerscheibe werden die Kräfte in tangentialer und axialer Richtung entsprechend dem Schub und Moment der Schiffsschraube vorgegeben. Die Verteilung dieser Kräfte über den Radius wird dem Schub- und Momentenverlauf des Modellpropellers angepasst. Durch dieses vereinfachte Modell ist es möglich, parametrische Untersuchungen auch unter Berücksichtigung der Wirkung des Propellers durchzuführen, ohne dass die Rechenzeit wesentlich beeinflusst wird.

Zur Ermittlung des Wassertiefeneinflusses unter den idealisierten und kontrollierbaren Randbedingungen einer CFD Rechnung wurde im SimuBin Projekt wiederum das KRISSO Containerschiff bei verschiedenen Ruderwinkeln unter Berücksichtigung des Propellerschubs mit CFX gerechnet.

Randbedingungen Der Berechnungsraum muss örtlich begrenzt werden und an den Rändern müssen geeignete Randbedingungen vorgegeben werden, die die Problemstellung eindeutig wiedergeben. Die Ränder für den Eintritt und den Austritt des Fluids müssen so gewählt werden, dass ihre Lage keinen Einfluss auf die Strömungsverhältnisse in der Nähe des zu untersuchenden Objektes hat. Der Eintrittsrand (INLET) und der Austrittsrand (OUTLET) sind ca. eine Schiffslänge vor bzw. zwei Schiffslängen hinter dem Schiff positioniert, vgl. Abbildung 19.

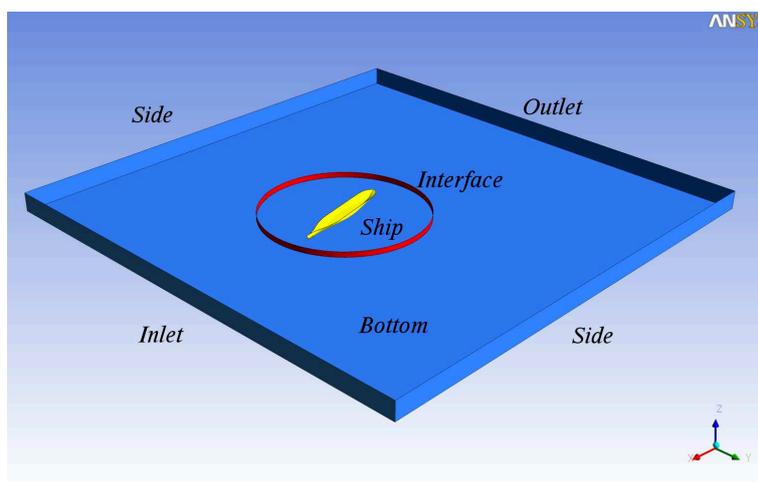


Abb. 19: Schematische Darstellung der Randbedingungen

Folgende Randbedingungen gelten für alle durchgeführten Berechnungen:

- **Einströmrand:** Der Einströmrand ist eine Dirichlet-Randbedingung, an dem eine homogene Anströmung vorgegeben wird, mit der das Schiff angeströmt werden soll. Für die Turbulenzintensität wird ein Wert von 5% gewählt.
- **Ausströmrand:** Als Ausströmrand wird die stromabwärts, senkrecht zur Mittellängsachse liegende Fläche definiert. Die Änderung des Druckes wird an dieser Fläche zu Null gesetzt. Die hier verwendete OPENING-Randbedingung ermöglicht ein ungehindertes Ein- bzw. Ausströmen des Fluids.
- **Schiffskörper:** Der Schiffskörper und eventuelle Anhänge werden als reibungsbehaftete Wände definiert, an denen die Haftbedingung erfüllt ist. (WALL NO SLIP)
- **Alle seitlichen Begrenzungen des Lösungsgebietes:** Die Begrenzung wird als reibungsfreie Wand definiert. Es werden nur Geschwindigkeiten parallel zur Wand zugelassen. Es existieren keine Gradienten senkrecht zur Wand (WALL FREE SLIP).

Gittergenerierung Für die Berechnungen mit einem RANSE-Löser muss der gesamte Berechnungsraum mit Volumenelementen beschrieben werden. Die Randelemente dieses Volumengitters müssen die Geometrie wiedergeben. In Bereichen, in denen große Druck- und Geschwindigkeitsgradienten erwartet werden, sind Verfeinerungen des Volumengitters notwendig. Um die unterschiedlichen Driftwinkel zu realisieren muss das Volumengitter aus zwei Teilgittern bestehen. Beide Gitter müssen eine klar definierte Schnittstelle besitzen und dürfen sich nicht überlappen. Eine 1:1 Verbindung auf dem Interface zwischen dem rotierenden und stehenden System ist nicht zwingend. Für die gegebene Problemstellung wurden Volumengitter erzeugt, die sich aus einem unstrukturierten und einem blockstrukturierten Teilgitter zusammensetzen. Das verdrehbare Referenzsystem (rot eingfasst in Abbildung 19) besteht aus einem unstrukturierten Gitter, welches sich aus Tetraedern und Prismen zusammensetzt, wobei das Umgebungsgitter aus Hexaedern besteht.

3 Ergebnisse

Exemplarisch sind aus den Abschlussberichten Teil B (Experimente und Modellierung) und Teil C (CFD Untersuchungen) Beispiele ausgewählt und im Folgenden aufgeführt. Diese Zusammenfassung kann dabei die Tiefe und Detaillierung der zugehörigen Beschreibung in diesen Berichten nicht erreichen.

3.1 Experimente

Überholen Es hat sich als hilfreich erwiesen, gemessene Größen wie folgt dimensionslos zu machen:

$$C_{YB} = \frac{Y}{0,5\rho TB(0,5V_O + 0,5V_T)^2}, \quad \text{und} \quad C_{NB} = \frac{N}{0,5\rho TBL(0,5V_O + 0,5V_T)^2} \quad (8)$$

In Abbildung 20 ist der komplexe Verlauf der Änderung der Längskraft beim Überholvorgang mit unterschiedlichen Längen dargestellt.

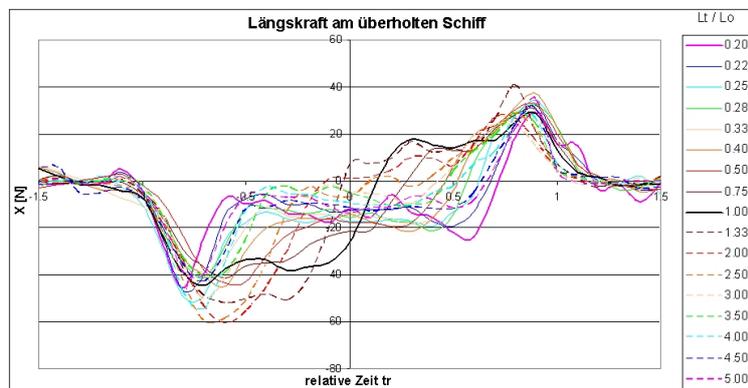


Abb. 20: Änderung der Längskraft beim Überholvorgang mit unterschiedlichen Längen

Mit der Normierung in Gleichung 8 kann so aus Abbildung 21 festgestellt werden, dass:

- bei längeren Modellen eine größere Seitenkraft im wandfernen Fall auftritt
- kürzere Modelle größere Schwingungen in der Mitte des Passiervorgangs erfahren, vermutlich durch das Durchfahren des Wellensystems des längeren Schiffs

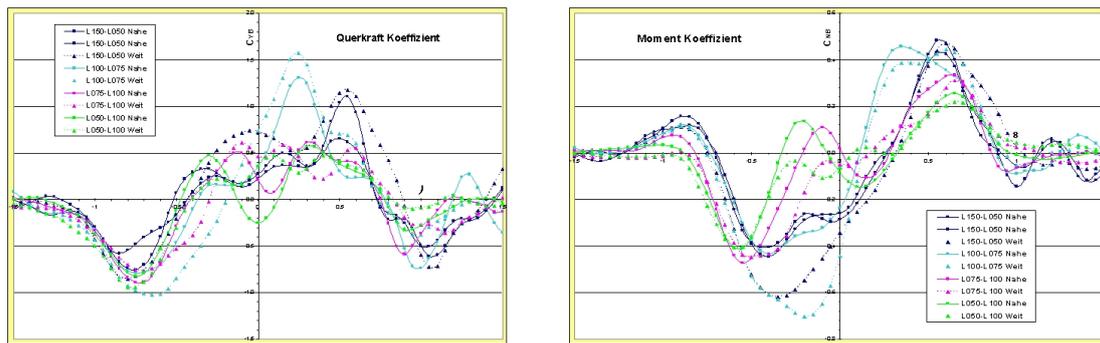


Abb. 21: C_{YB} und C_{NB} bei unterschiedlicher Länge

Begegnen Beim Begegnen zweier gleich großer Binnenschiffe sind diese Oszillationen geringer, wie in Abbildung 22 erkennbar ist.

