



Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e. V.
DST – Development Centre for Ship Technology and Transport Systems

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
Förderkennzeichen 03SX246A

Verbundvorhaben: SIPAS – Methoden zur Ermittlung und Einhaltung
eines sicheren Passierabstandes von Schiffen beim Überholen und
Begegnen im begrenzten Fahrwasser

Teilvorhaben SIPAS-MAP: Modellierung, Analyse und Parametrisierung
hydrodynamischer Wirkungen und Kollisionsursachen beim Passieren
von Seeschiffen

Bericht 2026 – Mai 2011

von

Dipl.-Ing. B. Friedhoff

Dr.-Ing. A. Gronarz

Dipl.-Math. R. Kaiser

Dipl.-Ing. S. List

Dr.-Ing. C. Thill

Projektleiter:

Dipl.-Ing. B. Friedhoff

Direktor:

Prof. Dr. P. Engelkamp

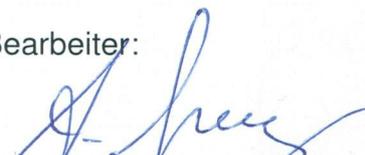
**Verbundvorhaben: SIPAS - Methoden zur Ermittlung und Einhaltung eines
sicheren Passierabstandes von Schiffen beim Überholen und Begegnen im
begrenzten Fahrwasser;**

**Teilvorhaben SIPAS-MAP: Modellierung, Analyse und Parametrisierung
hydrodynamischer Wirkungen und Kollisionsursachen beim Passieren von
Seeschiffen**

Duisburg, im Mai 2011

Fachbereich Schiffshydrodynamik

Bearbeiter:


.....
(Dr.-Ing. A. Gronarz)


.....
(Dipl.-Math. R. Kaiser)

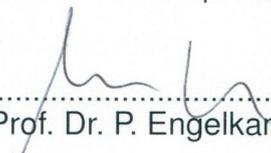

.....
(Dipl.-Ing. S. List)


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

Projektleiter:


.....
(Dipl.-Ing. B. Friedhoff)

DST – Entwicklungszentrum für
Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.


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

Inhaltsverzeichnis

I.	Einleitung	5
1.	Verbundvorhaben SIPAS	6
2.	Teilprojekt SIPAS-MAP	9
II.	Experimentelle Untersuchungen	11
3.	Versuchsanlagen des DST	14
4.	Vorversuche und Validierungsmessungen	17
4.1.	Wandeeinfluss	17
4.2.	Einfluss der dynamischen Schwimmelage	19
4.3.	Einfluss der Propulsion	20
4.4.	Driftversuche	20
4.5.	Minimierung der Anfahrwelle	21
5.	Steuerkräfte beim Passieren	23
5.1.	Ruderwirksamkeit während eines Passiervorgangs	23
5.2.	Einfluss des Betriebspunktes der Antriebsanlage	27
6.	Passiervorgänge mit gefesselten Modellen	29
6.1.	Verwendete Modellfamilie	29
6.2.	Aufstellung der Versuchsmatrix	31
6.3.	Einfluss des Passierabstands	32
6.4.	Einfluss der Wassertiefe	34
6.5.	Einfluss der Geschwindigkeit des Eigenschiffs	36
6.6.	Einfluss des Kurswinkels	37
7.	Versuche mit frei fahrendem Modell	39
7.1.	Set-Up der Versuche	39

7.2.	Versuche ohne Ruderaktivität	40
7.3.	Versuche mit Autopilot	41
7.4.	Ergänzende Untersuchungen	44
III.	Numerische Untersuchungen	46
8.	Programmpaket MOUSE	48
8.1.	Methoden des Basislösers	48
8.2.	Beschreibung der Overset-Methode	50
8.3.	Weiterentwicklung der Overset-Methode	51
8.3.1.	Bewegungsmodelle	51
8.3.2.	Propellermodell	53
8.3.3.	Parallelisierung der Overset-Objekt Methode	54
8.4.	Dynamische Schwimmlage	56
8.4.1.	Simulationen zu Driftversuchen	56
8.4.2.	Simulationen zum Tankwandeinfluss	57
8.5.	Numerische Simulationen von Passiervorgängen	59
8.5.1.	Passiervorgang an einem ruhendem Schiff	59
8.5.2.	Passiervorgänge durch Überholen des Feeders	67
8.5.3.	Simulationen zur Untersuchung des Schrägpassierens	79
8.5.4.	Paralleles Passieren und Surf Riding	91
9.	Ergänzende Untersuchungen mit Ansys-CFX	95
9.1.	Verfahren zur Berechnung der Ruderkräfte	95
9.2.	Beschreibung der Berechnungsfälle	96
9.3.	Gittergenerierung	100
9.4.	Ergebnisse	102
IV.	Mathematische Modellierung	106
10.	Aufbereitung der Daten aus EFD und CFD	107
10.1.	Dimensionslosmachung	107
10.2.	Glättung und Messdatenaufbereitung	109
10.3.	Erstellung einer Datenbank	112

11. Modellierungsansätze	117
11.1. Konservative Modellierung	117
11.1.1. Lineare Regression	118
11.1.2. Nichtlineare Regression	118
11.2. DARWIN	120
11.3. ANN (Artificial Neural Networks)	121
11.4. Hybrid-Regression	123
11.4.1. Einflussfunktionen	124
11.4.2. Grundkurven	128
11.4.3. Korrekturen	135
12. Testprogramm für das Kräftemodell	141
12.1. Berücksichtigung des Begegnungswinkels	141
12.2. Dynamische Programmierung	143
12.2.1. Allgemeine Formulierung der Grundkurve	144
12.2.2. Grundlagen zum Formelparser	145
12.2.3. Formelparser für die Einflussfunktionen und den Parameter der Grundkurve	146
12.2.4. Datenfeld für den Formelparser	148
12.3. Kontrolle der modellierten Kräfte	149
12.3.1. Einzelkurven	150
12.3.2. Parametervariationen	150
12.3.3. Situationsgrafiken	154
V. Zusammenfassung und Erfolgsbeurteilung	156

Abbildungsverzeichnis

3.1.	Versuchsanlagen des DST	14
3.2.	Schleppwagen und Schnellschleppanlage	15
3.3.	Post-Panmax Schiff überholt Feeder	15
3.4.	Modell des Feeders ausgerüstet für die Freifahrt	16
4.1.	Freie Oberfläche mit Wandeinfluss	18
4.2.	Wandeinfluss im Wellenlängsschnitt	19
4.3.	Einfluss der Absenkung auf das Primärwellensystem	19
4.4.	Einfluss der Propulsion auf das Wellensystem	20
4.5.	Einfluss der Beschleunigung auf Anfahrwelle	22
5.1.	Ruderkraftverläufe beim Passieren	24
5.2.	Normierte Querkraftverläufe von Rumpf und Ruder	25
5.3.	Verläufe des Drehmoments um den Hauptspant mit und ohne Ruderwinkel	26
5.4.	Ruderkraft bei Variation von Drehzahl und Anströmgeschwindigkeit	28
6.1.	Kräfte und Moment bei einem Überholvorgang	30
6.2.	Variation des Passierabstands	33
6.3.	Minima der Längskräfte als Funktion des Abstands	33
6.4.	Variation der Wassertiefe	34
6.5.	Passiervorgänge mit gleichen Tiefenfroudezahlen	35
6.6.	Giermoment bei gleichen Tiefenfroudezahlen	36
6.7.	Einfluss der Eigenschiffsgeschwindigkeit	37
6.8.	Passieren des querliegenden Feeders (Foto)	38
7.1.	Passiersequenz ohne Ruderaktivität	41
7.2.	Verlauf des Ruderwinkels bei Nutzung des Autopilots	41
7.3.	Kurs und Querversatz des mit Autopilot fahrenden Modells	42
7.4.	Einfluss des „Surf Ridings“	43
7.5.	Korrelation von Trimm und Längskraft	44
7.6.	Ruderwinkel und Kurs aus einem Schlängelversuch	45

8.1.	Bedingte und vorgeschriebene Bewegungsmodelle	52
8.2.	Propellermodell Modifikation	54
8.3.	Giermoment und Trimmwinkel unter Drifteinfluss	57
8.4.	Positionierung des Schiffsgitters im Simulationsgebiet	58
8.5.	Ausgangspositionen der Schiffsgitter	60
8.6.	Ruhender Feeder bei einem Differenzwinkel von 0°	61
8.7.	Kräfte und Giermoment am Stilllieger bei 0° Kurswinkeldifferenz	61
8.8.	Absenkung und Trimmwinkel bei 0° Kurswinkeldifferenz	62
8.9.	Ruhender Feeder bei einem Differenzwinkel von 90°	63
8.10.	Kräfte und Giermoment am Stilllieger bei 90° Winkeldifferenz	64
8.11.	Absenkung und Trimmwinkel bei 90° Differenzwinkel	64
8.12.	Ruhender Feeder bei einem Kurswinkel von 45°	65
8.13.	Kräfte und Giermoment am Stilllieger bei 45° Winkeldifferenz	66
8.14.	Absenkung und Trimmwinkel bei 45° Differenzwinkel	66
8.15.	Startpositionierung zweier bewegter Schiffsgitter	68
8.16.	Passiervorgang mit zwei bewegten Schiffsgittern	69
8.17.	Kräfte und Giermoment am Feeder bei zwei bewegten Schiffsgittern	70
8.18.	Absenkung und Trimmwinkel am Feeder bei zwei bewegten Schiffsgittern	70
8.19.	Geschwindigkeitsüberlagerung beim parallelen Passieren	71
8.20.	Absenkung des Feeders auf unterschiedlich langen Simulationsgebieten	72
8.21.	Trimmwinkel des Feeders auf unterschiedlich langen Simulationsgebieten	72
8.22.	Passieren des Feeders im verlängerten Simulationsgebiet	73
8.23.	Kräfte und Giermoment am Feeder im verlängerten Simulationsgebiet	73
8.24.	Absenkung und Trimmwinkel am Feeder im verlängerten Simulationsgebiet	74
8.25.	Modifizierte Geschwindigkeitsüberlagerung beim parallelen Passieren	76
8.26.	Stationäre Lösung als Initialisierung für den Überholvorgang	76
8.27.	Kräfte und Giermoment am Feeder	77
8.28.	Absenkung und Trimmwinkel am Feeder	77
8.29.	Kräfte und Giermoment aus der Simulation am KCS und am Feeder	78
8.30.	Absenkung und Trimmwinkel aus der Simulation am KCS und am Feeder	78
8.31.	Gitter zur Untersuchung des Schrägpasrierens	80
8.32.	Auslenkung der Oberfläche bei einem parallelen Passierabstand von 0,8 m	81
8.33.	Auslenkung der Oberfläche bei einem parallelen Passierabstand von 2,5 m	81
8.34.	Querkraft bei unterschiedlichen parallelen Passierabständen	82
8.35.	Giermoment bei unterschiedlichen parallelen Passierabständen	83
8.36.	Absenkung bei unterschiedlichen parallelen Passierabständen	83
8.37.	Trimmwinkel bei unterschiedlichen parallelen Passierabständen	84

8.38.	Position der Modelle und Wasserspiegelauslenkung der Startlösung	85
8.39.	Initialisierung des Schrägpassierens	86
8.40.	Überlagerte Geschwindigkeit des Feeders beim Schrägpassieren	86
8.41.	Auslenkung der Oberfläche während des Schrägpassierens	87
8.42.	Gleicher lichter Abstand des Feeders zum KCS	88
8.43.	Skizze der Trajektorienschneidpunkte	89
8.44.	Querkräfte am Feeder beim parallelen und schrägen Passieren	89
8.45.	Längskräfte am Feeder beim parallelen und schrägen Passieren	90
8.46.	Giermomente am Feeder beim parallelen und schrägen Passieren	90
8.47.	Geschwindigkeitsänderung durch Krafteinfluss beim Passieren	92
8.48.	Änderung der Längskraft durch Krafteinfluss beim Passieren	92
8.49.	Änderung der Absenkung durch Krafteinfluss beim Passieren	93
8.50.	Geschwindigkeitsverteilung in einer Surf Riding Position	94
9.1.	Geometrie Propeller-Ruder-Kombination	97
9.2.	Freifahrtdiagramm Propeller P258	98
9.3.	Schematische Darstellung der Randbedingungen.	99
9.4.	Teilgitter des Lösungsgebietes.	101
9.5.	Oberflächengitter auf dem Ruder und der Propellerscheibe.	102
9.6.	Prismenschichten am Ruder.	102
9.7.	Kräfte am Ruder aufgetragen über Fortschrittsgrad für V_A - und n -Variation.	103
9.8.	Kräfte am Ruder aufgetragen über normierten Variationsparametern.	104
9.9.	Geschwindigkeitsverteilung in z-Ebene für Fortschrittsgrad $J = 0,4$	104
9.10.	Geschwindigkeitsverteilung in z-Ebene für Fortschrittsgrad $J = 0,6$	105
10.1.	Beispiel für die Glättung der Messwerte.	111
10.2.	Auswertung SimuBin.	112
10.3.	Datenbankprogramm UebBegMultiDB.	113
11.1.	Interpolation des Giermomentes mit DARWIN.	121
11.2.	Ausgangsdaten für das Training des neuronalen Netzes.	122
11.3.	Ergebnis mit den Eingangsdaten für das Training.	123
11.4.	Ausgangsdaten für die Generierung der Grundkurve.	131
11.5.	Charakteristische Beträge des Giermoments	132
11.6.	Lage der Extrema des Giermoments	132
11.7.	Interpolation bei den Segmenten der Grundkurve.	134
11.8.	Modellierung der Grundkurve (Giermoment N).	135
11.9.	Wassertiefenabhängigkeit der Amplituden von X, Y und N.	137



11.10. Normierte Wassertiefenabhängigkeit der Amplituden.	138
12.1. OS-Drehung beim Schrägpässieren.	143
12.2. Demoprogramm mit Tabelle und Kurve in Full Scale.	151
12.3. Grundkurve für das Giermoment N'	152
12.4. Abklingen der Wirkung bei wachsendem Seitenabstand.	153
12.5. Abklingen der Wirkung bei zunehmender Wassertiefe.	154
12.6. Variation der Geschwindigkeit des Target Ships.	154
12.7. Kräfte am OS beim Schrägpässieren.	155

Tabellenverzeichnis

6.1. Modellfamilie der untersuchten Seeschiffe	30
9.1. Berechnungsfälle V_A -Variation	98
9.2. Berechnungsfälle Drehzahl-Variation	99
10.1. Ergebnisse der besten Korrelationen	109
10.2. Versuchsspezifische Parameter	110
10.3. Grundfunktionen der Datenbank	114
10.4. Funktionen der Datenauswahl	115
10.5. Funktionen der Datenauswertung	116
11.1. Ausgewählte Einflussfunktionen	128
11.2. Anzahl der Variationen der einzelnen Parameter	129
12.1. Koeffizienten der Grundkurve	144
12.2. Parameterdatei Abstandsvariation	151

Symbolverzeichnis

Allgemeine Symbole

a_i	Polynomkoeffizienten der Abszisse ($i=0..3$)	-
A	Amplitude	-
A_0	Propellerkreisfläche	m^2
A_{dV}	Exponent der Korrektur für die Geschwindigkeitsdifferenz	-
A_e	Projizierte Propellerfläche	m^2
A_h	Exponent der Wassertiefenkorrektur	-
A_K	Kanalquerschnittsfläche	m^2
A_M	Hauptspantfläche	m^2
A_{mB}	Exponent der Korrektur für das Massen-Breiten Verhältnis	-
A_{mot}	Exponent der Korrektur für das Massen-Verhältnis OS-TS	-
A_{Typ}	Exponent der Richtungskorrektur	-
A_{Vmx}	Exponent der Korrektur für die Maximalgeschwindigkeit	-
A_{Vt}	Exponent der Korrektur für die Geschwindigkeit des TS	-
A_y	Exponent der Seitenkorrektur	-
b_i	Polynomkoeffizienten der Ordinate ($i=0..3$)	-
B	Breite	m
B_m	Mittlere Breite OS,TS	m
B_o	Breite OS	m
B_t	Breite TS	m
c	Geschwindigkeit der Stauwelle	m/s
C	Beiwert, Koeffizient	-
C_0	Linearer Koeffizient	-
C_n	Nichtlinearer Koeffizient	-
C_B	Blockkoeffizient	-
C_{Bo}	Blockkoeffizient des Eigenschiffs	-
C_{Bt}	Blockkoeffizient des Fremdschiffs	-
C_{F0}	Reibungsbeiwert nach ITTC'57 Korrelation	-
D	Durchmesser	m
D	Passierabstände	m
e	Eulersche Zahl	-
e	Exponent der Dämpfungsfunktion	-
E_e	Exponent der Dämpfungsfunktion	-
F	Kraft allgemein	N
F_A	Auftriebskraft	N

F_G	Gewichtskraft	N
Fr	Froudezahl	-
Fr_h	Tiefenfroudezahl	-
Fr_{ho}	Tiefenfroudezahl des Eigenschiffes	-
Fr_{ht}	Tiefenfroudezahl des Fremdschiffes	-
Fr_{max}	Maximale Froudezahl	-
Fr_o	Froudezahl des Eigenschiffes	-
Fr_t	Froudezahl des Fremdschiffes	-
FT	Faktor für die Typkorrektur	-
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
h	Wassertiefe	m
J	Fortschrittsgrad	-
K_Q	Momentenbeiwert	-
K_T	Schubbeiwert	-
L	Länge allgemein	m
L_m	Mittlere Länge OS,TS	m
L_o	Länge des Eigenschiffes	m
L_{PP}	Länge zwischen den Loten	m
L_t	Länge des Fremdschiffes	m
m	Masse	kg
m_o	Masse des Eigenschiffes	kg
m_t	Masse des Fremdschiffes	kg
m	Versperrungsverhältnis	-
M	dynamisches Trimmmoment um die y-Achse	Nm
M_A	dynamisches Auftriebsmoment um die y-Achse	Nm
M_G	dynamisches Gewichtsmoment um die y-Achse	Nm
n	Drehrate	1/s
n	Nichtlinearer Exponent	-
N	Anzahl	-
N	Giermoment	Nm
N'	dimensionsloses Giermoment	-
ρ	Druck	N/m ²
P	Steigung (Pitch)	m
P_B	Bremsleistung	W
P_D	Drehleistung	W
P_E	Effektivleistung	W
P_{mB}	Exponent der Korrektur für das Massen-Breiten Verhältnis	-