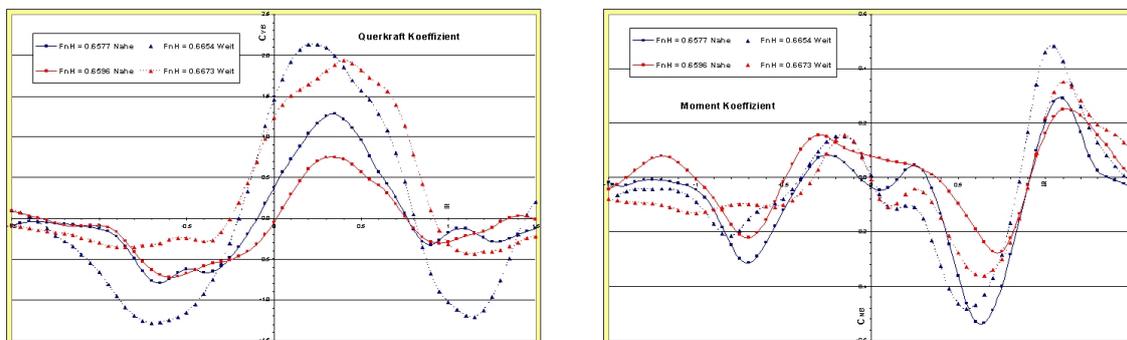


Abb. 22: C_{YB} und C_{NB} beim Begegnen zweier GMS

Absenkung Von ganz entscheidender Bedeutung ist die korrekte Berücksichtigung der Absenkung. Beispielhaft ist in Abbildung 23 die Absenkung z wiedergegeben. Neben dem zu erwartenden Anstieg der Kurven mit der Geschwindigkeit V zeigt sich der Wassertiefeneinfluss, indem die helleren Kurven (geringere Wassertiefe) größere Werte aufweisen. Zusätzlich ist die Erhöhung der Versperrung durch den Driftwinkel erkennbar, wenn man die Auffächerung der gleichfarbigen Kurven betrachtet.

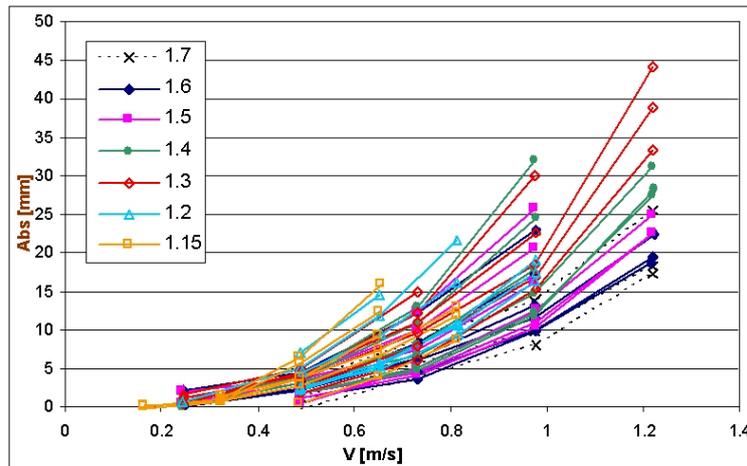


Abb. 23: Absenkung z über der Geschwindigkeit

Bankeffekt Vom Bankeffekt spricht man, wenn ein Schiff beim Entlangfahren an einer Wand eine Kraft durch die Wechselwirkung mit dieser Wand erfährt. Der charakteristische Wandeeinfluss (Bankeffekt) auf ein Schiff, welches sich im Gleichgewichtszustand parallel entlang einer Wand bewegt, ist in Abbildung 24 dargestellt. Sie zeigt, dass für die Kompensation der Anziehungskraft und des ausdrehenden Giermomentes ein ausdrehender Kurs und eine eindrehende Ruderlage erforderlich sind (Norrbin, [7]).

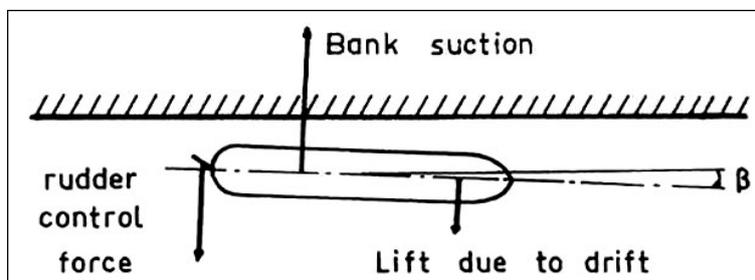


Abb. 24: Gleichgewichtsbedingung bei Fahrt entlang einer Wand

Daher ist eine korrekte Erfassung und Beschreibung des Bankeffekts für viele der im Folgenden aufgeführten Beispiele erforderlich.

Hafeneinfahrt Mit einem Modell eines Feeders sind die meisten der über 500 Kraftmessungen durchgeführt worden. Exemplarisch für dieses Schiff ist ein Verlauf in Abbildung 25 wiedergegeben. Das Modell wurde in Schritten von 15° um die Hochachse gedreht. Die Position „ganz in der Strömung“ entspricht der y-Koordinate 7 m in Abbildung 5, die Position „teilweise in der Strömung“ der y-Koordinate 5 m.

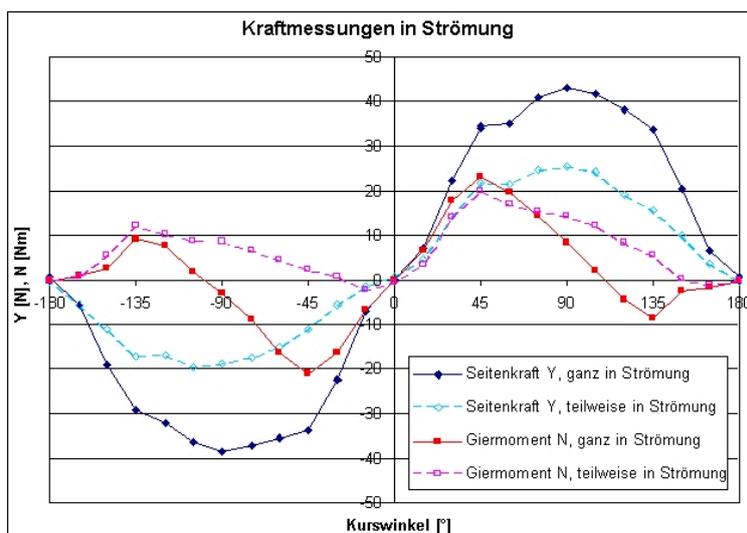


Abb. 25: Feeder - Seitenkraft und Giermomente für alle Kursrichtungen

Schleuse In Abbildung 26 sind Wasserstände (Wellenhöhen) in der Schleusenammer dargestellt. Die Anfahrwelle des Modells passiert die Sonden in der Kammer, wenn das Modell den Vorkanal erreicht ($x = -15$ m bis -10 m). Diese wird reflektiert und an allen Sonden angezeigt. Bei Eintritt des Bugs in die Schleuse zeigt die dort befindliche Sonde eine extreme Wasserspiegelabsenkung zusammen mit einem Zusammenbruch der Geschwindigkeit des Modells. Fast gleichzeitig zeigen die Sonden in der Schleuse einen Stau an, der dadurch entsteht, dass das Modell das Wasser in der Kammer wie ein Kolben komprimiert. Das Ansteigen des Wasserspiegels in der Schleuse bewirkt einen hecklastigen Trimm des Modells und bringt dieses fast zum Stehen. Zugleich ermöglicht er einen Ablauf aus der Kammer unter dem Schiffsboden hindurch. Diese erhöhte Reibung und die Hangabtriebskraft bewirken die abrupte Verzögerung des Modells. Diese Vorgänge wiederholen sich mehrmals, bis das Modell das Ende der Kammer erreicht hat.

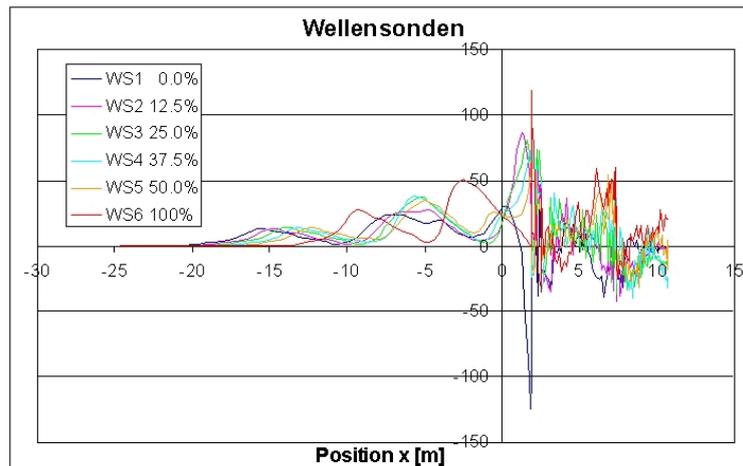


Abb. 26: Schleuse - freie Schleuseneinfahrt mit hoher Geschwindigkeit

Wendemanöver im Strom Bei der Betrachtung einer Strömung können verschiedene Situationen angenommen werden, die sich durch den Grad der Komplexität (siehe Abbildung 27) unterscheiden.

- Keine Strömung - nur ebene Bewegung
- Homogene Strömung - nur Translation zwischen dem relativen und dem absoluten Koordinatensystem (α)
- Die Strömung folgt einem Flusslauf ohne Änderung über die Gewässerbreite - Translation mit Änderung der Richtung (β)
- Reale Flussströmung mit sich über die Breite ändernden Strömungsgeschwindigkeiten (γ)

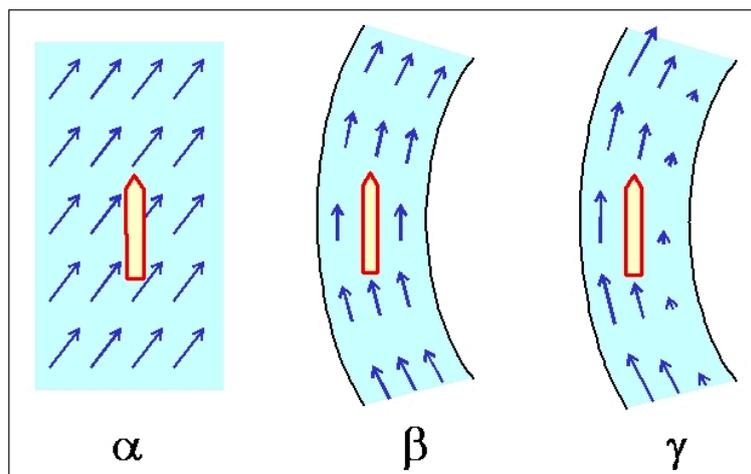


Abb. 27: Unterschiedliche Strömungsverteilungen

Mit umfangreicher mathematischer Modellbildung, die im Detail in Teilbericht B dargestellt ist, konnten exemplarisch Bahnkurven für vier unterschiedliche Wendemanöver berechnet werden (Abbildung 28). Mit den Nummern, die jeweils die Startpositionen des entsprechenden Falles angeben, kann festgehalten werden, dass:

- die Spuren der Fälle 1 und 3 länger sind, weil die Strömung das Schiff mitnimmt,
- bei den Fällen 2 und 4 ist es entsprechend umgekehrt,
- das Stromprofil in Fall 1 und 4 ein Wenden zulässt, während
- in Fall 2 und 3 ein Wenden auf der Flussbreite nicht möglich ist.

Dieses Beispiel zeigt, dass die in SimuBin entwickelten Verfahren durchaus in der Lage sind, praktisch relevante Zusammenhänge richtig wiederzugeben. Durch dieses verbesserte Verständnis können im Einzelfall auch entsprechende Strategien für komplexere Manöver abgeleitet werden.

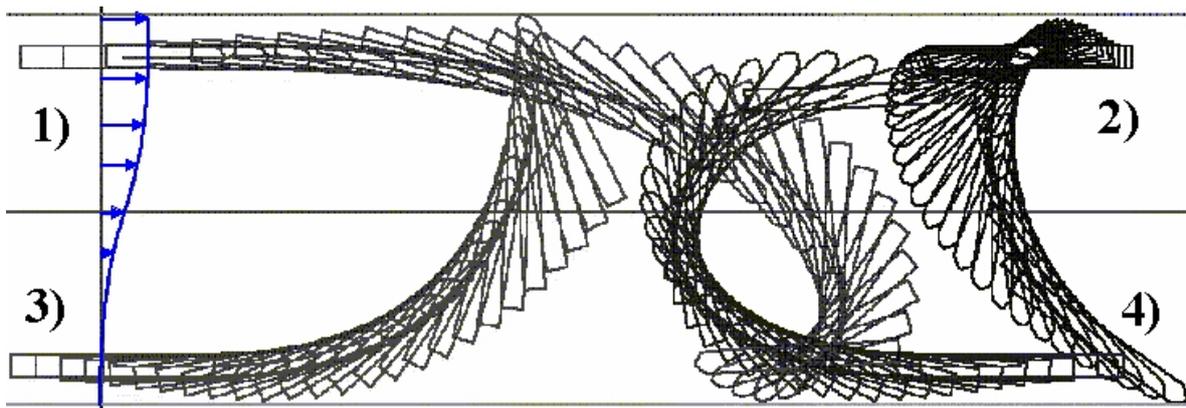


Abb. 28: Wendemanöver in inhomogener Strömung

3.2 Numerische Berechnungen

Im Rahmen der numerischen Untersuchungen sind die dynamische Schwimmelage und hydrodynamische Kräfte für verschiedene Situationen, z.B. die Schleuseneinfahrt, berechnet worden. Ferner ist der Code MOUSE parallelisiert und weiterentwickelt worden um die komplexen topologischen Probleme bei der gleichzeitigen Berechnung der Schiffsumströmung in einem Hafenbecken berechnen zu können. Um nicht den gesamten Inhalt des Teilberichts C hier aufzuführen, werden im Folgenden nur exemplarische Ergebnisse gezeigt.

3.2.1 Berechnungen mit dem Boussinesq-Ansatz

Berechnung der dynamischen Schwimmelage Als Beispiel eines mittels BESH*i*Wa ermittelten Ergebnisses ist das Kriso Container Schiff, das international zur Validierung herangezogen wird, aufgeführt. Zur Validierung ist dieses im Schlepptank des DST bei verschiedenen Wassertiefen untersucht worden. Der Tiefgang der Großausführung wurde auf 10 m eingestellt, die Wassertiefe wurde zwischen 12 m und 15 m variiert. Die Modellversuche wurden im Maßstab 1:40 durchgeführt. Abbildung 29 zeigt die berechneten und gemessenen Werte für die Absenkung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit für verschiedene Wassertiefen². Es ist eine sehr gute Übereinstimmung der berechneten (Linien) mit den gemessenen Werten (Symbole) zu erkennen. Lediglich bei einer Geschwindigkeit von ca. 6,17 m/s gibt es eine kleinere Abweichung.

Damit steht BESH*i*Wa als viel versprechendes Werkzeug zur Berechnung der dynamischen Schwimmelage als Teil der Datenbasis eines Flachwasserfahrersimulators zur Verfügung.

²Die Linien verbinden die berechneten Werte, während die Symbole die Messwerte darstellen.