P_{mot}	Exponent der Korrektur für das Massen-Verhältnis OS-TS	-
P_{Vmx}	Exponent der Korrektur für die Maximalgeschwindigkeit	-
P_y	Exponent der Abstandskorrektur	-
Q	Drehmoment	Nm
R	Widerstand	N
Re	Reynoldszahl	-
sqt	Squat	m
t	Zeit	s
t_r	Relative Passierzeit	-
T	Propellerschub	N
T	Tiefgang	m
T_m	Mittlerer Tiefgang OS, TS	m
T_o	Tiefgang des Eigenschiffes	m
T_t	Tiefgang des Fremdschiffes	m
Typ	Passierrichtung (1 = Überholen, -1 = Begegnen)	-
V	Geschwindigkeit allgemein	m/s
ΔV	Geschwindigkeitsdifferenz OS-TS	m/s
V_{max}	Maximalgeschwindigkeit	m/s
V_o	Geschwindigkeit des Eigenschiffes	m/s
V_t	Geschwindigkeit des Fremdschiffes	m/s
V_A	Anströmgeschwindigkeit	m/s
V_S	Schiffsgeschwindigkeit	m/s
$w_0(x)$	lokale Kanalbreite in der ungestörten Wasserfläche	m
W_y	Exponent der Abstandskorrektur	-
X	Längskraft	N
X'	dimensionslose Längskraft	-
y	seitlicher Abstand	m
Y	Seitenkraft	N
Y'	dimensionslose Seitenkraft	-
Y	Querkraft	N
Z	Flügelzahl	-
Z	dynamische Auftriebskraft	N
z_{VM}	mittlere dynamische Absenkung	m
β	Driftwinkel	°
β	künstliche Schallgeschwindigkeit	-
η_D	Propulsionsgütegrad	-
λ	Maßstabszahl	-

π	Kreiszahl	-
ϕ	Phasenwinkel	-
ψ	Kurs	°
ψ_{OS}	Kurs des Eigenschiffes	°
ψ_{TS}	Kurs des Fremdschiffes	°
ρ	Dichte	kg/m ³
ρ_W	Dichte des Wassers	kg/m ³
ρ_L	Dichte der Luft	kg/m ³
σ	Spannungstensor ohne Druckanteil	-
τ	künstliche Zeit	s
θ	dynamischer Trimmwinkel	min
ζ	Wellenerhebung	m
ω	Kreisfrequenz	1/s

Abkürzung

CFD	Computational Fluid Dynamics
DARWIN	Datenreduktions- und -wichtungsinterpolation
EFD	Experimental Fluid Dynamics
KCS	KRISO Container Ship
OS	Own Ship (Eigenschiff)
PMM	Planar Motion Mechanism
TS	Target Ship (Fremdschiff)

Teil I.
Einleitung

1. Verbundvorhaben SIPAS

Die meisten Kollisionen zwischen Schiffen ereignen sich in flachem und seitlich begrenztem Fahrwasser. Nicht nur durch die im seitlich begrenztem Fahrwasser unvermeidliche Nähe der Begegnung, sondern auch durch Effekte der Flachwasserhydrodynamik kommt es hierbei zu äußerst komplexen Interaktionen, die insbesondere bei Überholmanövern zu gefährlichen Situationen führen können¹. Unfälle ereignen sich folglich besonders häufig im Zu- und Ablauf von Seehäfen, weil durch das Größen- und Geschwindigkeitswachstum von modernen Seeschiffen diese kritischen Situationen immer häufiger auch in gut ausgebauten Zufahrtsgewässern auftreten. Dabei sind Seeschiffe weder von der Reaktionszeit der Antriebsanlage noch von der Wirksamkeit der Steuerorgane an diese besonderen Bedingungen angepasst, wie es bei Binnenschiffen aufgrund deren Entwicklung und Optimierung für genau diesen Fahrzustand im allseits begrenztem Fahrwasser per Definition der Fall ist. Für Binnenschiffe wurden Wechselwirkungen bereits in Projekten wie „Interaktion“, „SicherBin“ und „SimuBin“ erfolgreich untersucht. Für das hier beschriebene Projekt SIPAS-MAP konnte also auf diese Erfahrungen zurückgegriffen werden.

Bei Unfällen mit Seeschiffen können neben beträchtlichen Sachschäden² auch große volkswirtschaftliche Verluste durch die Beeinträchtigung des Verkehrs und Umweltschäden auftreten. Es besteht also sowohl ein wirtschaftliches als auch ein gesellschaftliches Interesse, solche Schäden in Zukunft zu vermeiden. Um dies zu erreichen, müssen bestimmte Wissenslücken, die sich aus der spezifischen Situation von passierenden Seeschiffen ergeben, geschlossen werden. Hierzu haben sich die Hochschule Wismar, die Rheinmetall Defence Electronics und das Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme im Rahmen des hier beschriebenen Verbundvorhabens zusammengeschlossen.

¹Das Überholen ist deshalb kritischer zu sehen als das Begegnen, weil aufgrund der geringen Differenzgeschwindigkeit die Interaktionen länger wirken und damit der Einfluss auf den Kurs bzw. die Bewegung der Schiffe zunimmt.

²Bekanntes Beispiel für einen solchen Unfall ist die Kollision der Nedlloyd Finland mit der Cosco Hamburg am 01. März 2004, bei der sogar ein Todesfall zu verzeichnen war.[11]

Der vollständige Titel des Projekts SIPAS lautet:

Methoden zur Ermittlung und Einhaltung eines sicheren Passierabstandes
von Schiffen beim Überholen und Begegnen im begrenzten Fahrwasser

Das Vorhaben wurde von Anfang 2008 bis Ende 2010 unter der Federführung der Hochschule Wismar in den nachstehenden Teilprojekten durchgeführt.

SIPAS-OM Operationelle Methoden für die Schiffsführung und Anwendung in Ship-handling Simulatoren (Hochschule Wismar, Fachbereich Seefahrt Warnemünde)

SIPAS-MAP Modellierung, Analyse und Parametrisierung hydrodynamischer Wirkungen und Kollisionsursachen beim Passieren von Seeschiffen (DST - Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V., Duisburg)

SIPAS-SIM : Modellierung und Implementierung von Kräften an Seeschiffen in Ship-handling Simulatoren und verbesserte Darstellung der Wellensysteme am Schiff (Rheinmetall Defence Electronics Bremen, RDE)

Die Aufgaben im Verbundvorhaben waren vereinfacht dargestellt so verteilt, dass in SIPAS-SIM die hydromechanischen Zusammenhänge, welche in SIPAS-MAP untersucht und modelliert wurden, in die Simulator Software implementiert wurden. SIPAS-OM befasste sich zunächst mit der Analyse und Bewertung dokumentierter Kollisionen, woraus wertvolle Randbedingungen für die Untersuchungen in SIPAS-MAP abgeleitet werden konnten. Die neuen Simulatormodelle wurden umfassend in SIPAS-OM geprüft und zur Entwicklung von Empfehlungen für die Ausbildung und Schiffsführung eingesetzt.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse des Teilprojekts SIPAS-MAP. In diesem Teilprojekt wurden am DST mit einer repräsentativen Serie von vier verschiedenen Seeschiffen insgesamt über 500 Modellversuche durchgeführt. Neben Detailuntersuchungen und Messungen für die Validierung der numerischen Verfahren (vgl. Kapitel 4 auf Seite 17) umfassten die Messkampagnen eine umfangreiche parametrische Variation der Wassertiefe, der Geschwindigkeiten, der Querabstände und der Modellpaarungen für zwangsgeführte Passiervorgänge unter Einsatz der beiden simultan operierenden Schleppwagen des DST (Kapitel 6 auf Seite 29). Des Weiteren wurden ausgewählte Überholmanöver mit einem frei fahrenden Modell (vgl. Kapitel 7) und einem zwangsgeführten Überholer durchgeführt, wobei anstelle der resultierenden, instationären Kräfte die sich ergebende Trajektorie des mit verschiedenen Autopilot-Profilen frei fahrenden Modells aufgezeichnet wurde. Umfangreiche CFD-Simulationen dienten dem weiteren Verständnis der komplexen Hydromechanik und erlaubten die experimentell nicht darstellbare Variation des Begegnungswinkels (vgl. Teil III ab Seite 47).

Hierauf basierend wurde eine aufwändige mathematische Modellierung der Interaktion zwischen passierenden Schiffen entwickelt (siehe Teil IV ab Seite 107), welche im Teilprojekt SIPAS-SIM in die Shiphandling Simulatoren implementiert wurde. Im Teilprojekt SIPAS-OM wurden abschließend Trainingsszenarien entwickelt und Empfehlungen für den Schiffsbetrieb abgeleitet.

Für eine umfangreichere Beschreibung des Verbundvorhabens wird auf den Abschlussbericht der Projektkoordination in SIPAS-OM und [1] verwiesen. Der Fokus des vorliegenden Dokumentes liegt auf den hydromechanischen Untersuchungen und der darauf aufbauenden mathematischen Modellierung der Passiereffekte.

2. Teilprojekt SIPAS-MAP

Die realitätsnahe Abbildung von Passiervorgängen in Schiffsführungssimulatoren setzt eine geeignete Darstellung der hochkomplexen hydromechanischen Abläufe voraus. Da eine direkte Simulation in Echtzeit mit heute verfügbaren Rechenleistungen und numerischen Berechnungswerkzeugen mittelfristig nicht realisierbar ist, war die Erstellung einer effizienten aber gleichzeitig robusten und detaillierten mathematischen Modellierung der Kenngrößen bei instationären Begegnungssituationen wesentliches Ziel des Teilprojekts SIPAS-MAP.

Hierbei konnte auf den zuvor am DST durchgeführten Untersuchungen im Rahmen der BMBF- bzw. BMWi-finanzierten Projekte „SicherBin – Verbesserung der Verkehrssicherheit auf Binnenwasserstraßen an Engpass- und Gefahrenstellen“ [9] und „SimuBin – Modellierung und Simulation der realitätsnahen Schiffsbewegungen auf Binnenwasserstraßen“ [2] aufgebaut werden. Während in diesen Projekten nur Teilaspekte des weiten Gebietes der Schiff-Schiff-Interaktion analysiert wurden, galt es nun, eine umfassende Modellierung zu entwickeln, die möglichst viele Einflussgrößen berücksichtigt und in allen Parameterräumen physikalisch sinnvolle Effekte vorhersagt. Mittels umfangreicher experimenteller und numerischer Untersuchungen wurde ein mathematisches Kraftmodell erstellt, welches mit erprobten Methoden der Simulatorsoftware in die jeweiligen Schiffsbewegungen überführt wird.

Auch wenn für die Quantifizierung eines *sicheren Passierabstands* eigentlich nur kritische Situationen präzise abgebildet werden müssen, stellt die Implementierung der Modellierung in die Simulatoren eine große Herausforderung dar. Kollisionen resultieren meist aus –zumindest in der ersten Phase des Manövers– weitgehend parallelen Passiervorgängen, bei denen in seitlich und in der Wassertiefe begrenztem Fahrwasser ein großes Schiff ein oder mehrere kleine Fahrzeuge überholt. Da der Schwerpunkt des Verbundvorhabens auf dem erforderlichen Passierabstand beim Passieren im Sinne von Begegnen und Überholen lag, wäre ein denkbarer Ansatz gewesen, das Kräftemodell nur für ausgewählte Situationen zu erstellen und die Interaktion beispielsweise bei sich unter großem Winkel kreuzenden Trajektorien auszublenden. Bereits in einem sehr

frühen Projektstadium einigten sich die Partner jedoch, eine „Maximallösung“ anzustreben. Das neu entwickelte Passiermodul deckt also den gesamten Parameterraum ab, was einen extrem hohen Modellierungsaufwand mit sich bringt und eine iterative Verbesserung der Methodik erforderte.

Im Kontext der Shiphandling-Simulation wird das Schiff, dessen Fahrt primär simuliert wird, als Eigenschiff oder Own Ship bezeichnet. Ein Schiff, dessen Fahrt nicht im Fokus der Simulation steht, nennt man Target Ship. Die erstellte Modellierung bildet primär die Wirkung eines fahrenden Target Ships auf das Own Ship ab. Grenzfälle wie das *Banking*, welches auftritt, wenn das Own Ship an einem still liegenden Target Ship vorbeifährt, sind nicht im Detail enthalten. In diesem Fall wäre die Ursache der Interaktion nicht die direkte hydromechanische Wirkung des Target Ships, sondern die Hydrodynamik des Own Ships, welche durch die pure Anwesenheit eines weiteren Schiffes, welches dann eher die Charakteristik einer Fahrwasserberandung oder einer wasserbaulichen Konstruktion aufweist, verändert wird. Für gewöhnliche Passiervorgänge sind diese Effekte zwar implizit enthalten, jedoch konnte gezeigt werden, dass der Einfluss der Eigenschiffsgeschwindigkeit eher gering ist.

Im weiteren Verlauf dieses Berichts werden zunächst die durchgeführten experimentellen Untersuchungen vorgestellt und ausgewählte Teilergebnisse präsentiert. Darauf folgt die Darstellung der Methodik der numerischen Verfahren, für die ebenfalls ausgewählte Validierungen und Simulationsergebnisse beschrieben werden. Das im Antrag erwähnte Potentialverfahren UNOPAM wurde nicht, wie ursprünglich geplant, eingesetzt. Hier hatte sich bei der überlappenden Bearbeitung des Vorhabens „SimuBin - Modellierung und Simulation der realitätsnahen Schiffsbewegungen auf Binnenwasserstraßen“ (Förderkennzeichen 03SX222) in 2009 gezeigt, dass potentialtheoretische Verfahren relativ früh an ihre Grenzen stoßen und für extreme Passiersituationen nicht zielführend eingesetzt werden können. Für eine eingehendere Diskussion der eingesetzten Verfahren siehe [3]. Wie bereits in SimuBin wurden auch in SIPAS-MAP die mit UNOPAM geplanten Simulationen mit RANSE-Methoden durchgeführt.

Im Teil IV des Berichts wird beschrieben, wie die experimentell und numerisch gewonnenen Daten aufbereitet wurden und mit welchen Ansätzen die Modellierung untersucht und anschließend umgesetzt wurde. Ebenfalls dargestellt wird die entwickelte Testumgebung für das Kräftemodell.

Teil II.

Experimentelle Untersuchungen

Experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen des Teilprojekts SIPAS-MAP wurden umfangreiche Versuchsreihen durchgeführt. Diese Versuche dienten einem verbesserten Verständnis der hochkomplexen Abläufe bei Passiervorgängen zwischen Seeschiffen im allseits begrenzten Fahrwasser. Da Seeschiffe für tiefes Wasser entworfen und optimiert werden, kann die Strömung im flachen Wasser dem dreidimensional um den Schiffskörper herum optimierten Weg nicht mehr folgen. Sie wird annähernd zweidimensional in der horizontalen Ebene vom Schiffskörper verdrängt. Dabei nimmt die Krümmung der Stromlinien im Allgemeinen zu. Dadurch kann es zu unerwünschten Ablösungen und Strömungsbeeinflussungen kommen. Diese unbeabsichtigten Umströmungen machen dedizierte Untersuchungen am Seeschiff erforderlich und treten so beim Binnenschiff, welches für diesen Fahrzustand optimiert ist, nicht auf.

Die Modellversuche dienen zudem der Validierung numerischer Verfahren sowie als Basis für die neue mathematische Modellierung zur Verbesserung von Schiffsbrücken-Simulatoren. Gerade die Durchführung aussagekräftiger Modellversuche zu Überholvorgängen oder Begegnungen stellt hohe Anforderungen an die Versuchstechnik, auf die im folgenden Abschnitt 3 näher eingegangen wird. Neben dem Einfluss der Formparameter und Abmessungen der beteiligten Fahrzeuge, werden die auftretenden Phänomene wesentlich durch die geometrische Anordnung der Fahrzeuge zueinander aber auch zur Berandung der Wasserstraße und die jeweiligen Geschwindigkeiten dominiert, hierauf wird in Abschnitt 4 eingegangen. In Abschnitt 5 wird die Beeinflussung der Steuerorgane und die Auswirkung des Betriebspunktes der Antriebsanlage auf die Steuerfähigkeit analysiert. Durch diese getrennten Untersuchungen sind aussagekräftige Interpretationen der beobachteten Symptome beim Passieren von Seeschiffen möglich. Einige der Effekte können einzeln in Shiphandling-Simulatoren implementiert werden, wo sie nach dem Superpositionsprinzip einer Simulation zugänglich gemacht werden.

Als wesentliche Basis für die komplexe mathematische Modellierung der Interaktionskräfte und des Giermoments wurden unter Variation der charakteristischen Parameter zahlreiche Passiervorgänge mit gefesselten Modellen an simultan operierenden Schlepp-

wagen durchgeführt (Kapitel 6). Der gewählte Ansatz über ein solches Kräftemodell birgt gewisse Unsicherheiten, da die Kräfte erst im Simulator in die resultierenden Schiffsbewegungen umgesetzt werden. Durch diesen Zwischenschritt geht die Information über die Ursache der Kräfte und des Moments (beispielsweise entweder hydrodynamische Effekte aus einer Verdrängungsströmung oder aus der Schwerkraft resultierende, hydrostatische Kräfte in Folge einer geneigten Wasseroberfläche) verloren. Als Nachweis, dass die simulierten Bewegungen dennoch sehr realitätsnah sind, wurden zusätzliche Versuche mit einem frei fahrenden Modell durchgeführt (Kapitel 7).