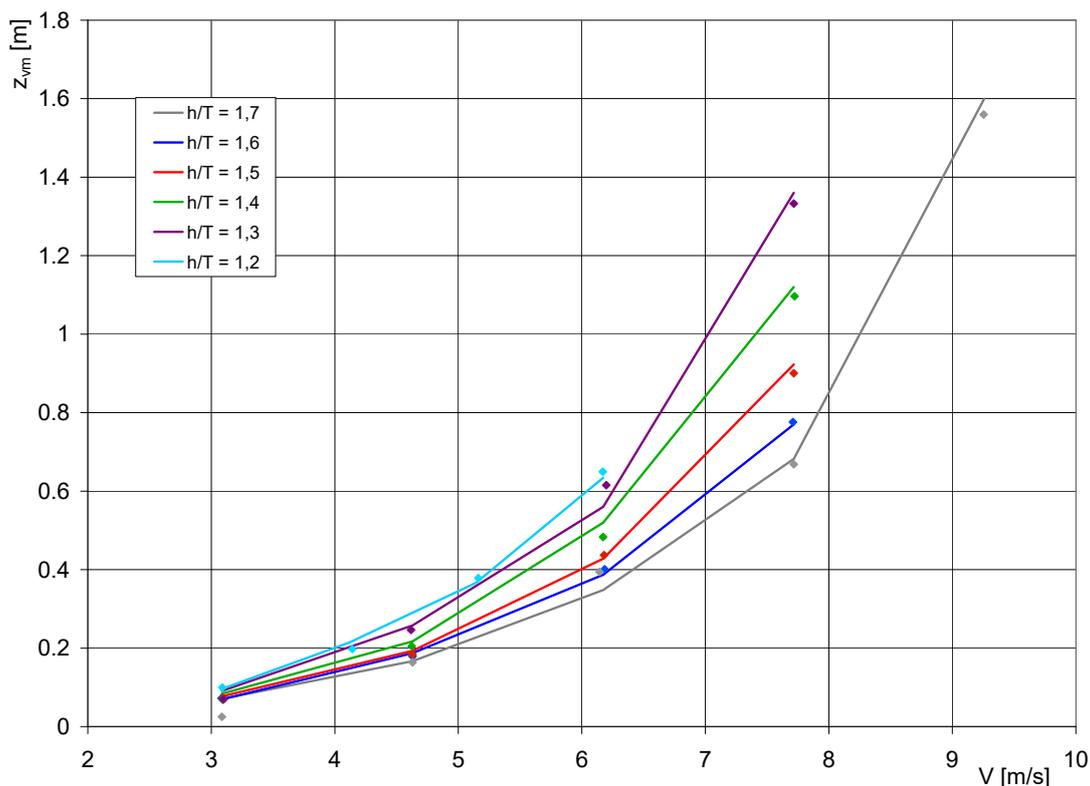


Abb. 29: Absenkung der Großausführung als Funktion der Geschwindigkeit für verschiedene Wassertiefen-Tiefgangs-Verhältnisse

Berechnung der Schleusenein- und -ausfahrt Das für die Modellversuche verwendete Binnenschiff hat eine Länge von 110,00 m und eine Breite von 11,40 m. Der Tiefgang variiert mit 2,80 m, 2,20 m oder 1,50 m. In Teil C des Abschlussberichts ist eine Auflistung der durchgeführten Schleusenberechnungen aufgegliedert in Ein- und Ausfahrten zu finden.

Die Geometrie und die Abmessungen des für die Berechnung verwendeten Kanals beziehungsweise der Schleuse ist bei den Modellversuchen ebenfalls zu Grunde gelegt. Das gesamte Rechengebiet umfasst eine Länge von 520 m, die sich in 320 m Zufahrtkanal und 200 m Schleusenbecken aufgliedert. Vor dem Schleusentor liegt ein trapezförmiger Übergangsbereich. Die Wassertiefe liegt bei 4,00 m. Exemplarisch wird ein Fall genauer dargestellt und zeigt die Ergebnisse recht deutlich. Es handelt sich um eine Schleuseneinfahrt, bei der das Schiff mit einem Tiefgang von 2,80 m und einer konstanten Propellerdrehrate von 8 1/s angetrieben wird. Die x-Achse der folgenden Diagramme gibt den Weg in m wieder. Bei $x = 0$ befindet sich die Schleuseneinfahrt. Die Darstellung erfolgt im Bereich 20 m vor Schleuseneinfahrt und 160 m des

Schleusenbeckens. Die Kanalstrecke wird vernachlässigt. Beim Vergleich der Kurven im Geschwindigkeit-Weg-Diagramm in Abbildung 30 wird deutlich, dass das Schiff bei der Schleusenberechnung mit Lock etwas stärker abbremst. Im weiteren Verlauf der Schleuseneinfahrt gleichen sich die beiden Kurven an. Am Ende ist bei der Berechnung im Gegensatz zum Modellversuch eine konstante Geschwindigkeit zu erkennen. Beim Vergleich der Absenkung- und Trimm-Weg-Diagramme fällt ein Unterschied im Bereich nach der Schleuseneinfahrt auf. Sowohl die Absenkung als auch der Trimm ist wesentlich ausgeprägter als beim Modellversuch. Im weiteren Verlauf stimmen die Kurven recht gut überein.

Aufgrund der guten Übereinstimmung der Berechnungen mit den Messungen bietet sich das Programm Lock als Werkzeug an, um die Datenbasis der Simulation bei Schleusenmanövern zu erstellen.

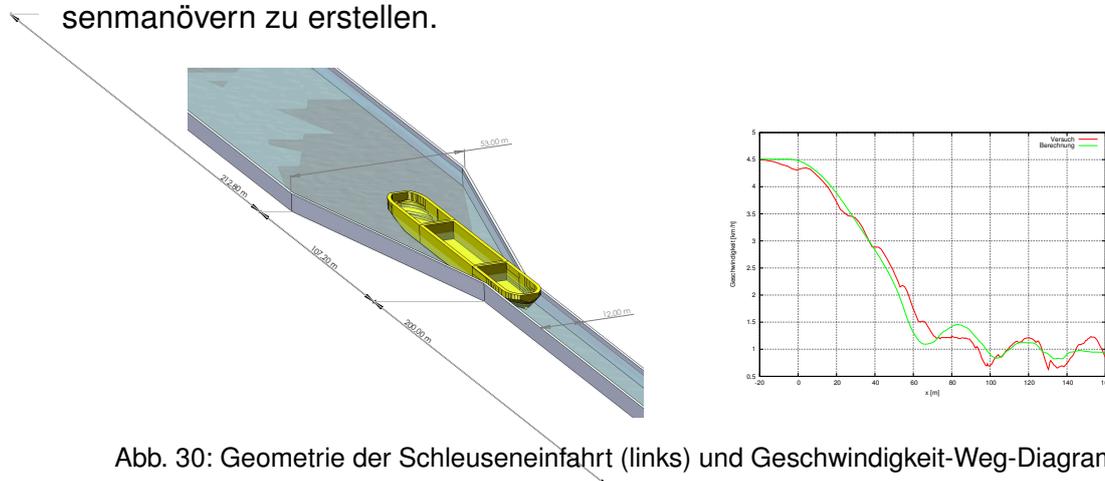


Abb. 30: Geometrie der Schleuseneinfahrt (links) und Geschwindigkeit-Weg-Diagramm (rechts)

Speziell bei der Ausfahrt aus der Schleuse zeigte das Programm Lock noch Probleme. Daher ist ein Neuansatz basierend auf dem Programm BESHWa entwickelt worden, zu dem im Folgenden einige Ergebnisse gezeigt werden.