3. Versuchsanlagen des DST

Nur wenige Schiffbau-Versuchsanstalten weltweit erlauben eine so effiziente Variation der wichtigsten Parameter wie sie im großen Flachwassertank des DST möglich ist. Durch Umpumpen des Wassers zwischen parallelen Schlepptanks (Abb. 3.1) kann die Wassertiefe ökonomisch und verhältnismäßig schnell geändert werden. Die unbemannte Schnellschleppanlage, die sonst für die Untersuchung von sehr schnellen Wasserfahrzeugen mit bis zu 15 m/s im Modell eingesetzt wird, kann mit einem modifizierten Antrieb auch für Versuche mit großen Modellen bei kleineren Geschwindigkeiten verwendet werden und bei entsprechendem Aufbau unter dem großen Schleppwagen hindurchfahren (siehe Abb. 3.2 und 3.3). Die Länge des Tanks von fast 200 m ermöglicht mit den beiden simultan operierenden Schleppwagen auch die Nachbildung von Passiervorgängen mit kleinen Geschwindigkeitsdifferenzen. Die Führung des Modells an der PMM-Anlage, der Messbühne oder zusätzlich installierten Trägersystemen unter dem großen Schleppwagen erlaubte eine große Bandbreite von möglichen Passierabständen. Stationär im Tank installierte Bodendrucksonden und nach Bedarf oberhalb der freien Wasseroberfläche angebrachte Wellensonden lieferten zusätzliche Informationen zu den hydrodynamischen Effekten. Des Weiteren wurden sämtliche Versuche fotografisch und mit Videoaufnahmen aus verschiedenen Perspektiven dokumentiert.

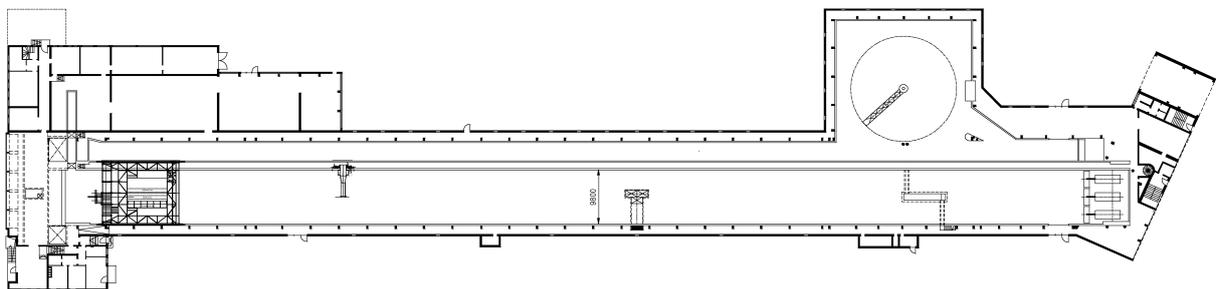


Abb. 3.1.: Die Versuchsanlagen des DST in der Draufsicht. Zu erkennen sind die parallelen Versuchsbecken, beide Schleppwagen sowie der Beobachtungstunnel für Unterwasseraufnahmen.



Abb. 3.2.: Die beiden Schleppwagen des DST. Links im Bild hinter dem konventionellen Schleppwagen steht die Schnellschleppanlage mit einem flachen, kurzen Ausleger, der das Passieren unter dem großen Schleppwagen erlaubt und in den hier dokumentierten Versuchen genutzt wurde.

Auch messtechnisch stellten die durchgeführten Untersuchungen teils große Herausforderungen dar. Bei einem großen Teil der Versuche mussten Messwerte von beiden Schleppwagen und von stationär installierten Wellensonden und Bodendruckdosen zusammengeführt und auf dem Messrechner aufgezeichnet werden. Mit den gemessenen Propulsionskenngrößen, Querkräften, Geschwindigkeiten, Ruderkräften und Schwimmlagen sowie der Verformung der freien Wasseroberfläche wurden in einigen Versuchen mehr als 50 Messwerte erfasst.



Abb. 3.3.: Versuchsaufbau mit dem Post-Panmax Schiff an der Schnellschleppanlage, das das kleine Feeder Schiff, welches am großen Schleppwagen installiert ist, überholt.

Zur Validierung der simulierten Schiffsantwort auf die Interaktionseffekte wurden weitere sehr aufwändige Modellversuche mit einem frei fahrenden Modell durchgeführt. Das Modell eines kleinen Feeder Schiffs wurde mit Akkumulatoren, einer Propulsionsanlage, aktiven Steuerorganen sowie umfangreicher Mess- und Regelungstechnik ausgestattet (Abb. 3.4), so dass sehr realistische Abläufe bei Passiervorgängen einschließlich der komplexen Schiffsdynamik unter verschiedenen Steuerprofilen abgebildet werden konnten.

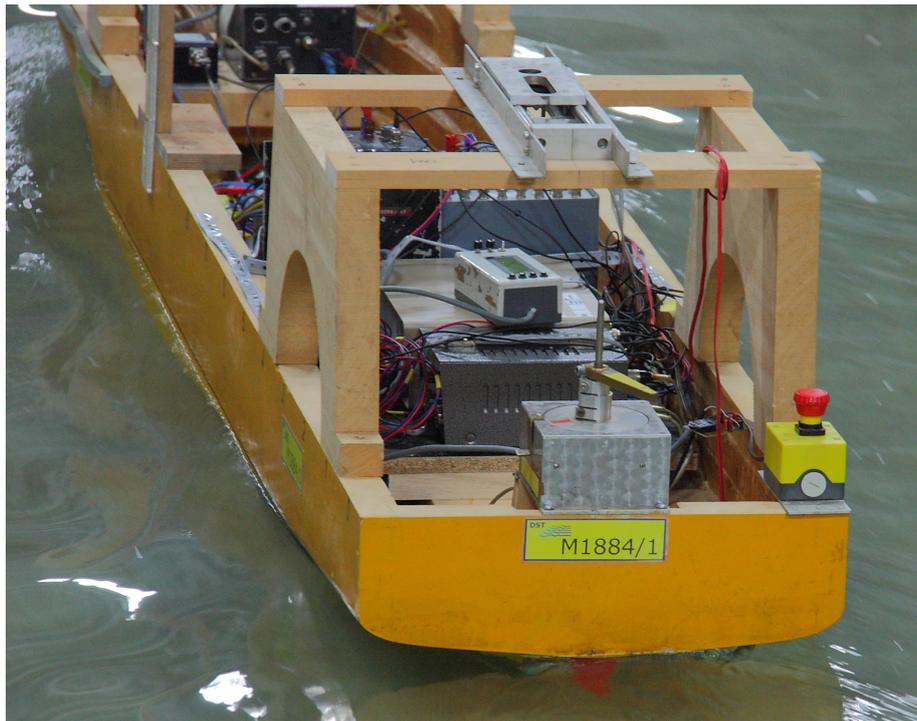


Abb. 3.4.: Das Modell des Container-Feeders ausgerüstet mit Rudermaschine, Energieversorgung, Propulsion, Fernsteuerung, Autopilot und Einheit zur Trägheitsnavigation.

4. Vorversuche und Validierungsmessungen

Bei der Aufstellung der Versuchsmatrix mussten zunächst die Schranken der zu variierenden Parameter identifiziert werden. Die Obergrenzen der Geschwindigkeit ergaben sich abhängig von der Auslegungsgeschwindigkeit des Schiffstyps, vom Verhältnis der Wassertiefe zum Tiefgang oder durch die Tiefenfroudezahl. Im Teilprojekt SIPAS-OM wurden die verfügbaren Daten von gemeldeten Kollisionen zur Identifikation relevanter Passierabstände herangezogen, während experimentell der Einfluss der Tankgeometrie analysiert wurde. Des Weiteren wurde untersucht, wie groß beispielsweise der Einfluss der Propulsion ist oder ob bei den numerischen Simulationen die aufwändige Berücksichtigung der dynamischen Schwimmelage erforderlich ist. Versuche mit einem stationär mit Drift geschleppten Modell dienten der Validierung der numerischen Verfahren. Ebenfalls parallel zu den umfangreichen parametrischen Passiervorgängen wurden mit verschiedenen Konfigurationen Untersuchungen zur Steuerfähigkeit durchgeführt.

4.1. Wandeinfluss

Neben den Ergebnissen der Analyse von registrierten Schiffsunfällen im Teilprojekt SIPAS-OM sind die experimentell zu untersuchenden Parameter auch durch die Randbedingungen der Versuchsanlagen begrenzt. Zunächst wurde der Einfluss der Geometrie des Schlepptanks untersucht. Da die neue mathematische Modellierung die Passiereffekte entkoppelt von so genannten Banking-Effekten beschreiben sollte, musste der Mindestabstand der Fahrzeuge von den Tankwänden untersucht und quantifiziert werden. Daraus ergeben sich unter anderem die realisierbaren Passierabstände im Schlepptank. Die Messungen wurden zudem zur Validierung der numerischen Simulationen verwendet, da die Effekte beim Banking eng mit den Passiereffekten verwandt sind. Der stationäre Strömungszustand unter Wandeinfluss vereinfacht jedoch die numerischen Berechnungen und ermöglicht so eine zuverlässige Validierung.

Zunächst wurde das Modell des Panmax Containerschiffs KCS bei einer Wassertiefe von 475 mm entsprechend 19 m in der Großausführung unter Variation von Geschwindigkeit und Wandabstand untersucht. Neben den Kräften am Modell, welche im Zusammenhang mit der Validierung des CFD-Pakets MOUSE (siehe Kapitel 8.4.2 auf Seite 57) dargestellt sind, wurde auch die Verformung der freien Oberfläche mit Wellensonden und Bodendrucksonden gemessen. Die Ausbildung des primären Wellensystems ist eine der wichtigsten Ursachen für die Wirkung auf ein kleineres Fahrzeug beim Passieren. Abbildung 4.1 zeigt den Einfluss der Fahrwasserberandung für eine Schiffsgeschwindigkeit entsprechend 18 kn und lichten Abständen entsprechend 40 bis 100 m. Basierend auf dem mit wachsendem Abstand stark nachlassenden Einfluss, der auch in Abbildung 4.2 gut erkennbar ist, wurde der hier dargestellte maximale Abstand als ausreichend für eine Vernachlässigung des Wandeinflusses angesehen. Die späteren Passiervorgänge wurden allesamt mit einem Mindestabstand entsprechend rund 100 m zur Tankwand durchgeführt.

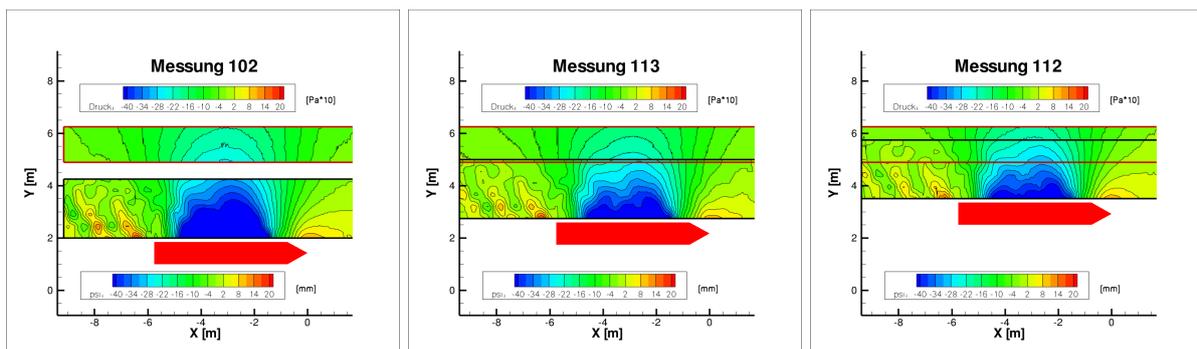


Abb. 4.1.: Verformung der freien Oberfläche gemessen mit Wellensonden (unterer Block) und Bodendruckdosen (oberer Block) bei verschiedenen Wandabständen und konstanter Geschwindigkeit. Bei einem lichten Wandabstand von 1000 mm (links, entsprechend 40 m in der Großausführung) ist die Absenkmulde des Primärwellensystems deutlich ausgeprägter als bei 1750 mm (Mitte, 70 m) oder 2500 mm (rechts, 100 m).

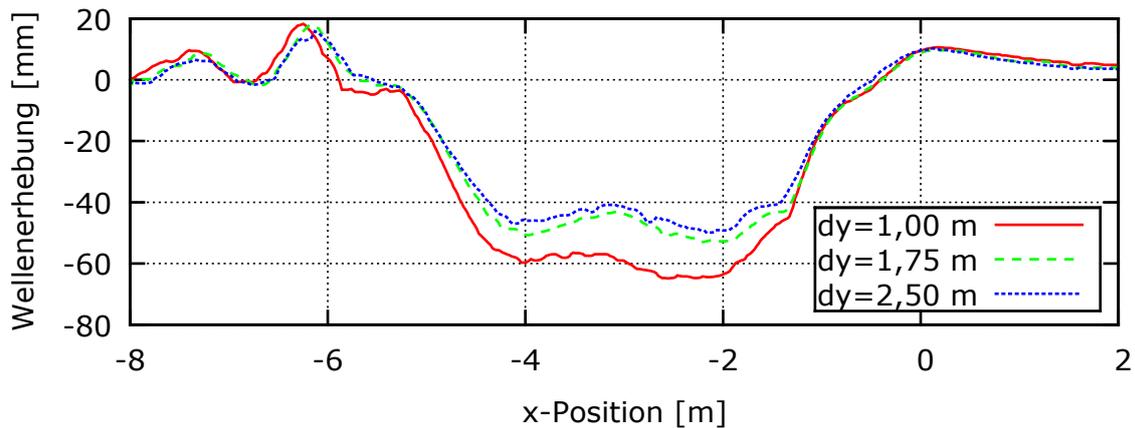


Abb. 4.2.: Vergleich der Wellenlängsschnitte bei drei verschiedenen Wandabständen gemessen auf der von der Wand abgewandten Seite des Modells im Abstand von 195 mm zur Außenhaut am parallelen Mittelschiff.

4.2. Einfluss der dynamischen Schwimmelage

Während sich die Modelle im Experiment im Normalfall frei vertrimmen und absenken können, bedeutet die Berücksichtigung der dynamischen Schwimmelage einen erheblichen Mehraufwand für die numerischen Untersuchungen. Um zu prüfen, ob dieser Aufwand für eine gute Wiedergabe der Wirkung des Überholers erforderlich ist, wurden Vergleichsmessungen mit und ohne freie Schwimmelage durchgeführt. Abbildung 4.3 zeigt deutlich, dass die Absenkung nicht nur wie das Primärwellental aus der beschleunigten Verdrängungsströmung und dem damit einhergehenden Druckabfall resultiert, sondern diesen Effekt noch verstärkt. Die Vernachlässigung der Absenkung am „Verursacher“ kann demnach zu einer Unterschätzung der Passiereffekte führen.

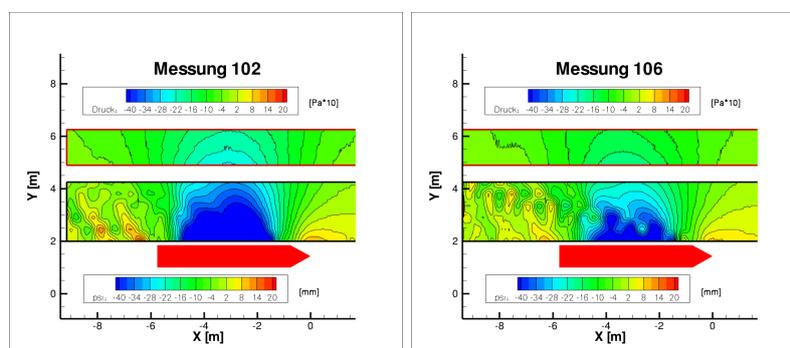


Abb. 4.3.: Verformung der freien Oberfläche gemessen mit Wellensonden (unterer Block) und Bodendruckdosen (oberer Block) bei konstanter Geschwindigkeit. Links das Wellensystem bei freier Schwimmelage, rechts mit unterdrückter Absenkung und Vertrimmung.

4.3. Einfluss der Propulsion

Die korrekte Berücksichtigung des Propulsionszustands stellt sowohl experimentell als auch numerisch einen deutlichen Mehraufwand dar. Auch hier zeigten Voruntersuchungen, dass das durch den Propeller induzierte Unterdruckfeld das Primärwellensystem und besonders die Absunkmulde verstärkt. Der Unterschied ist nicht so ausgeprägt, wie bei der dynamischen Schwimmelage, jedoch wurden basierend auf den in Abb. 4.4 dargestellten Differenzen nahezu alle Passiervorgänge mit Propulsion durchgeführt.

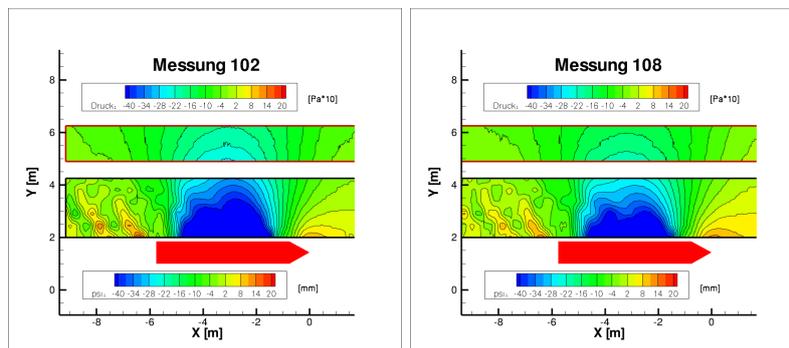


Abb. 4.4.: Verformung der freien Oberfläche gemessen mit Wellensonden (unterer Block) und Bodendruckdosen (oberer Block) bei konstanter Geschwindigkeit und identischem Wandabstand. Die linke Abbildung zeigt im Selbstpropulsionspunkt ein deutlich stärker ausgeprägtes Wellental als die rechts dargestellte Messung im Widerstandsversuch.

4.4. Driftversuche

Die Querkräfte und das Giermoment beim Passieren werden einerseits verursacht durch aus Geschwindigkeitsdifferenzen resultierende Druckgradienten im Fahrwasserquerschnitt, die sich wiederum als verformte freie Oberfläche zeigen und so zu einer Hangabtriebskraft führen, und andererseits durch eine Schräganströmung des gesamten oder Teilen des Schiffskörpers. Diese Effekte treten während eines Passiervorgangs überlagert und zeitlich veränderlich auf. Zur entkoppelten Betrachtung und Validierung der numerischen Verfahren wurden stationäre Versuche unter Schräganströmung bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Driftwinkeln durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Kapitel 8.4.1 auf Seite 56 zusammen mit den numerischen Simulationen dargestellt.

4.5. Minimierung der Anfahrwelle

Am Ende der Beschleunigungsphase einer jeden Messfahrt bei unterkritischen Geschwindigkeiten im Flachwassertank löst sich am Bug des Modells eine Anfahrwelle ab. Diese läuft mit der Stauwellengeschwindigkeit $c = \sqrt{gh}$ dem Modell voraus. Bei Schleppversuchen mit einzelnen Modellen beeinflusst diese Welle die Messung nur bei kleinen Geschwindigkeiten direkt, wenn eine Überlagerung der Reflektion vom anderen Tankende in der Messphase stattfindet. Sie ist jedoch die Hauptursache für die notwendige Wartezeit zwischen zwei Messfahrten, da diese Welle von den künstlichen Stränden nur sehr schwach dissipiert wird und je nach Wassertiefe eine Tanklänge in ein bis zwei Minuten durchläuft.

Besondere Relevanz erhält diese Welle bei der Abbildung von Passiervorgängen. Liegt die Anfahrwelle beim Passieren noch im Bereich des zu überholenden Modells, so überlagern sich die Auswirkungen in der Längskraft und der dynamischen Schwimmelage, und der instationäre Vorgang kann nicht korrekt ausgewertet werden.

Im Rahmen dieser Vorversuche wurde untersucht, mit welcher Beschleunigung des überholenden Schleppwagens die geringstmögliche Überlagerung der Anfahrwelle mit dem Passiervorgang erreicht wird. Abbildung 4.5 zeigt den Einfluss der Beschleunigung auf Position und Höhe der Anfahrwelle. Die Position der Wellensonde liegt etwa 85 m hinter dem Startpunkt des Schleppwagens. Je nach Relativgeschwindigkeit der Modelle muss der Überholvorgang wesentlich früher beginnen, so dass eine Überlagerung der Anfahrwelle häufig limitierend für die Wahl der Parameter ist. Eine geringe Beschleunigung verursacht eine schwächer ausgeprägte Anfahrwelle. Jedoch reduziert der späte Abschluss der Beschleunigung auch die verfügbare Zeit, in der die Welle sich vom Modell entfernt und damit den räumlichen Abstand der Welle vom verursachenden Modell während des Passiervorgangs. Die optimale Beschleunigung variiert entsprechend abhängig von Wassertiefe, Modellpaarung sowie der Relativ- und Absolutgeschwindigkeit.

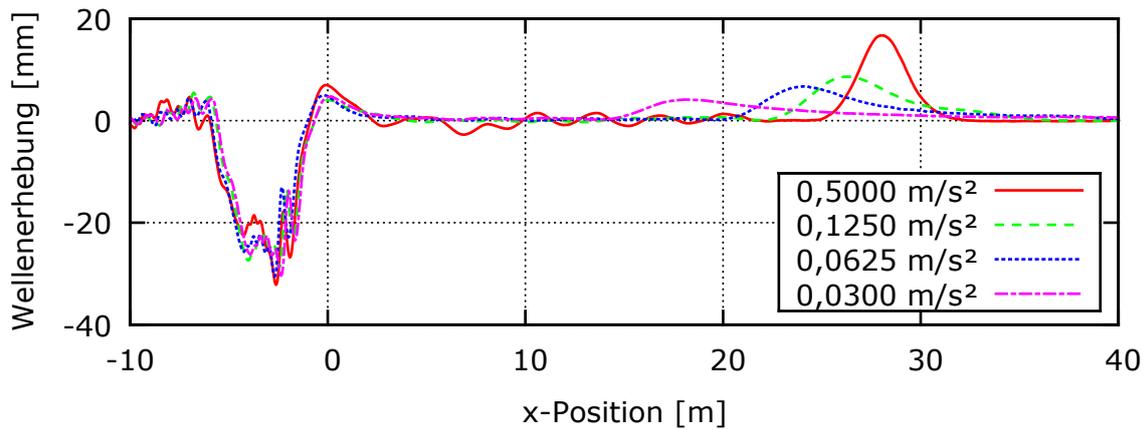


Abb. 4.5.: Wellenlängsschnitte des Panmax Containerschiffs KCS bei verschiedenen Beschleunigungen gemessen mit einer stationär im Tank angeordneten Wellensonde. Das vordere Lot befindet sich an x-Position 0. Eine hohe Beschleunigung führt zu einer sehr ausgeprägten Anfahrwelle (rot). Bei geringerer Beschleunigung ist neben der Amplitude auch der Abstand der Welle zum Modell deutlich verringert.

5. Steuerkräfte beim Passieren

Für eine zuverlässige Simulation und die Ableitung von Empfehlungen für die nautische Praxis ist es erforderlich, dass neben den „passiven“ Einflüssen, die nicht von der Schiffsführung kontrolliert werden, auch die beeinflussbaren Kräfte und Wirkungen analysiert werden. Zu diesen gehört die Wirkung des Ruders (siehe Kapitel 5.1) und des Betriebspunktes der Antriebsanlage (vgl. Kapitel 5.2).

5.1. Ruderwirksamkeit während eines Passiervorgangs

In Untersuchungsberichten zu Kollisionen bei Überholvorgängen wird häufig von einem Verlust der Ruderwirksamkeit berichtet. Dieses Phänomen tritt meist in einer späten Phase des Überholvorgangs auf, wenn das Hinterschiff und damit die Ruderanlage bereits hinter der Querabposition des Überholers liegen. Grundsätzlich sinkt der hydrodynamische Auftrieb beziehungsweise die erzeugte Querkraft des Ruders, wenn sich die Anströmgeschwindigkeit verringert, die Richtung der lokalen Anströmung ungünstig verändert oder wenn es zu einer massiven Ablösung der Strömung kommt. Um die erzielbaren Steuerkräfte im komplexen Umfeld aus Schiff-Schiff-Interaktionen, Propulsionswirkung und Eigenschiffsdynamik besser beschreiben zu können, wurden sowohl experimentell als auch numerisch verschiedene Untersuchungen durchgeführt.

Zunächst wurden das Panmax Containerschiff KCS als Einschrauber und die Ostseefähre als Beispiel eines zweischraubigen Schiffs mit Propulsionsanlagen und einstellbaren Rudern in 3-Komponenten-Waagen ausgerüstet. Abbildung 5.1 zeigt die Verläufe der Querkraft des Ruders am KCS während zwei Passiervorgängen mit dem Postpanmax Schiff als Überholer. Die Wassertiefe entsprach hier 40 m in der Großausführung und die Geschwindigkeiten in den exemplarisch dargestellten Messungen waren skaliert auf 15 kn am Überholer und 8 kn am Panmax-Schiff, so dass keine signifikanten Flachwassereffekte zu erwarten waren. Die Drehraten beider Modelle wurden auf den Selbstpropulsionspunkt des Modells im stationären Zustand als einzeln fahrendes Modell eingestellt.

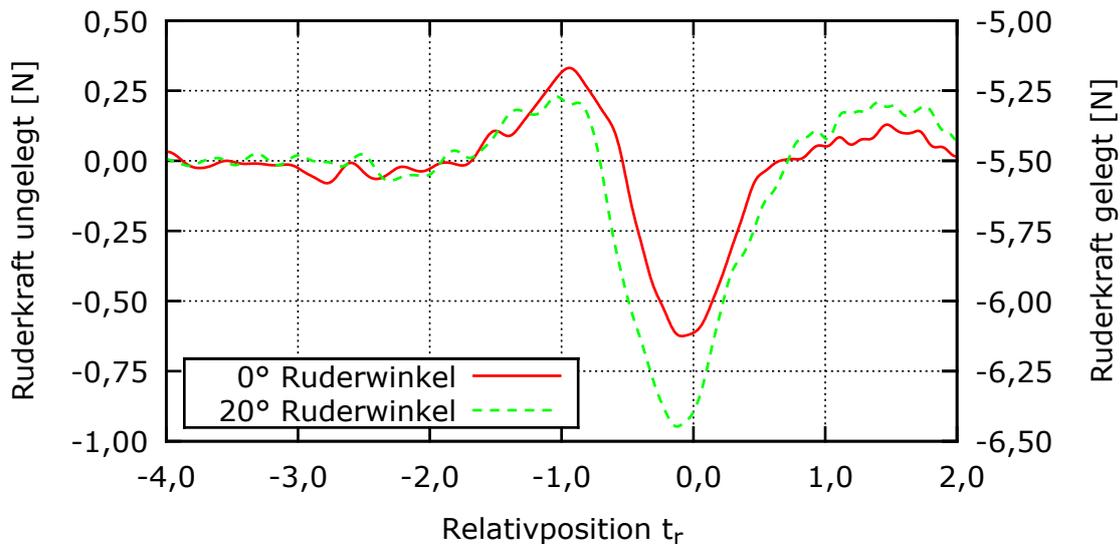


Abb. 5.1.: Verlauf der Querkraft des Ruders während des Passiervorgangs bei 20° Ruderwinkel (grün) und ohne Ruderausschlag (rot).

Die rote Kurve zeigt den Kraftverlauf des Ruders ohne Anstellung, während die Messung für die grüne Kurve bei konstantem Ruderwinkel von 20° Ruder steuerbord durchgeführt wurde. Da der Überholer auf der Backbordseite passiert, erzeugt diese Stellung ein ausdrehendes Giermoment und eine zum Überholer gerichtete Querkraft nach Backbord mit einem stationären Mittelwert von etwa -5,5 N. Ein Ausschlag nach unten bedeutet entsprechend eine Zunahme der Ruderkraft. Die Messung bei nicht gelegtem Ruder dient der Bewertung, ob die Änderungen der Ruderkraft aus einer Schwankung der Anströmgeschwindigkeit in x-Richtung resultieren oder ob die Potentialströmung des Überholers zu Querkomponenten in Druck und Strömungsrichtung führt. Würde sich primär die Geschwindigkeit der Ruderanströmung ändern, wäre keine Reaktion bei 0° Ruderwinkel zu erwarten. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Kurven gleich skaliert aber mit getrennten y-Achsen aufgetragen.

In beiden Messungen zeigt sich jedoch während des Passiervorgangs eine deutliche Schwankung der Ruderkraft. Die Wirkung einer geänderten Strömungsgeschwindigkeit in Schiffslängsrichtung ist dem zur Folge nicht dominant. Zu Beginn der Überlappung überlagert sich eine vom Überholer abgewandte Kraftkomponente. Während sich der Überholer querab des Ruders befindet, zeigt sich eine Ansaugung zum Überholer hin beziehungsweise ein deutlicher Anstieg der erzeugten Querkraft am Ruder. Erst unmittelbar vor Auflösung der Überlappung zeigt sich wieder eine leicht abstoßende Komponente. Zumindest im gefesselten Zustand ist somit die gefürchtete Unwirksamkeit des Ruders nicht nachzuweisen.

Sind am Schiffskörper selbst auch Querkräfte vorhanden, genügt die Betrachtung der Ruderkraft allein nicht aus, um die Steuerfähigkeit zu bewerten. Abbildung 5.2 zeigt den Verlauf der Querkraft am Rumpf und der des ungelegten Ruders. Um diese vergleichen zu können, sind die Kräfte mit der jeweiligen Projektionsfläche in Querschiffsrichtung normiert.

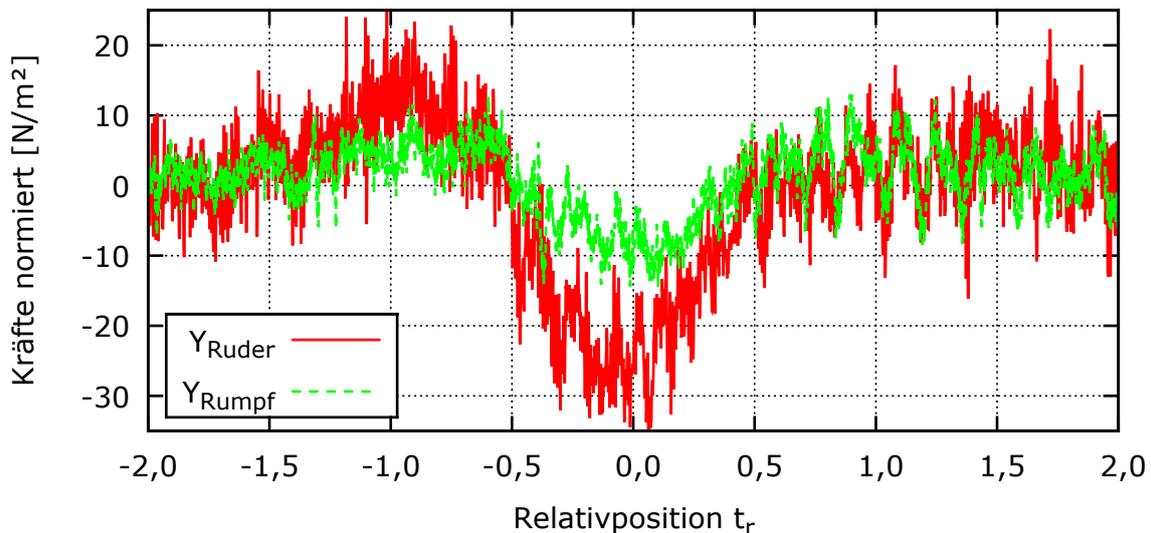


Abb. 5.2.: Normierte Querkraftverläufe von Rumpf und Ruder (nicht gelegt) des KCS während das Postpanmax-Schiff mit 15 Knoten überholt.

Die Schiff-Schiff-Interaktion zeigt sich, wie zu erwarten, sehr ähnlich in den Kräften von Rumpf und Ruder. Der stärkere Einfluss auf die Ruderkraft ist zum einen mit der Streckung des als Tragflügel ausgelegten Ruders zu erklären. Der Rumpf wirkt zwar bei Schräganströmung ebenfalls als Tragflügel, besitzt jedoch aufgrund des sehr großen Verhältnisses der Profillänge (der Länge des Rumpfes) zur Spannweite (dem Tiefgang) eine kleinere Steigung des Auftriebsbeiwertes über dem Anströmwinkel. Zum anderen passt das Ruder aufgrund seiner geringen räumlichen Ausdehnung besser in lokale Zonen hoher Druckgradienten oder quer gerichteter Strömungskomponenten. Die Länge des Rumpfes beträgt $\frac{2}{3}$ der Länge des Überholers, so dass sich lokale Effekte nur schwach auf die globalere Querkraft auswirken.

Einen genaueren Einblick liefert auch die Betrachtung der Drehmomente um den Hauptspant für die gleiche Passiersituation (Abbildung 5.3). Blau dargestellt ist das Giermoment am Rumpf ohne Ruderwinkel mit den erwarteten ausdrehenden und eindrehenden Phasen während des Passiervorgangs. Die rote Kurve zeigt das aus der Querkraft des Ruders und dem Hebelarm zum Hauptspant berechnete, ausdrehende Drehmo-

ment des Ruders, welches sich auch im Giermoment des gesamten Modells (grün) widerspiegelt. Die Steuerwirkung des Ruders schwankt nur geringfügig und beträgt fast konstant 16 Nm. Die Bandbreite des Giermoments am Rumpf ist erheblich größer. Das Moment schwankt bei 0° Ruderwinkel zwischen 20 Nm ausdrehend und 15 Nm eindrehend. Der gewählte Ruderwinkel ist für diese Passiersituation gerade ausreichend, um während des gesamten Manövers ein ausdrehendes Gesamtmoment zu gewährleisten; die grüne Kurve bleibt auch bei $t_r \approx 0,45$ im positiven Bereich.

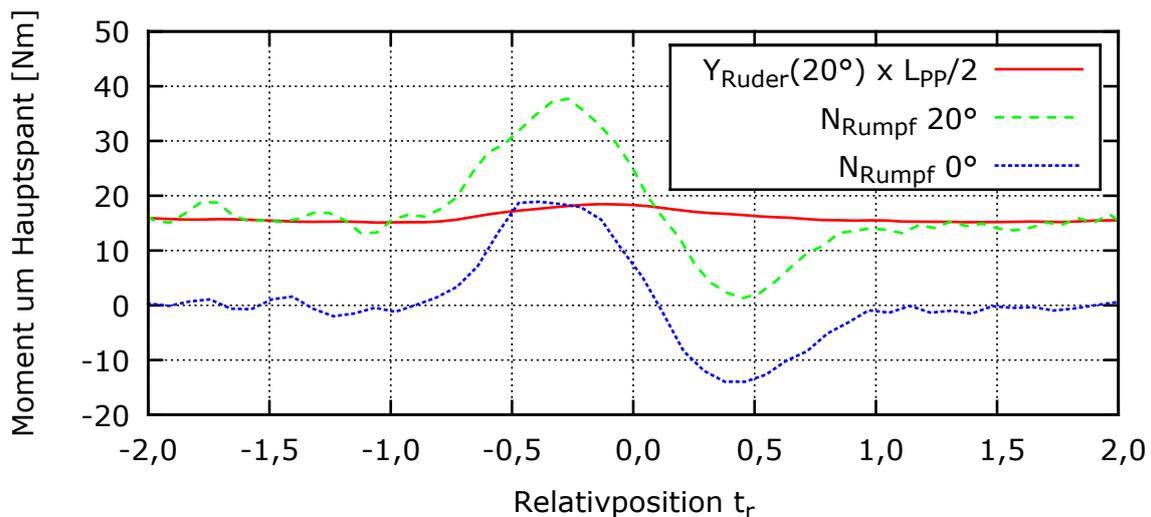


Abb. 5.3.: Verläufe des Drehmoments um den Hauptspant mit und ohne Ruderwinkel. Gestrichelt dargestellt sind die am Modell gemessenen Giermomente (blau: ohne Ruderausschlag, grün: mit 20° Ruder steuerbord). Die rote Kurve zeigt das aus der Ruderkraft resultierende Moment.