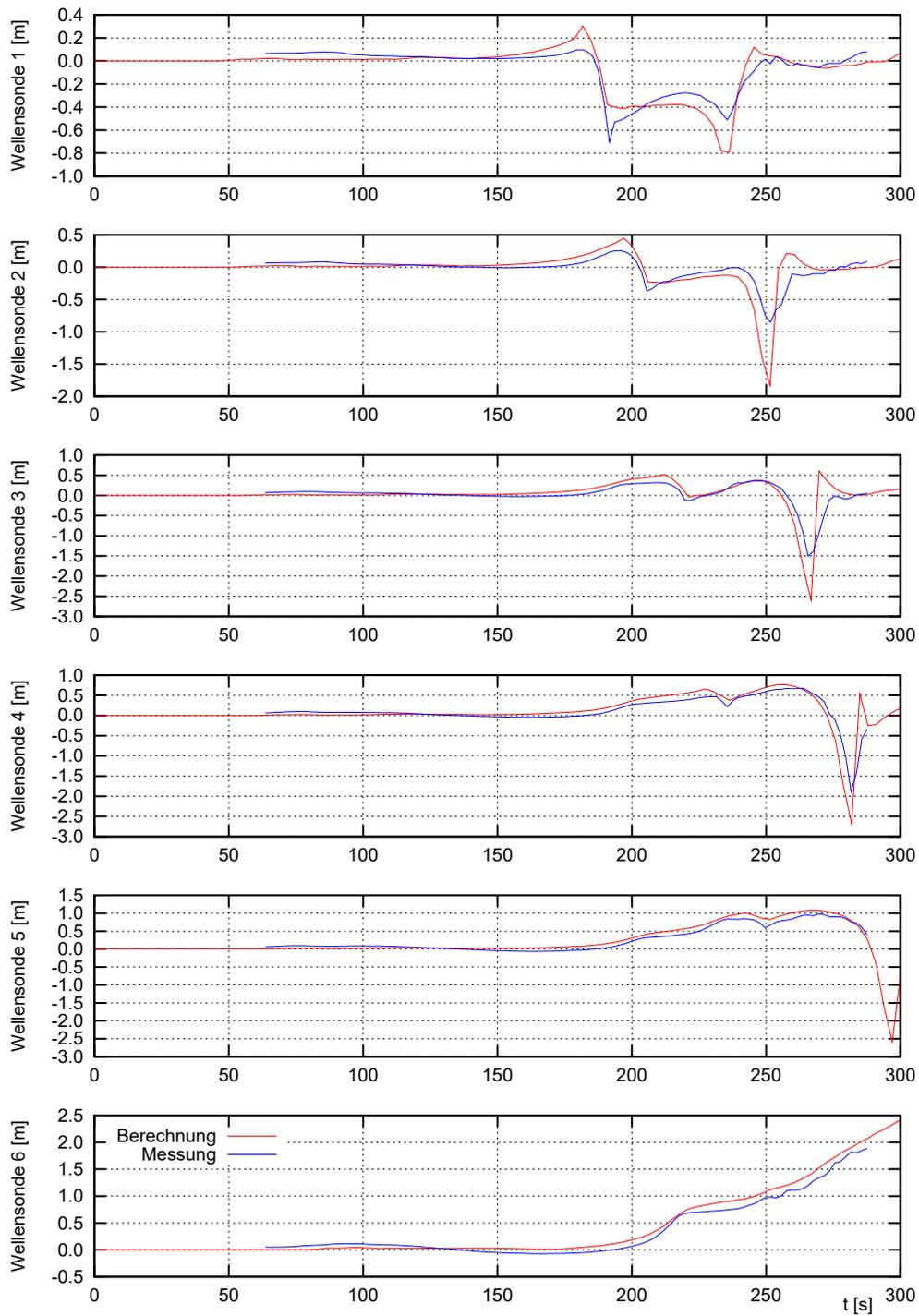


Abb. 31: Vergleich der mit BELock berechneten Wellen mit dem Experiment

3.2.2 Berechnungen mit dem RANSE-Ansatz

3D-Strömungssimulation relativ bewegter Schiffe Zur Darstellung der Flexibilität des entwickelten MOUSE Codes werden im Folgenden kurz einige Beispiele vorgestellt. Im ersten Beispiel handelt es sich um einen Körper, der sich mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit in eine Strömung hineinbewegt. Der Körper ist durch ein eigenes Gitter dargestellt, welches in ein Hintergrundgitter mit Hilfe der Overset Methode eingebettet ist. Aufgrund der auf ihn wirkenden Kräfte und Momente wird der Körper von seiner vorgegebenen Bewegungsrichtung abgelenkt, Abbildung 32. D.h., das Netz des Körpers kann sich frei im Hintergrundgitter bewegen.

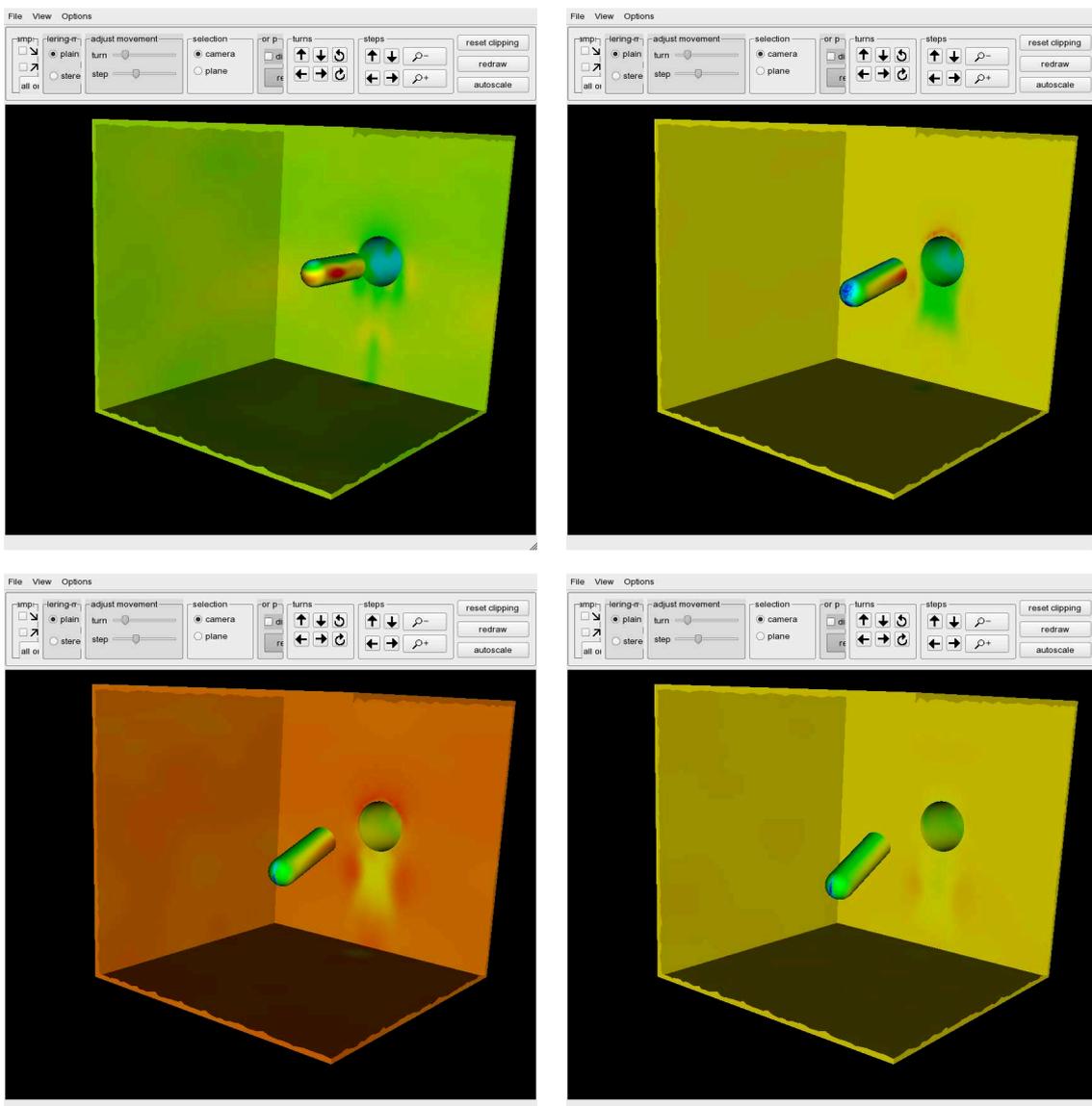


Abb. 32: Beispiel einer überlagerten Bewegung mit sechs Freiheitsgraden

Ein weiteres Beispiel für die hohe Flexibilität ist z.B. die Verzahnung zweier gegenläufiger Rotoren, Abbildung 33. Der Schwerpunkt liegt hier darauf, dass ein Punkt im Hintergrundgitter zu verschiedenen Zeiten der Simulation von verschiedenen Gitterobjekten abgedeckt werden kann. Damit ist es auch möglich, Körper mit sich kreuzenden Bahnen zu simulieren, siehe Abbildung 35.