Diese Untersuchungen, welche qualitativ auch durch andere Konstellationen bestätigt wurden, zeigen, dass die Ruderkraft durch die Interaktion beim Passieren nur geringfügig beeinflusst wird. Dennoch können die auf den Rumpf wirkenden Giermomente so groß werden, dass die Wirkung eines nach üblichen Kriterien entworfenen Ruders nicht ausreicht, um die Steuerfähigkeit zu gewährleisten. Obwohl die Geschwindigkeiten hier für die relativ große Wassertiefe noch als moderat einzuordnen sind, ist die Reserve der Steuerfähigkeit bei einem Abstand entsprechend 90 m bereits nahezu aufgezehrt. Die hier dargestellten Versuche wurden nicht mit extremen Hartruderlagen durchgeführt, da es sonst aufgrund der relativ geringen Reynoldszahlen im Modellversuch früher als in der Großausführung zu Ablösungserscheinungen kommen kann.

5.2. Einfluss des Betriebspunktes der Antriebsanlage

Eine verbreitete Empfehlung für die Schiffsführung eines überholten Schiffes zur Vermeidung von Gefahrensituationen ist die Reduktion der Antriebsleistung. Dies soll die Relativgeschwindigkeit erhöhen und somit die Zeitdauer des Überholvorgangs reduzieren, während der es zu gefürchteten Anziehungseffekten kommt. Bei der üblichen Anordnung des oder der Ruder im Propellerstrahl sinkt jedoch bei reduzierter Drehrate auch die Anströmgeschwindigkeit am Ruder und somit die verfügbare Querkraft. In kritischen Fällen kann die nun eingeschränkte Steuerfähigkeit des Schiffes nicht mehr ausreichen um die im Passiervorgang auftretenden Giermomente auszugleichen. Das überholte Fahrzeug kann seinen Kurs nicht halten und das Gefahrenpotential des Passierens wird unter Umständen erhöht anstatt verringert.

Auch ohne Änderung der Propellerdrehrate ergeben sich im Laufe eines Passiervorgangs zeitliche Änderungen der Geschwindigkeiten der beteiligten Fahrzeuge. Betrachtet man den allgemein kritischen Fall, in dem ein großes Fahrzeug ein kleineres überholt, wird die Geschwindigkeit des Überholten zunächst verringert. Daraufhin wird es im weiteren Verlauf des Passiervorgangs auf eine Geschwindigkeit oberhalb seiner Ausgangsgeschwindigkeit beschleunigt.

Die Einflüsse der Geschwindigkeit und der Propellerdrehrate auf die Steuerfähigkeit konnten im Rahmen gezielter Versuche exemplarisch untersucht werden. Das Modell des Panmax Containerschiffes wurde mit einem in einer Kraftmess-Waage gelagerten Ruder, einer Einstellmimik für den Ruderwinkel und einer Propulsionsanlage ausgerüstet. Für das einschraubige Schiff wurde zunächst der Selbstpropulsionspunkt des Modells, also die Drehrate bei der die Restkraft zum Schleppwagen bei konstanter Geschwindigkeit verschwindet, mit neutraler Ruderlage bestimmt. Ausgehend von diesem Punkt wurde eine Reihe von Versuchen mit 20 bzw. 30° Ruderwinkel jeweils nach Backbord und Steuerbord durchgeführt. Bei konstanter Drehrate entsprechend dem zuvor ermittelten Selbstpropulsionspunkt für eine Geschwindigkeit von 16 kn in der Großausführung bei einer Wassertiefe von 19 m wurde die Modellgeschwindigkeit um 10 % erhöht bzw. verringert. Daraufhin wurde bei konstanter Modellgeschwindigkeit die Drehrate entsprechend variiert. Die gemessenen Querkräfte am Ruder sind in Abbildung 5.4 über der normierten Geschwindigkeit bzw. Drehrate aufgetragen. Die unterschiedlichen Beträge der Querkraft sind auf Unsymmetrien im Propellernachstrom zurückzuführen. An der Steigung der Kurven ist deutlich zu erkennen, dass die Ruderkraft wesentlich stärker auf die Variation der Drehrate reagiert als auf Geschwindigkeitsänderungen.

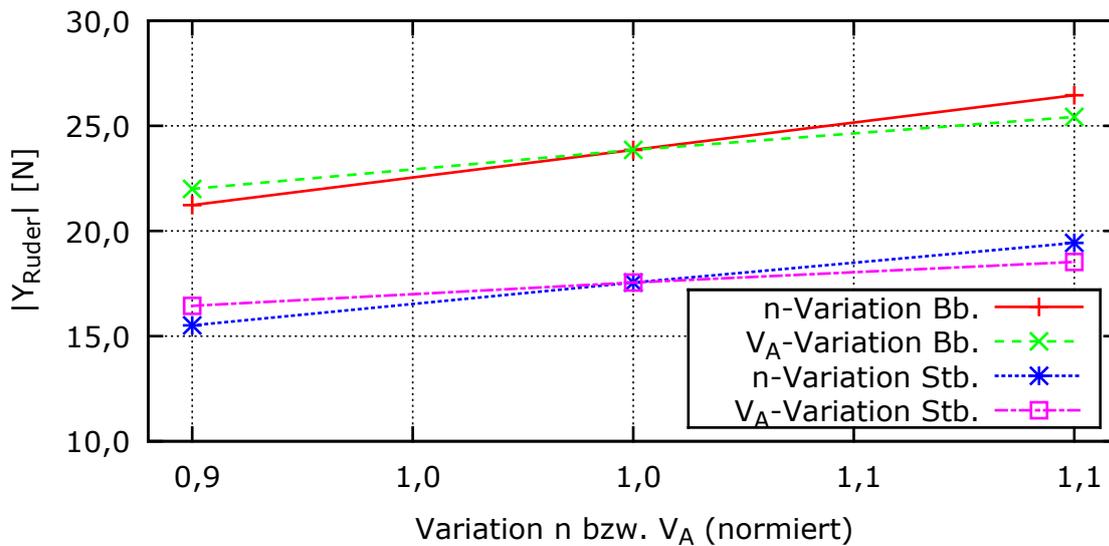


Abb. 5.4.: Querkraft des Ruders am Panmax Containerschiff bei Variation der Drehrate bzw. der Modellgeschwindigkeit um $\pm 10\%$ ausgehend vom Selbstpropulsionspunkt des Modells. Der Ruderwinkel wurde auf 20° nach Backbord bzw. Steuerbord eingestellt. Es zeigt sich eine stärkere Abhängigkeit der Steuerkraft von der Drehrate als von der Geschwindigkeit.

Eine Änderung der Drehrate um 10 % ausgehend vom Selbstpropulsionspunkt des Modells resultiert in einer Änderung der Ruderkraft von ebenfalls etwa 10 %. Bei konstanter Drehrate und Änderung der Geschwindigkeit um 10 % reagiert die Querkraft des Ruders jedoch nur mit rund 5 %.

Vor diesem Hintergrund ist die übliche Empfehlung an die Führung eines überholten Schiffes, die Antriebsleistung während des Passiervorgangs zu reduzieren, um durch eine größere Differenzgeschwindigkeit den Zeitraum des Passierens zu reduzieren, kritisch zu bewerten. Zumindest in der ersten Phase des Vorgangs, in der ein eindrehendes Giermoment auftritt, muss das Kurshaltevermögen gewährleistet werden. In der zweiten Phase wird das überholte Fahrzeug bei ausdrehendem Moment angezogen. Hier erscheint bei ausreichend breitem Fahrwasser eine Geschwindigkeitsreduktion sinnvoll.

6. Passiervorgänge mit gefesselten Modellen

Ein großer Vorteil der Versuchsanlagen des DST (siehe Kapitel 3) liegt durch die simultan nutzbaren Schleppwagen darin, dass die wirkenden Kräfte beim Passieren zweier Schiffsmodelle mit verschiedenen Geschwindigkeiten gemessen werden können, ohne dass das Modell durch eine Kursänderung reagiert. Bei der späteren Simulation wäre eine solche Reaktion zusätzlich von den durch die Schiffsführung getroffenen Maßnahmen abhängig, die unmöglich alle vorhergesagt werden können. Das gewählte Verfahren der Berechnung der Schiffsreaktion aufgrund bekannter oder steuerbarer Einflüsse ist hier zielführender. Die Messung der Interaktionskräfte für dieses Kräftemodell ist Gegenstand des folgenden Kapitels.

6.1. Verwendete Modellfamilie

Basierend auf dem Wissen aus vorangegangenen Forschungsvorhaben und der Recherche einschlägiger Literatur wurde zunächst eine Liste der relevanten Parameter und Einflussgrößen für Passiervorgänge erstellt. Neben den ausgeprägten Wirkungen der Wassertiefe, des Passierabstands und der jeweiligen Schiffsgeschwindigkeit spielen die Formparameter und Hauptabmessungen der beteiligten Fahrzeuge eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Dementsprechend wurde zunächst eine repräsentative Modellfamilie typischer Seeschiffe ausgewählt und eine dazugehörige Versuchsmatrix aufgestellt. Die vier in Tabelle 6.1 aufgeführten Fahrzeuge wurden im Maßstab 1:40 neu gebaut bzw. aus dem Modellbestand des DST übernommen und umgearbeitet. Alle Modelle wurden mit Propulsions- und Steuerorganen ausgestattet.

Tab. 6.1.: Modellfamilie der untersuchten Seeschiffe im Maßstab 1:40

Modell	L_{pp}	B	T	m	C_B
Postpanmax Containerschiff	8,63 m	1,150 m	0,330 m	2093 kg	0,64
Panmax Containerschiff	5,73 m	0,805 m	0,270 m	813 kg	0,65
Fähre Mecklenburg-Vorp.	4,85 m	0,724 m	0,155 m	323 kg	0,59
Feeder Containerschiff	3,15 m	0,533 m	0,185 m	195 kg	0,63

Bei einem überwiegenden Teil der Versuche wurden beide Modelle an den beiden simultan betriebenen Schleppwagen derart geführt, dass die Schwimmelage sich frei einstellen konnte, jedoch die Modelle in der Querposition und der Geschwindigkeit gefesselt waren. Von der dynamischen Schwimmelage und der Verformung der Wasseroberfläche über die Reaktionskräfte am Modell und an den Rudern bis zu den Propulsionskenngrößen wurden je Versuch teilweise mehr als vierzig Messgrößen erfasst. Abbildung 6.1 zeigt für einen ausgewählten Passiervorgang, bei dem das Panmax Containerschiff den kleineren Feeder überholt, die Verläufe der Längskraft, der Querkraft sowie des Giermoments.

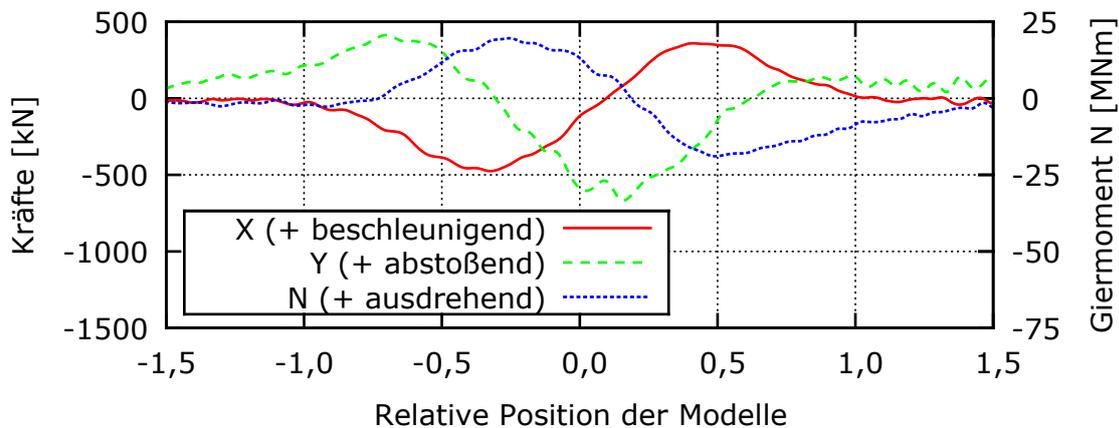


Abb. 6.1.: Charakteristischer Verlauf der Kräfte und des Giermoments, die ein größerer Überholer an einem kleineren Schiff hervorruft. Alle Werte sind extrapoliert auf die Großausführung.

In Längsrichtung wird das überholte Modell zunächst verzögert und kurz nach der Mittschiffs-Mittschiffs-Position beschleunigt. Dies ist anschaulich mit der Auslenkung der freien Wasseroberfläche im Primärwellensystem des Überholers zu erklären. Bei der relativen Position $t_r = -0,5$ liegt das überholte Fahrzeug achterlastig vertrimmt im vorderen Teil der Absunkmulde und erfährt eine entsprechende, rückwärts gerichtete Hangabtriebskraft. Bevor die Überlappung wieder aufgelöst wird, gleitet der Überholte die Rückseite des Wellentals hinab und wird bei entsprechender Bewegungsfreiheit beschleunigt.

In seitlicher Richtung wird der Überholte im Bugbereich des Überholers zunächst abgestoßen und dann angezogen. Dies ist mit der zunächst nach außen gerichteten Verdrängungsströmung zu erklären. Die Übergeschwindigkeit zwischen den Fahrzeugen erzeugt einen Druckabfall und daraus resultierend eine Anziehungskraft, die gleichgerichtet mit den je nach Position im Primärwellensystem auftretenden Hangabtriebskomponenten ist. Das Giermoment ist nach einer leicht eindrehenden Tendenz zu Beginn der Überlappung zunächst ausdrehend und kurz nach der Mittschiffs-Mittschiffs-Position wieder eindrehend. Die Beschleunigung des Überholten in der zweiten Hälfte des Überholvorgangs kann in der Realität zu einer verringerten Relativgeschwindigkeit und damit zu einer verlängerten Wirkdauer der eindrehenden und anziehenden Effekte führen. Hierdurch wird das Risiko einer Kollision signifikant erhöht.

6.2. Aufstellung der Versuchsmatrix

Die optimale Wahl der Parameter für die Modellversuche und die numerischen Simulationen ist stark abhängig von dem Ansatz für die mathematische Modellierung, für die die Ergebnisse genutzt werden. Algorithmen, die auf der Interpolation in einer Datenbasis basieren, benötigen eine möglichst gleichmäßige Abdeckung des vieldimensionalen Lösungsraums. Bei genauer Betrachtung der komplexen physikalischen Vorgänge und der Anzahl der relevanten Parameter zeigen sich schnell die Grenzen solcher Ansätze. Um die Charakteristik der Wirkung einer einzelnen Parametervariation zu identifizieren, werden als absolute Untergrenze drei Lösungen benötigt. Diese drei Punkte erlauben dann eine Abschätzung, ob die betrachtete Einflussgröße sich beispielsweise linear, quadratisch oder exponentiell auf die relevanten Kenngrößen wie beispielsweise Quer- und Längskraft, Giermoment, Trimm oder Absenkung auswirkt.

Im nachstehenden Beispiel wird der einfachste Lösungsraum durch die Massen der vier Schiffe, die Tiefenfroudezahlen, den Abstand und den Begegnungswinkel aufgespannt. Eine gleichmäßige Abdeckung dieses Gebiets mit drei bzw. vier Lösungen je Kante benötigt bereits deutlich über 1000 Einzellösungen. Diese Anzahl von experimentell oder numerisch abgebildeten Passiervorgängen liegt bereits an der Grenze des realisierbaren Aufwands.

Fr_{ho}	Fr_{ht}	y	m_o	m_t	$ \psi_o - \psi_t $	Anzahl der Lösungen
3	3	3	4	4	3	1296

Hierbei ist als Vereinfachung bereits die Wassertiefe mit den Geschwindigkeiten gekoppelt in den Tiefenroudezahlen enthalten. Genauere Betrachtungen haben zudem gezeigt, dass auch die Verdrängung der Schiffe nicht ausreicht, sondern stattdessen für die beteiligten Fahrzeuge Länge, Breite, Tiefgang und Blockkoeffizient berücksichtigt werden müssen.

Im Laufe des Projektes wurden daher zunächst einzelne Parameterkombinationen im gesamten Lösungsgebiet untersucht. Mit diesem globalen Abbild konnten besonders relevante Parameterräume identifiziert werden, welche anschließend gezielt höher aufgelöst wurden. So konnten in ausgewählten Bereichen einige Parameter deutlich feiner abgestuft werden, was ein besseres Verständnis der Zusammenhänge gewährleistet und für den Ansatz der Hybrid-Regression (siehe Kapitel 11.4 auf Seite 123) eine belastbare Basis für die Korrekturfunktionen bildet. Einige dieser Variationen sind auf den folgenden Seiten genauer dargestellt.

6.3. Einfluss des Passierabstands

Der wichtigste Parameter für die auftretenden Interaktionen zwischen Schiffen bei Passiervorgängen ist der Abstand der beteiligten Fahrzeuge. Die Identifikation des erforderlichen Mindestabstands bei gegebenen Geschwindigkeiten und Randbedingungen war als „sicherer Passierabstand“ namensgebend für das Verbundprojekt SIPAS. Die ausgeprägte Abhängigkeit der Effekte vom Abstand zeigt Abbildung 6.2 am Beispiel der auf den Überholten wirkenden Längskraft.

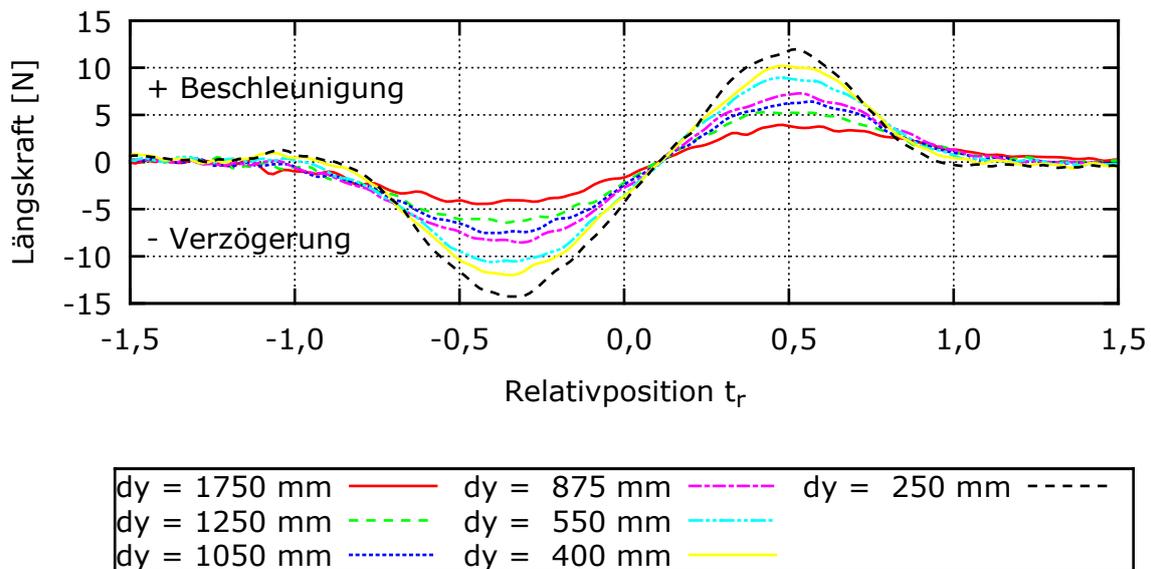


Abb. 6.2.: Darstellung der Längskraft am Feeder bei Variation des Abstands mit konstanten Geschwindigkeiten von 0,813 m/s für die überholende Fähre und 0,691 m/s am Feeder. Die Wassertiefe im Schlepptank beträgt einheitlich 250 mm.

Betrachtet man nur die Minimalwerte dieser zeitlichen Verläufe und trägt diese normiert mit dem betragsmäßigsten Wert für den kleinsten Passierabstand über dem lichten Abstand zwischen den Bordwänden auf, ergibt sich die Darstellung in Abbildung 6.3. Die Abstände sind dort mit der gemittelten Schiffsbreite normiert. Es zeigt sich ein fast exponentielles Abklingen der Wirkung mit wachsendem Abstand.

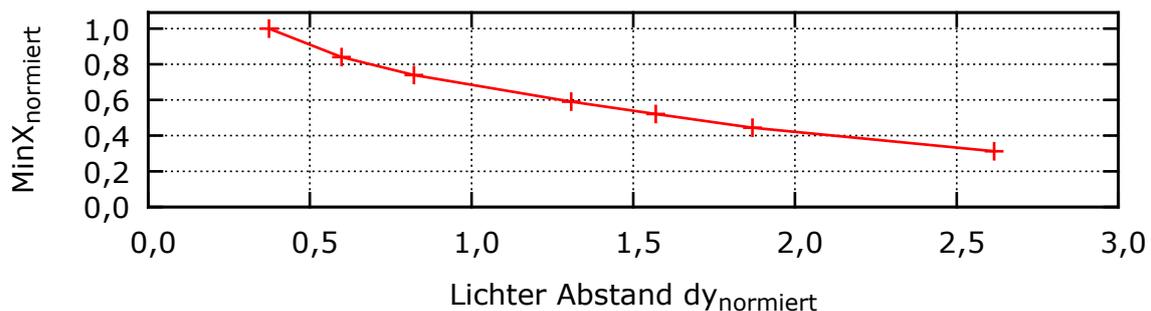


Abb. 6.3.: Darstellung der Abhängigkeit der Längskraftamplitude vom Passierabstand, welcher mit der mittleren Schiffsbreite normiert ist.

6.4. Einfluss der Wassertiefe

Neben dem Passierabstand wurde bereits in vorangegangenen Forschungsprojekten die Wassertiefe als bedeutender Parameter für die Schiff-Schiff-Interaktion identifiziert. Abbildung 6.7 zeigt wieder am Beispiel der Längskraft die instationären Verläufe für Überholvorgänge bei verschiedenen Wassertiefen aber konstantem Abstand und identischen Geschwindigkeiten. Es zeigt sich eine deutlich überproportionale Abhängigkeit der Interaktionskräfte von der Wassertiefe. Die Ausschläge der Längskraft fallen bei einer um 50 % erhöhten Wassertiefe bereits um den Faktor 2 schwächer aus.

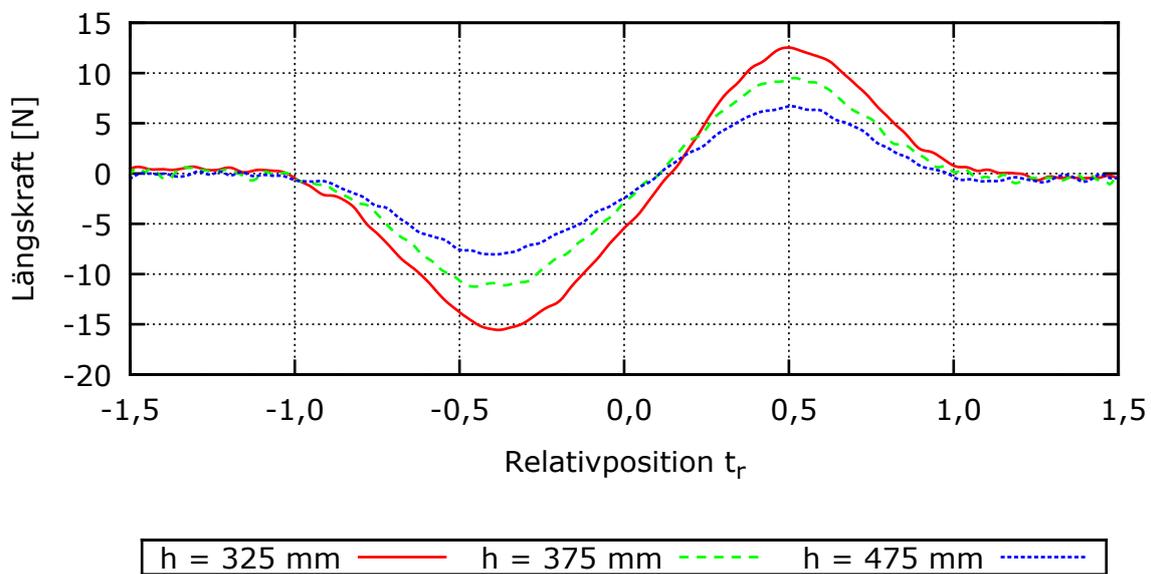


Abb. 6.4.: Darstellung des Einflusses der Wassertiefe auf die Schiff-Schiff-Interaktion am Beispiel der Längskraft. Bei drei verschiedenen Wassertiefen wurden Überholvorgänge mit konstanten Geschwindigkeiten von 0,813 m/s für das überholende Panmax Containerschiff und 0,691 m/s am Feeder und identischem Querabstand von 600 mm durchgeführt.

Grundsätzlich gibt es verschiedene Ansätze zur Beurteilung der Wassertiefe. Die erste Möglichkeit ist eine geometrische Definition bei der die Kielfreiheit als Absolutwert oder normiert durch das Verhältnis von Wassertiefe zu Tiefgang angegeben wird. Eine ebenfalls im schiffstechnischen Kontext übliche Definition nutzt die Dispersität von Schwerewellen. Während die Phasengeschwindigkeit c im Tiefwasser nur eine Funktion der Wellenlänge ist, wird sie bei ausreichend flachem Wasser nur noch durch die Wassertiefe bestimmt (Gl. 6.1).

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)} = \begin{cases} \sqrt{gh} & \text{für } h \rightarrow 0 \\ \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} & \text{für } h \rightarrow \infty \end{cases} \quad (6.1)$$

Diese Abhängigkeit liefert die Basis für das Froude'sche Ähnlichkeitsgesetz mit der Wassertiefe als normierende Länge:

$$Fr_h = \sqrt{\frac{V}{gh}} \quad (6.2)$$

Empirisch kann die dynamische Absenkung eines Schiffes häufig in guter Näherung als eine Funktion dieser Tiefenfroudezahl dargestellt werden. Genau wie die Wirkung auf ein passiertes Schiff resultiert auch die Absenkung primär aus der Verdrängungsströmung und der daraus folgenden Absenkmulde. Daher wurde hier geprüft, ob sich bei verschiedenen Wassertiefen aber identischen Tiefenfroudezahlen neben der Absenkung auch die Interaktionswirkung gleich einstellt.

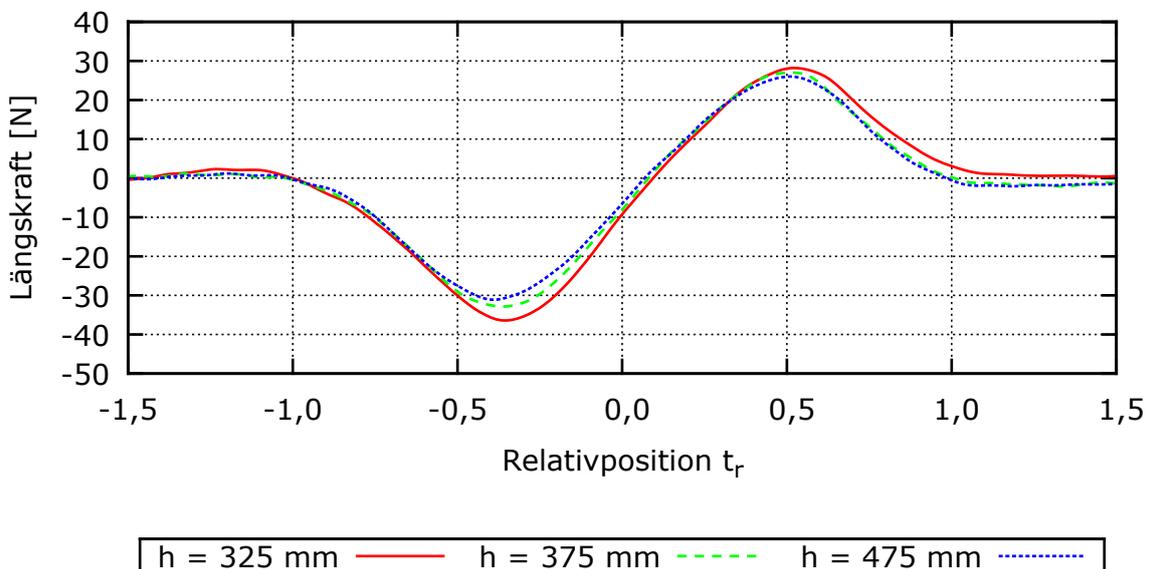


Abb. 6.5.: Darstellung der Längskraft bei drei verschiedenen Wassertiefen bei identischem Querabstand. Die Geschwindigkeiten wurden jeweils so gewählt, dass das überholende Panmax Containerschiff mit einer Tiefenfroudezahl von $Fr_h = 0,592$ und der Feeder mit $Fr_h = 0,410$ fährt.

Abbildung 6.5 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Längskräfte. Bei den gleichen Versuchen zeigt sich jedoch im Giermoment eine zusätzliche Abhängigkeit von Wassertiefe und Geschwindigkeit (Abb. 6.6), die in der Tiefenfroudezahl nicht abgebildet wird. Ursächlich ist hier ein stärkerer Einfluss der seitlich gerichteten Potentialströmung an Bug und Heck, während die Längskraft nur als Hangabtrieb aus der Absenkmulde resultiert.

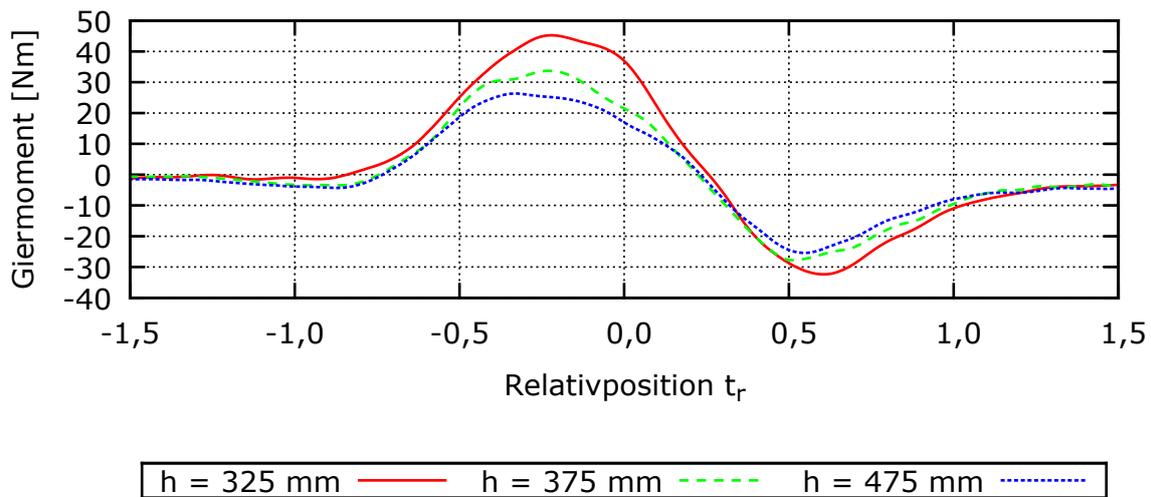


Abb. 6.6.: Darstellung des Giermoments bei drei verschiedenen Wassertiefen aber identischem Querabstand und gleichen Tiefenroudezahlen.

6.5. Einfluss der Geschwindigkeit des Eigenschiffs

Kritische Situationen entstehen bei Passiervorgängen vorrangig, wenn kleinere Fahrzeuge von größeren Schiffen überholt werden. Bei gegebenem Abstand und gleicher Geometrie des Fahrwassers verstärken die Geschwindigkeit und die Verdrängung eines Schiffes die Wirkung auf andere Fahrzeuge. Bei der Modellpaarung des Panmax Containerschiffs mit dem kleineren Feeder Schiff beträgt das Verhältnis der Verdrängungen ungefähr 4:1. Für diese Paarung wurde untersucht, wie stark die auf ein kleineres Schiff einwirkenden Kräfte und Momente durch seine eigene Geschwindigkeit beeinflusst werden. Abbildung 6.7 zeigt die gemessenen Längskräfte bei 15 verschiedenen Relativgeschwindigkeiten. Die gemessenen Kräfte zeigen eine schwache aber eindeutige Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Bei größerer Eigenschiffsgeschwindigkeit beim Überholen erhöht sich die Geschwindigkeit der Verdrängungsströmung und damit auch die Wasserspiegelabsenkung. Beim Begegnen heben sich die Übergeschwindigkeiten teilweise auf.

Bei der kleinsten Relativgeschwindigkeit benötigt der Passiervorgang nahezu die gesamte Tanklänge und dauert etwa 45 Sekunden. Beim Begegnen mit fast gleichen Geschwindigkeiten sind es nur noch etwa 4 s. Ein Teil der Reduktion der Amplitude lässt sich durch die Trägheit des Modells bei diesen sehr dynamischen Vorgängen erklären. Auch wenn die Interaktionskräfte nahezu identisch sind, hat die Relativgeschwindigkeit

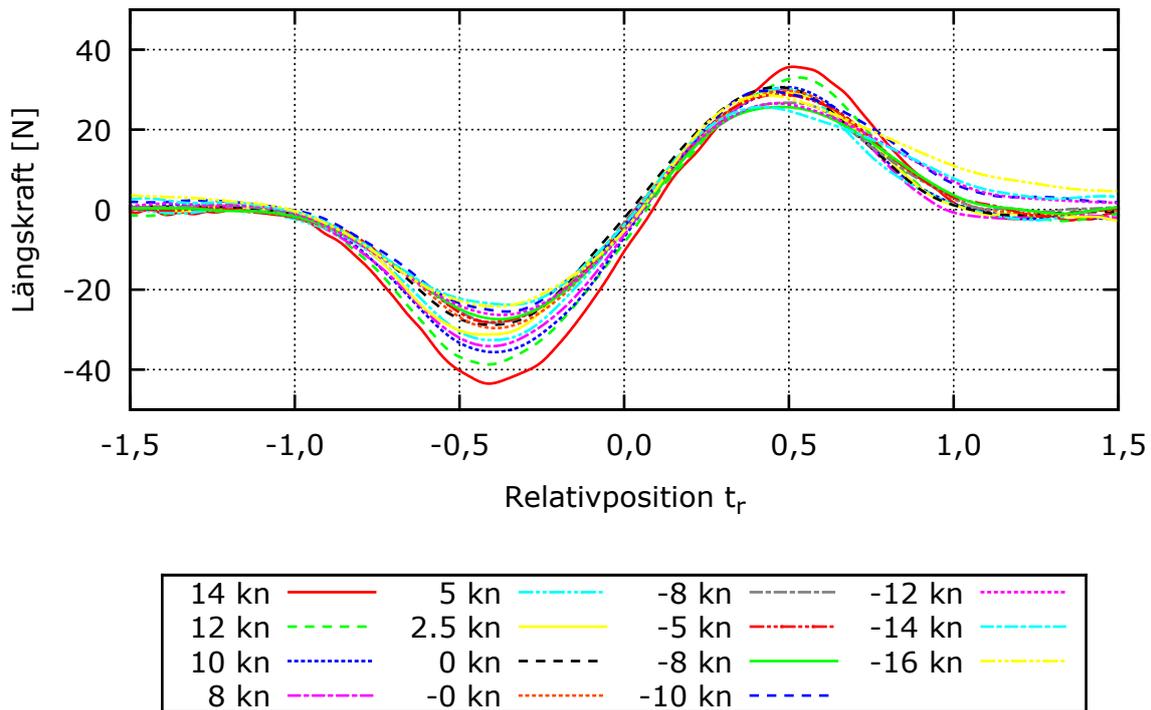


Abb. 6.7.: Darstellung der Längskraftverläufe am Feeder als Eigenschiff bei konstanter Geschwindigkeit des passierenden Panmax Containerschiffs KCS entsprechend 18 kn. Eine negative Geschwindigkeit bedeutet hier, dass es sich um einen Begegnungsfall handelt. Das Vorzeichen der Längskraft ist hier auf die Fahrtrichtung des KCS bezogen.

einen erheblichen Einfluss auf den Verlauf eines Passiervorgangs und das resultierende Kollisionsrisiko. Je geringer die Differenzgeschwindigkeit ist, desto länger wirken die Kräfte und Momente, so dass die Kursabweichung und der Bahnversatz erheblich zunehmen. Aus demselben Grund sind auch Überholvorgänge wesentlich kritischer als Begegnungen.