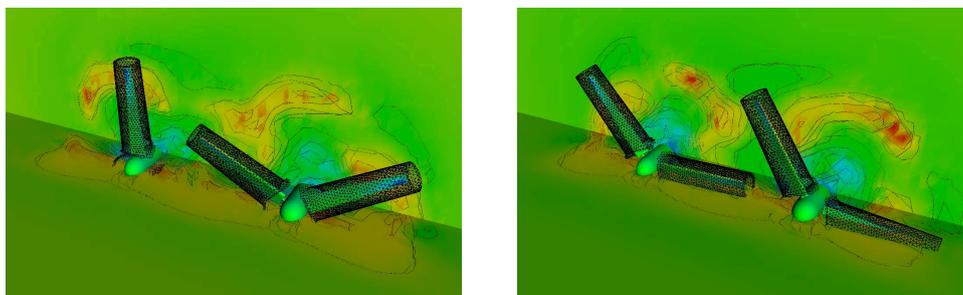


Abb. 33: Beispiel zweier gegenläufiger Rotoren

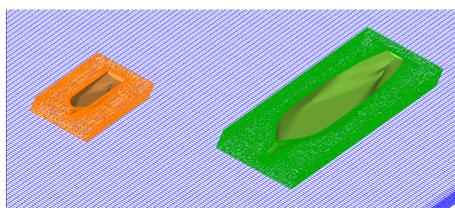


Abb. 34: Einbettung zweier Oversetgitter in ein Hintergrundgitter

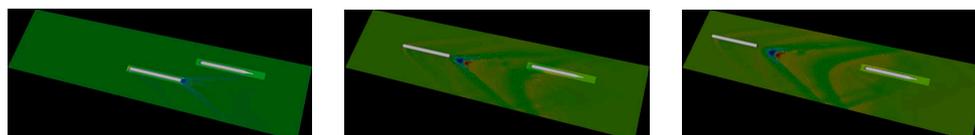


Abb. 35: Beispiel zweier Körper mit sich kreuzenden Bahnen

Als letztes Beispiel wird exemplarisch ein Überholvorgang zweier Schiffe betrachtet. Ein großes Schiff fährt mit 15 kn und überholt ein kleineres Schiff, welches mit 11 kn fährt, in einem Kanal. Der Tiefgang des großen Schiffes ist 11,4 m, die Wassertiefe des Kanals beträgt 14,4 m und der Passierabstand beträgt 150 m. Jedes der beiden Schiffe ist durch ein eigenes Berechnungsgitter dargestellt, welche in einem Hintergrundgitter eingebettet wurden, Abbildung 34. Es wurden zwei instationäre Simulationen durchgeführt.

Bei der ersten Simulation wurde bei beiden Schiffen die Absenkung vernachlässigt. Das kleine Schiff hat also eine feste Position im Hintergrundnetz und das Gitter des großen Schiffes wird mit konstanter Geschwindigkeit im Hintergrundgitter bewegt. Die zweite

Simulation unterscheidet sich von der ersten nur dadurch, dass das kleine Schiff sich absenken darf, d.h. dass dieses Gitter keine feste Position im Hintergrundgitter hat. Der Einfluss des großen Schiffes auf das kleinere ist beim Überholvorgang von großer Bedeutung, so dass in Abbildung 36 die Seitenkräfte auf das kleinere Schiff dargestellt sind. Der typische Kraftverlauf eines Überholvorganges wurde in beiden Fällen sehr gut wiedergegeben. Durch die Berücksichtigung der Absenkung ergeben sich größere Abweichungen zum Experiment, als bei der Vernachlässigung der Absenkung des kleinen Schiffes. Dies zeigt den großen Einfluss der Absenkung. In zukünftigen Simulationen müssen sowohl Trimm und Absenkung des kleineren Schiffes als auch für das überholende Schiff berücksichtigt werden, was in beiden Simulationen vernachlässigt wurde.

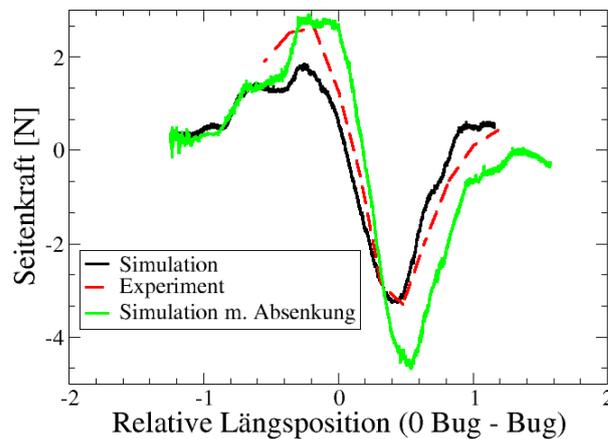


Abb. 36: Verlauf der Seitenkraft beim Überholvorgang

Da UNOPAM für Driftwinkel größer als maximal 4° keine plausiblen Werte berechnen konnte, sind diese Fälle mit den in diesem Projekt genutzten RANSE Verfahren berechnet worden. Der flexible Aufbau und die einfache Darstellung von örtlichen Relativverschiebungen beziehungsweise Verdrehungen erlauben dabei den Einsatz der MOUSE auch zur Berechnung eines numerischen PMM Versuchs.

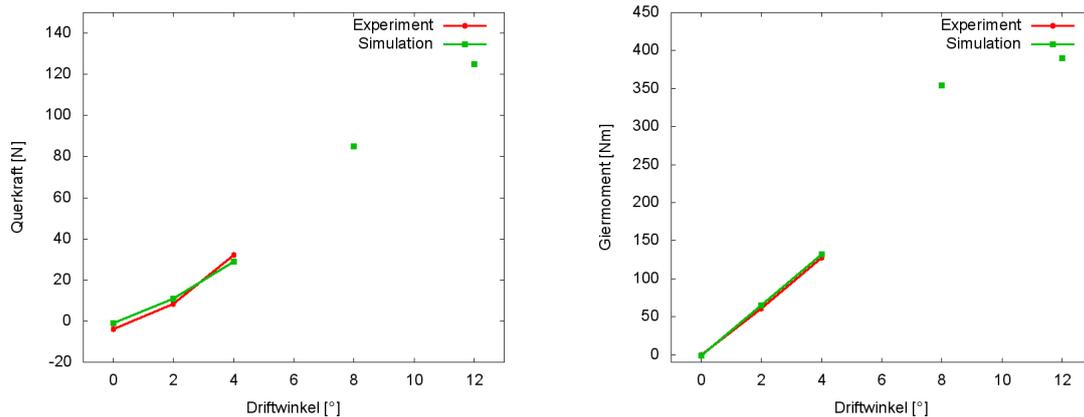


Abb. 37: Verlauf der dimensionslosen Seitenkraft (links) und Giermoment (rechts) in Abhängigkeit vom Driftwinkel

CFX-Berechnungen Neben dem Programm MOUSE sind auch Berechnungen mit dem kommerziellen Löser ANSYS CFX durchgeführt worden zu den Beispielen, die in Abschnitt 2.2.6 beschrieben sind. Zum einen, weil damit die Qualität von MOUSE im Vergleich zu einem kommerziellen Löser überprüft werden konnte, zum anderen weil so ein Teil der numerischen Berechnungen bereits ausgeführt werden konnte, als sich MOUSE noch in der Weiterentwicklungsphase befand. So konnten experimentelle Untersuchungen zeitnah komplettiert werden, ohne dass die Analyse der Experimente unnötig aufgeschoben werden musste.

Ein solches Beispiel ist die Untersuchung extrem großer Driftwinkel, die im Tank nicht durchgeführt werden konnte, weil durch die endliche Breite des Tanks im Vergleich zu einem quer oder fast quer geschleppten Modell Tankwandeinflüsse nicht mehr auszuschließen sind. Mit CFX konnte das Rechengebiet so breit gewählt werden, dass solche Imperfektionen ausgeschlossen werden können, siehe Abbildung 38.