Da die Einflüsse bei zunehmender Versperrung, geringeren Größenunterschieden der Schiffe oder ungünstigen Geschwindigkeitskombinationen zunehmen, kann dieser Parameter für die mathematische Modellierung nicht vernachlässigt werden. Gerade bei geringen Abständen treten unter Umständen erhebliche Wandeneinflüsse auf, die bei der gewählten Vorgehensweise mit berücksichtigt werden.

6.6. Einfluss des Kurswinkels

Für die Quantifizierung des sicheren Passierabstands genügt in der Regel die Betrachtung von Manövern, bei denen beide Fahrzeuge vor der Interaktion mit identischen

Kurswinkeln fahren. Für eine realitätsnahe Abbildung der Passiereffekte im Simulator jedoch, müssen auch Situationen physikalisch sinnvoll abgebildet werden, bei denen von Beginn an eine Kursdifferenz vorliegt oder sich diese während des Passiervorgangs einstellt. Experimentell sind Situationen mit kreuzenden Trajektorien von gefesselten Modellen nicht darstellbar. Die Berücksichtigung einer langsamen, kontinuierlichen Änderung des Passierabstands für kleine Kursdifferenzen durch das Verfahren der Messbühne des großen Schleppwagens erwies sich als nicht zielführend. Kleine Differenzwinkel führen zu einem identischen Verlauf der Interaktionseffekte, wie sie auch bei entsprechenden Parallelfahrten zu beobachten sind.

Das Führen des Modells am großen Schleppwagen parallel zur Schnellschleppanlage aber mit konstantem Driftwinkel führte zur Überlagerung einer konstanten Querkraft und eines Giermoments entsprechend der stationären Drift. Die instationären Schwankungen während des Passierens werden jedoch kaum beeinflusst. Große Driftwinkel führen zu nicht der Realität entsprechenden Umströmungen und sind auch durch die Tankbreite eingeschränkt.

Der Einfluss großer Winkeldifferenzen wurde entsprechend durch das Passieren eines stillliegenden Modells unter verschiedenen Winkeln untersucht. Abbildung 6.8 zeigt ein Beispiel für das Passieren eines quer im Tank gefesselten Modells mit sehr geringem Passierabstand. Für diese Problemstellung wurde das Finite-Volumen-Paket MOUSE entsprechend erweitert, so dass Situationen mit kreuzenden Trajektorien numerisch untersucht werden konnten (siehe Kapitel 8 auf Seite 48 und folgende).

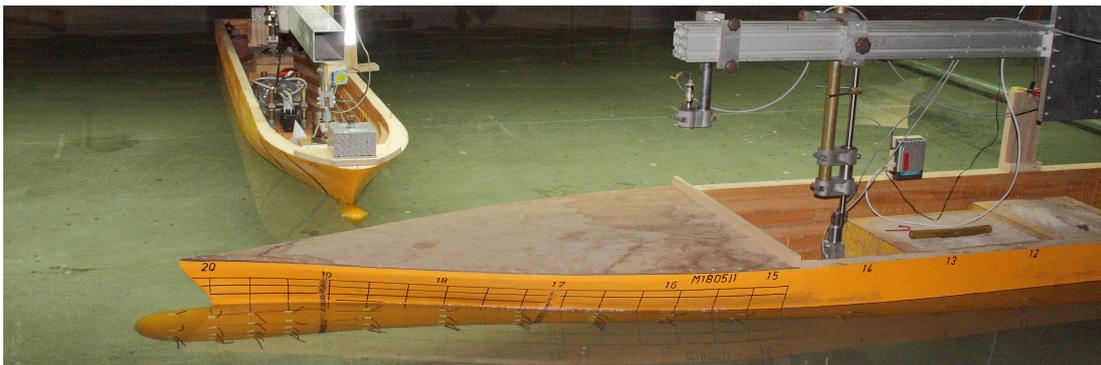


Abb. 6.8.: Fotografische Darstellung einer Konstellation, bei der das Modell des KCS den quer im Tank liegenden Feeder passiert.

7. Versuche mit frei fahrendem Modell

Zusätzlich zu den gefesselten Versuchen aus Kapitel 6 wurden Versuche mit einem freifahrenden Modell durchgeführt. Indem eine Reaktion von einem Schiffsmodell zugelassen wurde, konnte überprüft werden, inwieweit der gewählte Ansatz eines Kräftemodells zulässig ist. Die gemessene Bewegung wurde in SIPAS-OM mit simulierten Manövern verglichen.

7.1. Set-Up der Versuche

Die bisher beschriebenen Versuche dienten als Grundlage für das mit den Projektpartnern vereinbarte mathematische Modell der Kräfte und Momente, die ein passierendes Schiff verursacht. Die modellierten Kräfte werden durch das bewährte Bewegungs- und Manövriermmodell der Simulatorsoftware in die tatsächliche Schiffsantwort umgesetzt. Die Validierung dieser indirekten Vorgehensweise durch die Untersuchung der direkten Reaktion des Systems Schiff auf einwirkende Kräfte ist in Einzelfällen mit numerischen Verfahren möglich. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass solche Simulationen extrem aufwändig sind und besonders die korrekte Berücksichtigung von Trägheitseffekten einschließlich der hydrodynamischen Massen sehr fehleranfällig ist.

Für die Visualisierung der Passiereffekte und die spätere Validierung der Wirkungen im Simulator wurden daher zahlreiche Versuche mit einem frei fahrenden, ferngesteuerten Modell durchgeführt. Das Modell des Panmax Containerschiffs wurde wie zuvor mit konstanter Geschwindigkeit an der Schnellschleppanlage geführt, während das Modell des Feeder Schiffs mit Akkumulatoren, Steuer- und Propulsionsorganen sowie zahlreichen Sensoren bestückt wurde und sich frei bewegen konnte. Dabei wurde anstelle der Kräfte die Trajektorie des Modells im Schlepptank gemessen. Hierzu wurde eine Entfernungsmessung in Längsrichtung mit einer Lasersonde genutzt und der Abstand zur Tankwand mit Ultraschall gemessen. Beide Sonden wurden abhängig von der gemessenen Gierbeschleunigung rotiert und so unabhängig vom Kurs des Modells in Tankrichtung ausgerichtet.

Im Laufe der Versuche zeigte sich eine ausgeprägte Abhängigkeit des Manöververlaufs von den Startbedingungen. Das frei fahrende Modell wurde zunächst am großen Schleppwagen geführt und auf die Zielgeschwindigkeit beschleunigt. Nach dem Passieren der Anfahrwelle des Überholers wurde das Modell freigegeben und etwaige Kursabweichungen wurden von Hand korrigiert. Daraufhin wurde gegebenenfalls der Autopilot zugeschaltet. Allein der Zeitpunkt des Freigebens und die Position des Modells nach der Korrektur quer zur Tankachse sind nicht exakt reproduzierbar. Die entstehenden Abweichungen verstärken sich während des Passiervorgangs häufig und führen teilweise zu stark differierenden Manöverabläufen.

7.2. Versuche ohne Ruderaktivität

Diese Versuche wurden mit verschiedenen Steuerprofilen für das frei fahrende Modell durchgeführt. Einige Fahrten wurden passiv, also ohne Ruderaktivität, durchgeführt, da so die einzelnen Phasen des Überholvorgangs deutlich zu erkennen sind und sich die Messungen gut zur Validierung der Bewegung im Simulator eignen. Abbildung 7.1 zeigt eine Bildsequenz eines solchen Passiervorgangs, bei dem das kleinere Modell ohne Ruderaktivität frei fährt und von dem geführten Panmax Schiff überholt wird. Bei diesem Versuch kam es zu keiner Kollision, jedoch sind die einzelnen Phasen eines typischen Überholmanövers anhand der jeweiligen Lage des frei fahrenden Modells gut zu erkennen. Bei der Variation der Parameter zeigte sich, dass sich nicht nur die Ausprägung des Manöverablaufs, sondern auch der gesamte Verlauf der Reaktion ändern kann. Dies äußerte sich in den Fahrten ohne Ruderaktivität sogar so deutlich, dass nach dem Passiervorgang des überholte Modell teils mit dem Bug zur rechten und teils mit dem Bug zur linken Tankwand querschlug. Diese beiden Extremformen wurden, wenn auch unterstützt durch verschiedene Strategien für die Ruderaktivität, auch von Sharma [15] beschrieben. In der gezeigten Passiersequenz (Abb. 7.1) beispielsweise wird das frei fahrende Modell in der zweiten Hälfte des Passiervorgangs so stark ausgedreht, dass sich das eindrehende Moment zum Ende der Überlappung kaum noch auswirkt.

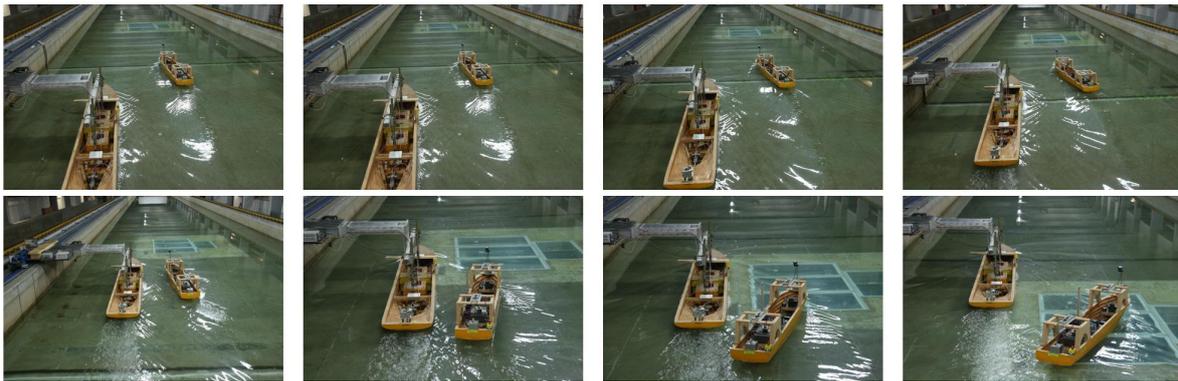


Abb. 7.1.: Zeitliche Abfolge (von oben links nach unten rechts) eines Passiervorgangs ohne Ruderaktivität am überholten Modell des Feeders.

7.3. Versuche mit Autopilot

Weitere Versuche wurden mit einem auf der Gierrate basierenden Autopiloten gefahren. Hier wurde mit einer an die Großausführung anpassbaren Totzeit und ebenfalls skalierten Ruderlegegeschwindigkeit automatisch Ruder gelegt, wodurch der gemessenen Gierrate entgegengesteuert wurde. Abbildung 7.2 zeigt den Verlauf des Ruderwinkels während eines solchen Passiervorgangs. Eine solche Steuerstrategie kann bereits als Grundlage für die Aktion der Schiffsführung eines überholten Schiffes genutzt werden.

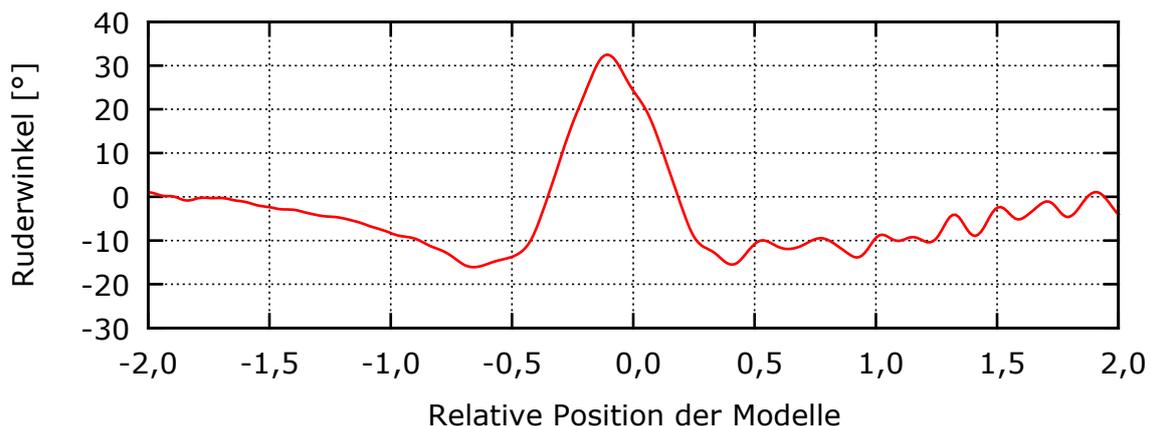


Abb. 7.2.: Verlauf des Ruderwinkels während eines Passiervorgangs unter Einsatz eines Gierraten-basierten Autopilots. Ein positiver Winkel entspricht einer Ruderlage nach Backbord, also der Antwort auf ein ausdrehendes Giermoment.

Auch dieses einfache Steuerprofil eignet sich aufgrund der verhältnismäßig hohen Reproduzierbarkeit mindestens ebenso gut zur Kontrolle der Effekte in den Simulatoren wie auch die Versuche ohne Ruderaktivität. Abbildung 7.3 zeigt die Reproduzierbarkeit exemplarisch für den Kurswinkel und den Querversatz für zwei Versuche mit gleichen Parametern. Bei einer Wassertiefe entsprechend 15 m, einem lichten Abstand zu Beginn des Manövers von 50 m und Geschwindigkeiten von 10 bzw. 7 Knoten überholt das Modell des KCS den frei fahrenden Feeder. In beiden Fahrten giert das Modell bereits frühzeitig nach Backbord, also zum Überholer hin, wodurch die Wirkung des Abstoßens im Bereich $t_r = -1,0$ noch kompensiert wird. Bis zu $t_r = 0$ driftet das Modell jedoch um 0,25 m vom Überholer weg bevor es sehr stark zum überholenden Modell versetzt wird. Der hier gemessene Querversatz von $\Delta y \approx 0,75$ m im Modellmaßstab bei Auflösung der Überlappung ($t_r = 1,0$) entspricht bereits einem Verbrauch von 60 % des Abstands. Eine geringe Reduktion der Geschwindigkeitsdifferenz führt bereits zu einer Kollision am Heck des Überholers. Trotz der gierenden Tendenz des Modells bleibt die Kursänderung des frei fahrenden Modells bis zum Ende der Überlappung bei maximal 2° , so dass der Beitrag der Kursabweichung zum Querversatz nahezu vernachlässigt werden kann.

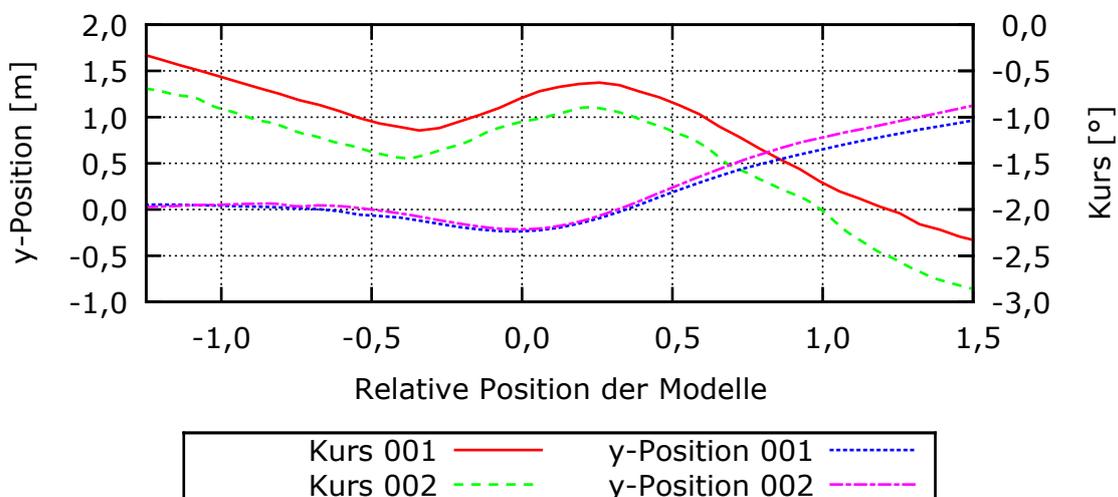


Abb. 7.3.: Der Verlauf des Kurswinkels und des Modellabstands zur vom Überholer abgewandten Tankwand in zwei Manövern mit identischen Ausgangsparametern aufgetragen über der normierten Relativposition.

Die Versuche mit Autopilot ermöglichen im Vergleich zu denen ohne Ruderaktivität weit aus kritischere Parameterkombinationen, ohne dass es im Experiment zu einer Kollision kommt. Außerdem entspricht der sich ergebende Manöverablauf eher dem einer realen Passiersituation, da selbst unerfahrene Schiffsführer intuitiv versuchen würden, den

Kurs zu halten. Die so durchgeführten Versuche erlauben auch eine weitere Auswertung, da die Fahrzeuge wie in den gefesselten Versuchen parallel zueinander liegen. Anders als in diesen geführten Versuchen wird hier jedoch nicht eine schwankende Längskraft zum Schleppwagen übertragen beziehungsweise gemessen, sondern sie beeinflusst, gedämpft über die Trägheitseffekte, direkt die Modellgeschwindigkeit. Abbildung 7.4 zeigt deutlich diesen als „Surf Riding“ beschriebenen Effekt der Geschwindigkeitsänderung kleinerer Fahrzeuge bei Passiervorgängen. Besonders gegen Ende des Passiervorgangs erhöht sich die Geschwindigkeit über das Ausgangsniveau, so dass sich die Relativgeschwindigkeit verringert und gerade in dieser kritischen Phase des Passiervorgangs die anziehende Querkraft länger wirken kann. Besonders wenn die Geschwindigkeitsdifferenz bereits zu Beginn des Vorgangs gering war, kann es hier zu einer Angleichung der Geschwindigkeiten kommen, so dass die Überlappung nicht aufgelöst wird.