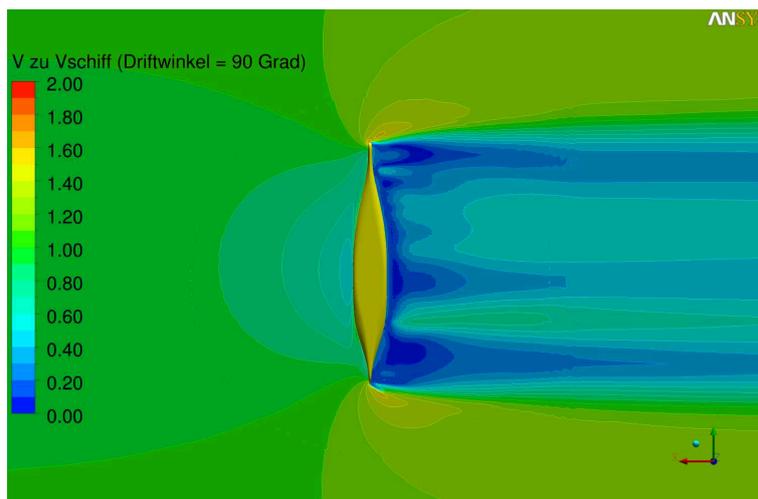


Abb. 38: Strömungsbild bei großen Driftwinkeln

Es ist leicht einzusehen, dass Driftwinkel wie in Abbildung 38 im Tank mit normalen Modellgrößen nicht mehr messbar sind. Allerdings bieten die ermittelbaren Messwerte bei moderaten Driftwinkeln eine hervorragende Gelegenheit, für die numerischen Ergebnisse eine entsprechende Korrelation bzw. Kontrolle durchzuführen. Die numerischen Untersuchungen erfolgten mit dem Kriso Containerschiff. Für diesen Schiffstyp wurde im Rahmen dieses Projektes eine Reihe von Modellversuchen im Maßstab von $\lambda = 40$ durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 39 dargestellt.

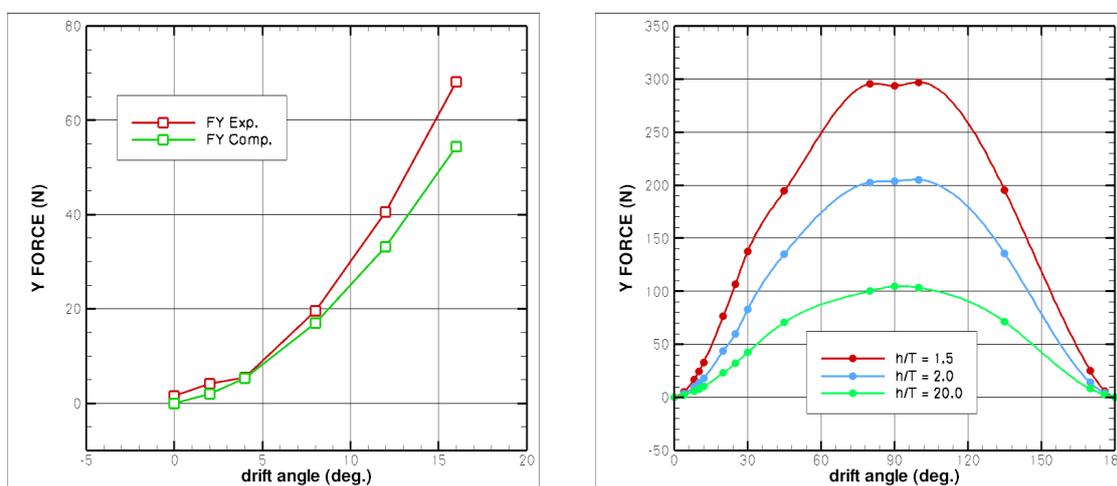


Abb. 39: Verlauf der Seitenkraft bei sehr großen Driftwinkeln, gemessen und gerechnet (links), vollständig gerechnet (rechts)

Ein weiteres Beispiel ist der Einfluss des dynamischen Trimmings und der dynamischen Tauchung auf die Kräfte. Ergebnisse hierzu können in Abbildung 40 und aus dem entsprechenden Absatz im Teilbericht C entnommen werden.

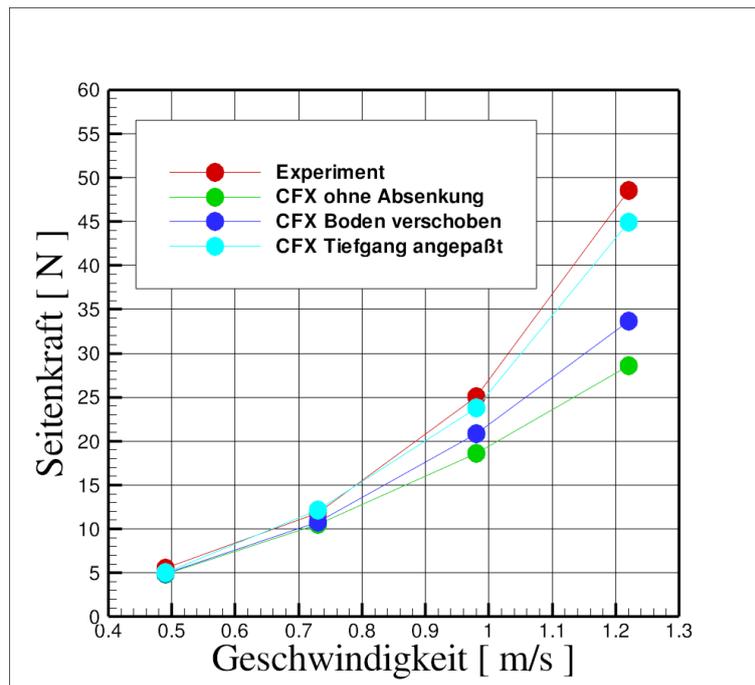


Abb. 40: Vergleich Seitenkraft

Letzte Beispiele zu CFX Ergebnissen im Projekt SimuBin zeigen die Abbildungen 41 und 42. Hierbei ist die Abhängigkeit der Ruderkraft von der Wassertiefe und dem Ruderwinkel dargestellt. Zu erkennen ist zum einen, dass ein Wassertiefeneinfluss vorliegt, dieser aber erst bei extremen h/T -Verhältnissen (z.B. 1,1) eine Rolle spielt, und zum anderen, dass die Ruderwirkung bei Ruderwinkeln größer als ca. 30° wieder abnimmt. Weitere, aufschlussreiche Detailrechnungen und Abbildungen finden sich im Teilbericht C.

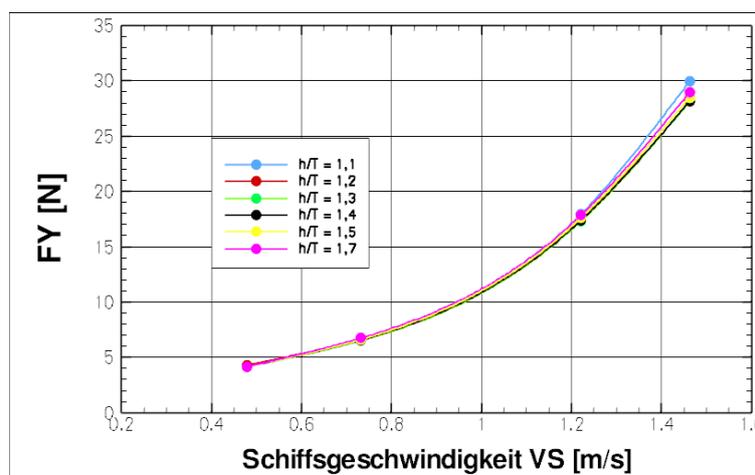


Abb. 41: Abhängigkeit der Ruderkraft von der Wassertiefe

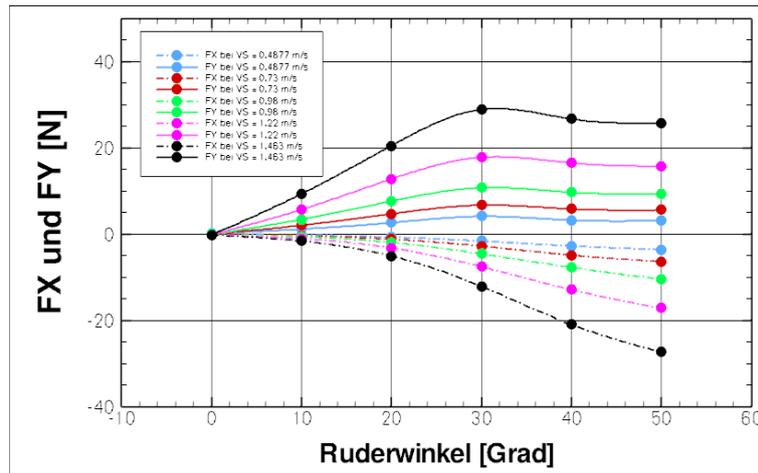


Abb. 42: Abhängigkeit der Ruderkraft vom Ruderwinkel

4 Zusammenfassung

Im Rahmen des BMWi-Vorhabens „SimuBin“ wurden weitere Grundlagen geschaffen, die zur vollständigen und realitätsnahen Modellierung von Schiffsbewegungen im begrenzten Fahrwasser von Binnenwasserstraßen und deren Besonderheiten (z.B. Hafen/Schleuse) erforderlich sind. Damit reiht dieses Projekt sich in eine Folge früherer BMBF Projekte wie „Interaktion“ und „SicherBin“ ein.

In den im Projekt SimuBin durchgeführten experimentellen Untersuchungen³ wurden Häfen und Schleusen realitätsnah nachgebildet, um mit systematischen Analysen von Messungen zum einen fundierte Daten zur Interaktion zwischen Schiff und Fahrwasserbegrenzungen in einer flexiblen, beliebig erweiterbaren Datenbank verfügbar zu haben, und zum anderen Messdaten zur Validierung von CFD-Berechnungen nutzen zu können. In systematischen Experimenten konnte erstmals nachgewiesen werden, dass z.B. die Anwesenheit einer Tankwand beim Passieren nicht vernachlässigt werden darf (vgl. Teilbericht B).

Insbesondere bei stark unterschiedlichen Längen der beteiligten Objekte beim Passieren treten höher frequente Wechselwirkungen auf, die auf einen Einfluss des sekundären Wellensystems neben der dominanten Wirkung des primären Wellensystems schließen lassen.

Dadurch werden die Phänomene derart komplex, dass sie sich nicht mehr mit herkömmlichen, bereits nichtlinearen Regressionsmethoden mit vertretbarem Aufwand beschreiben lassen. Weil eine modellhafte Beschreibung der Wechselwirkungen aber zentraler Bestandteil von SimuBin ist, wurde ein neues Verfahren entwickelt, welches statt Regression auf eine multidimensionale Interpolation aus Messdaten aufbaut⁴.

Es ist festzuhalten, dass die Interaktion zwischen Schiff und Wasserstraße ein äußerst komplexes Phänomen ist. Für viele Fragestellungen ist EFD nach wie vor eine zuverlässigere Untersuchungsmethode. Sie ist aber aufwendig und erfordert große Anstrengungen für die Umrechnung auf die Großausführung, was deren universelle Anwendbarkeit für eine Prognose einschränkt.

Daher sind im Projekt SimuBin neben EFD auch massiv CFD-Techniken⁵ angewendet und entwickelt worden.

³Experimental Fluid Dynamics, EFD

⁴DAten Reduzierung und Wichtungs INterpolation, DARWIN

⁵Computational Fluid Dynamics, CFD

In diese CFD-Untersuchungen wurden verschiedene Methoden implementiert. Unter Berücksichtigung der Verformung der Wasseroberfläche konnte der RANSE-Löser, hier CFX-5, erfolgreich eingesetzt werden sowie der Code MOUSE parallelisiert und erweitert werden. Für die Wellenbildung durch ein in der Strömung fahrendes Schiff lieferte das auf einer Flachwassertheorie basierende Computerprogramm BESHiWa zuverlässige Ergebnisse. Das Programm Lock ist angewendet worden, zeigte aber gewisse Schwächen bei der Schleusenausfahrt, sodass ein nahezu vollständig neues Programm, basierend auf BESHiWa, entwickelt worden ist.

Gegenwärtig ist weder mit EFD noch mit CFD ein universal einsetzbares Verfahren für die vollständige Lösung unter Einbeziehung aller Wechselwirkungen verfügbar. Die Kombination von EFD und CFD eignet sich aber in besonderem Maße, um die Schwächen des jeweils komplementären Verfahrens auszugleichen. Auch mittel- und langfristig werden zu dieser Kombination keine Alternativen gesehen, weil durch die zunehmende Komplexität der CFD-Verfahren durch die inzwischen implementierte:

- Deformierung der freien Gewässeroberfläche (Wellen)
- Parallelisierung und Anwendbarkeit auf Gitter mit Millionen von Punkten
- Rechnung auf beliebig überlappenden, zeitlich sich verschiebenden Gittern

eine Validierung mit analytischen Beispielen nicht mehr möglich ist. Hier ist die Validierung mittels experimentell gewonnener Daten nach wie vor das Mittel der Wahl.

SimuBin hatte zum Ziel, die Grundlagen für die Simulation realitätsnaher Schiffsbewegungen auf Binnenwasserstraßen zu schaffen. Das Projekt konnte einen Beitrag leisten auf dem Weg hin zu:

- Belastbare Prognosen von neuen (größeren) Schiffstypen betreffs ihrer Manövrier- und Bewegungseigenschaften möglichst bereits im Projektstadium.
- Verbesserung der Voraussetzungen für sichere Verkehre und Verkehrswege.
- Verbesserte Methoden und Modelle für die realitätsnahe Simulation von Schiffsbewegungen für die Forschung und Entwicklung am Flachwasserfahr Simulator bereitzustellen.
- Mit Simulation ein attraktives Ausbildungsinstrument zu schaffen, welches helfen kann, den Personalmangel in der Binnenschifffahrt zu entspannen.

Diese Grundlagen sollen helfen, einen inzwischen installierten Flachwasserfahr Simulator zu Forschungs- und Entwicklungsaufgaben zur Konzeptionisierung neuer, innovativer Binnenschiffsdesigns und der von diesen benötigten Infrastruktur „fit for purpose“ zu machen⁶. Jetzt, wo die Hardware und die Schnittstellen dieses Simulators feststehen, sollen die Modelle und Ansätze von SimuBin und seiner Vorgänger im Projekt „SIMplement“ implementiert werden, wozu sich ein entsprechender Projektvorschlag in der Vorbereitung befindet.

⁶Erweiterungen wie DARWIN und BELock sind bereits numerisch so optimiert worden, dass sie im für den Simulatoreinsatz geforderten Sekundentakt Ergebnisse liefern.

Literatur

- [1] BLAAUW, H. : Recommendations on rules and regulations and dissemination / 6th Framework Project European Commission. 2008 (FP6-506542, Version 5.0). – Report
- [2] DENNIS, J. ; GAY, D. ; WELSCH, R. : *An adaptive nonlinear least-squares algorithm*. ACM, 1981
- [3] EMERSON, A. : Ship Model Size and Tank Boundary Correction. In: *Transactions of North-East Coast Engineers and Shipbuilders* (1959)
- [4] JIANG, T. ; GRONARZ, A. ; HENN, R. ; KAISER, R. ; LIST, S. : SICHERBIN - Verbesserung der Verkehrssicherheit auf Binnenwasserstraßen an Engpass- und Gefahrenstellen. Duisburg : Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V., 2007. – Forschungsbericht
- [5] KAISER, R. ; VILSMEIER, R. : Three-dimensional flow simulation for moving vessels in narrow waters employing an overset method based on the MOUSE Software package. In: *Sprechtage der STG: CFD in Ship Design, 2007*
- [6] MENTER, F. R.: Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications (MENTER). In: *AIAA Journal* 32(8) (1994), S. 1598–1605
- [7] NORRBIN, N. H.: Bank effects on a ship moving through a short dredged channel. In: *Proceedings 10th Symposium on Naval Hydrodynamics*, 1974
- [8] SCHNEIDER, T. ; KLEIN, R. : Overcoming mass losses in Level Set-based interface tracking schemes, Finite Volumes for Complex Applications II. 1999. – Forschungsbericht
- [9] STUNTZ, N. : *Numerische Simulation der Schiffsumströmung mit Berücksichtigung des Propellersogs*, Universität Duisburg-Essen, Diss., 2006
- [10] VILSMEIER, R. ; HÄNEL, D. : Computational Aspects of Flow Simulation on 3-D, Unstructured, Adaptive Grids. In: HIRSCHHEL, E. H. (Hrsg.): *Flow Simulation with High-Performance Computers II*. Braunschweig : Vieweg Verlag, 1996, S. 431–446