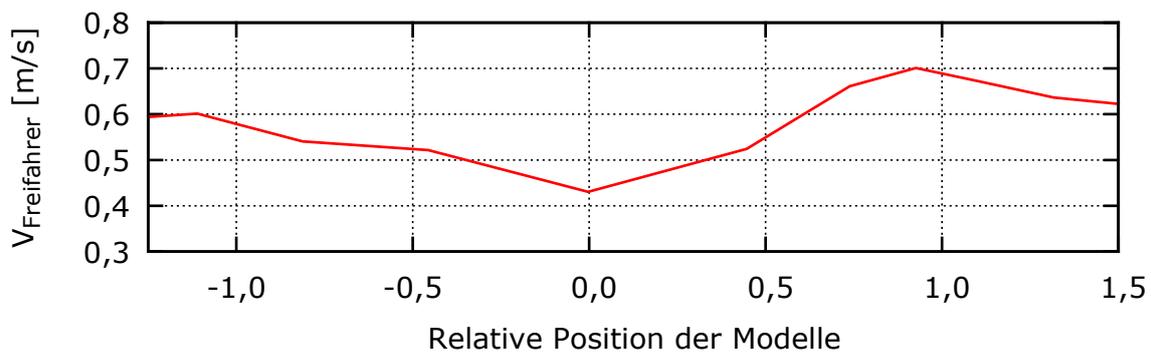


Abb. 7.4.: Die Geschwindigkeit des frei fahrenden Feeders während eines Überholvorgangs, bei dem der Kurs per Autopilot gehalten wurde. Deutlich zu erkennen sind die anfängliche Verzögerung und spätere Beschleunigung des Modells in Folge des sogenannten „Surf Ridings“.

Die Hauptursache für diesen Effekt lässt sich sehr gut anhand der gefesselten Versuche erkennen. Abbildung 7.5 zeigt den Trimm in Form der dynamischen Tauchungsdifferenz von Bug und Heck gemeinsam mit der gemessenen Längskraft aufgetragen über der normierten Passierposition. Der synchrone Verlauf der beiden Kenngrößen zeigt, dass die Hauptursache für die Geschwindigkeitsänderung in der Hangabtriebskraft liegt.

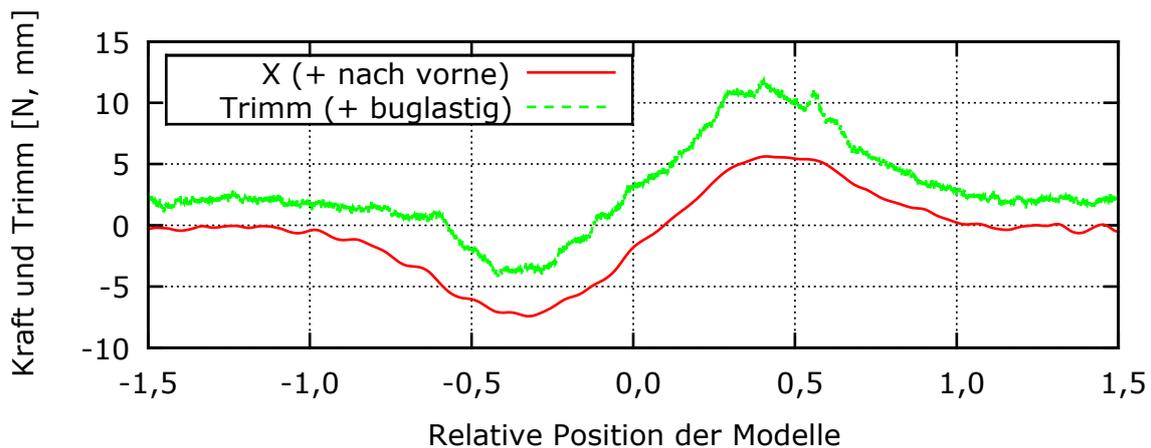


Abb. 7.5.: Trimm und Längskraft aus einem parallelen Überholvorgang aufgetragen über der dimensionslosen Passierposition. Die hohe Korrelation verdeutlicht die Kopplung der Längskraft mit der durch den Überholer verursachten Neigung der freien Oberfläche, welche die Trimmänderung am kleineren Eigenschiff dominiert.

7.4. Ergänzende Untersuchungen

Ergänzende Versuche wurden von Hand ferngesteuert durchgeführt. Hier sind noch engere Situationen beherrschbar als mit dem zuvor beschriebenen Autopilot-Profil. Jedoch zeigt sich eine sehr geringe Reproduzierbarkeit und eine ausgeprägte Abhängigkeit der Erfolgsquote von der Erfahrung des „Schiffsführers“. Ein erfahrener Nautiker wartet nicht wie der Autopilot den Beginn einer Drehbewegung ab, sondern er antizipiert sie und steuert ihr bereits frühzeitig entgegen, wie es bereits durch Sharma [15] beschrieben wurde. Der Vorteil entsprechend früher Ruderaktionen zeigt sich spätestens bei der Betrachtung der Trägheit eines manövrierenden Schiffes. Abbildung 7.6 zeigt den Verlauf des Ruderwinkels und des sich daraus ergebenden Kurses des Modells des Feeders in einem so genannten Schlingelversuch. Hier wird per Autopilot eine zuvor definierte Ruderlage eingestellt, bis sich das Modell auf einen ebenfalls festgelegten Kurswinkel relativ zur Tanklängsachse dreht. Sobald dieser Kurswinkel erreicht ist, wird mit einer vorgegebenen Totzeit und einer aus der Großausführung skalierten Ruderlegegeschwindigkeit eine Ruderlage zur anderen Seite gelegt. Dieser Vorgang wird periodisch wiederholt. Anhand der Phasenverschiebung der beiden Kurven lässt sich sehr gut die verzögerte Reaktion der Drehbewegung des Modells auf die Ruderlage erkennen.

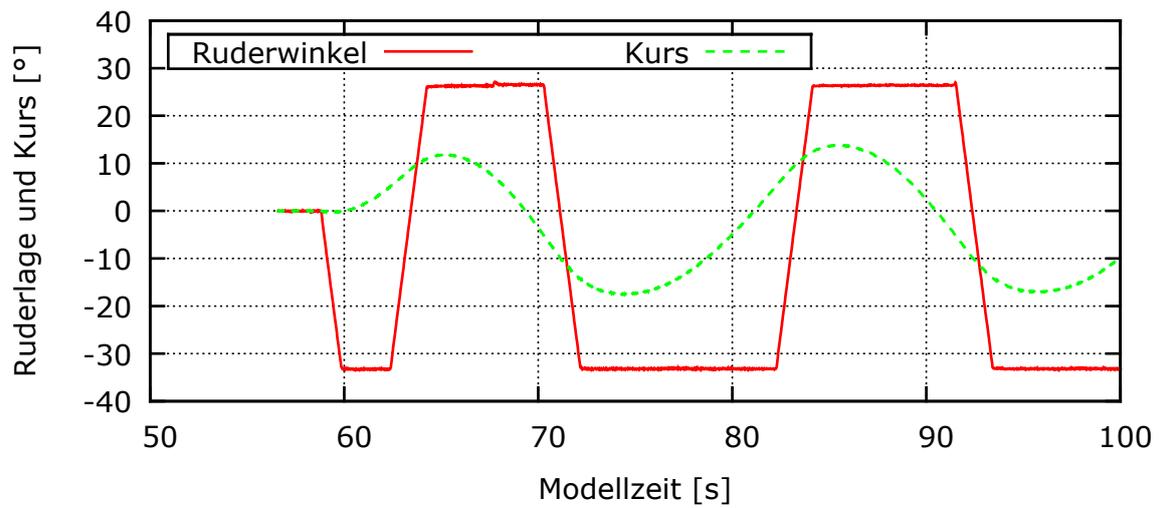


Abb. 7.6.: Über der Zeitskala des Modells aufgetragene Verläufe von Ruderlage und Kurs während eines Schrägversuchs.

Teil III.

Numerische Untersuchungen

Numerische Untersuchungen

Zur Erweiterung der Datenbasis für die mathematische Modellierung des Bewegungsverhaltens von Schiffen bei Schiffsinteraktionen, wie zum Beispiel Begegnen und Überholen von Wasserfahrzeugen, wurden die numerischen Verfahren für dieses spezielle Anwendungsgebiet weiterentwickelt. Die Notwendigkeit des Einsatzes von CFD-Verfahren ergibt sich daraus, dass die in diesem Projekt untersuchten komplexen Fahr-situationen der Schiffe mit herkömmlicher Versuchstechnik nur mit großem Aufwand zu realisieren sind. Des Weiteren ermöglichen die numerischen Verfahren die Bereitstellung von Detailinformationen über die Ausbildung der Strömungsverhältnisse im Nah- und Fernfeld des Schiffes. Dadurch können wissenschaftliche Erkenntnisse über die Ursachen der Kraftwirkungen am Schiff, die Wechselwirkung zwischen den interagierenden Schiffskörpern und den Einfluss der Strömungsverhältnisse auf die Steuer- und Antriebsorgane gewonnen werden. Mit den entwickelten numerischen Methoden und Verfahren werden Computersimulationen für Situationen durchgeführt, welche durch die Fixierung der Einzelmodelle an den beiden Schleppwagen des Versuchstanks nicht realisierbar sind. Dies trifft im Rahmen dieses Projektes unter anderem auf Passiervorgänge mit kreuzenden Trajektorien zu, da die Breite herkömmlicher Versuchstanks und die an den Schleppwagen vorhandenen Möglichkeiten zur Traversierung der Modelle die wählbaren Parameter für das Schrägpässieren stark limitieren.

Zur Erreichung dieses Zieles wurden die Methoden umfangreich mit experimentellen Daten verglichen. Eine Validierung der hier angewandten CFD-Verfahren war unabdingbar, da die durchgeführten numerischen Untersuchungen mit kreuzenden Trajektorien keine CFD-Berechnungen sind, die zum Stand der Technik gehören. Ohne die Validierung anhand von experimentell zugänglichen Teilaspekten wäre die Nutzung der integralen Größen aus den CFD-Berechnungen in der mathematischen Modellierung mit Risiken behaftet. Die Erkenntnisse aus den numerischen Berechnungen ergänzen die Datenbasis aus den Versuchen sinnvoll und liefern Hinweise für die mathematische Modellierung des Bewegungsverhaltens von Schiffen beim Begegnen und Überholen im begrenzten Fahrwasser.

8. Programmpaket MOUSE

Das Programmpaket MOUSE ist eine in Teilen frei verfügbare objekt-orientierte Berechnungsplattform zur Simulation strömungstechnischer Problemstellungen auf strukturiert und unstrukturiert räumlichen diskretisierten Berechnungsgebieten. Die zahlreichen bereitgestellten Klassen beinhalten Methoden der Numerik, der Datenbehandlung und anwendungsbezogene Methoden. Gegenüber kommerziellen Anwendungen besteht der Vorteil der freien Verfügbarkeit der Quelltexte und die Möglichkeit beliebig viele Rechnungen ohne lizenzrechtliche Limitierungen zu starten. Dadurch ist es möglich, zusätzlich zu den numerischen Standardmethoden der Simulation von Problemstellungen aus der Strömungsmechanik, eigene Methoden zur Beschreibung von weiteren Effekten zu implementieren. Parametrische Untersuchungen zur Schaffung der Datenbasis für das mathematische Modell können auf dem DST-Rechencluster in kurzer Zeit durchgeführt werden. Für schiffstechnische Anwendungen sind speziell numerische Verfahren zur Simulation inkompressibler Strömungen mit freier Oberfläche unter Flachwasserbedingungen und Methoden zur Relativbewegung beliebig vieler Körper implementiert. Die grundlegenden Datenstrukturen und Methoden wurden in den Projekten SicherBin und SimuBin entwickelt. Aufbauend auf diesen Methoden und Verfahren wurden weitere Entwicklungen zur Berücksichtigung der Interaktion zwischen relativ zueinander bewegten Objekten durchgeführt.

8.1. Methoden des Basislösers

Das Programmpaket MOUSE wurde in der Vergangenheit in einer Reihe von Forschungsprojekten weiterentwickelt ([8] und [3]) und mit Erfolg eingesetzt. Da die theoretischen Grundlagen in diesen Vorhaben ausführlich beschrieben wurden, werden die grundlegenden Methoden des MOUSE-Basispaketes nur kurz zusammengefasst und erläutert. Eine detaillierte Darstellung der Methoden und Verfahren findet sich in [5]. Spezifische Methoden für schiffstechnische Anwendungen sind in [17] beschrieben.

Die verwendeten Lösungsverfahren aus dem Programmpaket MOUSE basieren auf einer Finite-Volumen Diskretisierung. Diese Diskretisierung ist knotenzentriert und ermöglicht Strömungssimulationen auf beliebigen Gitterstrukturen. Das Volumengitter kann strukturiert, unstrukturiert oder durch so genannte Hybridgitter, bestehend aus beiden Gitterarten, beschrieben werden.

Im schiffstechnischen Kontext sind weitestgehend inkompressible Strömungen zu betrachten. Die Erhaltungsgleichungen lauten in differenzieller Form:

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0 \quad (8.1)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \operatorname{div} \vec{v} + \frac{1}{\rho} \nabla p - \operatorname{div} \sigma = \vec{f} \quad (8.2)$$

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

Die Verformung der Wasseroberfläche, durch die Fahrt eines Schiffes oder eines beliebigen Störkörpers durch das Wasser, wird durch die Implementierung einer so genannten Levelset-Methode berücksichtigt. Dabei wird die freie Oberfläche über einen diskreten Iso-Wert einer skalaren Funktion definiert.

$$\Psi(x, y, z, t) > 0 \quad \rightarrow \text{Luft} \quad (8.3)$$

$$\Psi(x, y, z, t) = 0 \quad \rightarrow \text{Trennfläche} \quad (8.4)$$

$$\Psi(x, y, z, t) < 0 \quad \rightarrow \text{Wasser} \quad (8.5)$$

Diese Funktion erweitert das Gleichungssystem der Erhaltungsgleichungen um eine skalare Transportgleichung, welche gemeinsam mit den Strömungsvariablen über die Zeit integriert wird. Für die Diskretisierung der skalaren Transportgleichung hat sich eine Upwindformulierung bewährt. Als Randbedingung für die sich zeitlich ändernde Oberfläche wird zu jedem Zeitpunkt der Umgebungsdruck an der nicht durchströmten Grenzfläche vorgegeben. Außer an der Oberfläche selbst hat dieses Feld zwar keine physikalische Bedeutung, es ist aber sicherzustellen, dass keine störenden Einflüsse des Felds auf die Genauigkeit des zeitlichen Integrationsprozesses zurückwirken.

Die Lösung der Erhaltungsgleichungen des transienten, inkompressiblen Fluids kann über verschiedene numerische Methoden erfolgen. Für die hier durchgeführten Berechnungen hat sich die Methode der künstlichen Kompressibilität bewährt. Sie zeichnet

sich durch Robustheit aus und eignet sich über eine quasi-implizite, duale Zeitintegration für transiente Strömungen in dynamischen Systemen.

$$\frac{1}{\rho\beta^2} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \operatorname{div} \vec{v} = 0 \quad (8.6)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial \tau} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \operatorname{div} \vec{v} + \frac{1}{\rho} \nabla p - \operatorname{div} \sigma = \vec{f} \quad (8.7)$$

Im diskretisierten Gleichungssystem werden die physikalischen Zeitableitungen als Quellen behandelt, so dass hyperbolische Integrationsverfahren zur Lösung angewendet werden können. In jedem Zeitschritt werden die künstlichen Zeitableitungen so lange iteriert bis der Wert dieser Ableitung gegen Null geht, so dass die Kontinuitätsgleichung erfüllt ist.

8.2. Beschreibung der Overset-Methode

Um die Relativbewegung von Körpern zu realisieren wurde die Overset-Methode in das MOUSE-Paket integriert. Bei dieser Methode handelt es sich um eine Gitterstrategie, deren Kerngedanke darin liegt, dass für jedes relativ bewegte Objekt ein starres Gitter generiert wird. Die Teilgitter können bei dieser Methode beliebig angeordnet und ineinander verschoben werden. Der Austausch der Strömungsinformationen in den Teilgittern erfolgt über eine wechselseitige Interpolation. Durch diesen Ansatz ist es möglich beliebige Bewegungsmodelle mit relativ bewegten Systemen zu realisieren. Der Vorteil dieser Gitterstrategie liegt darin, dass die Teilgitter sich beliebig überlagern können, ohne dass die einzelnen Teilgitter modifiziert werden müssen. Einzelne Gitter können beliebig ausgetauscht werden, wodurch eine Flexibilität gewährleistet wird, die für Parameterstudien und Optimierungsaufgaben ideal geeignet ist. Jedes Objekt, welches in einer Simulation berücksichtigt werden soll, muss als beliebig geformtes Teilgitter vorliegen. Das bedeutet für die Simulation von zwei sich relativ zueinander bewegenden Schiffen, dass 3 Teilgitter erstellt werden müssen. Ein Gitter, welches das gesamte Lösungsgebiet (z.B. Fluss) beschreibt, auch Hintergrundgitter genannt, und 2 Teilgitter mit randangepassten Volumenelementen, die die jeweilige Schiffsform beschreiben. Das Volumengitter, welches die Schiffe im Teilgitter umgibt, kann durch wenige Schichten realisiert werden. Die einzelnen Teilgitter (Schiffe) können beliebig in das Hintergrundgitter eingesetzt und im Laufe der Berechnung darin verschoben werden. Durch diese Verschachtelung wird eine Hierarchie zwischen den Objekten festgelegt. Netze, die in

anderen enthalten sind, haben eine höhere Priorität und bestimmen damit die darunter liegende Lösung. Positionierung und Anordnung der Objekte erfolgen damit rekursiv über eine Baumstruktur. Die Lage, die Geschwindigkeit und die Beschleunigung der Teilgitter (Schiffe) wird durch den Anwender über sogenannte Szeneriedateien definiert. Im Laufe der Simulation wird diese Datensatzinformation ständig aktualisiert. Die Implementierung dieser Methode ist stark modular, so dass die Methoden des Basislösers kaum beeinflusst werden und uneingeschränkt verfügbar sind. Programmtechnisch äußert sich dies in einer Verwaltungsklasse, welche alle Informationen über die verwendeten Objekte enthält. Als Bindeglied zwischen den Objekten sind Such- und Interpolationsmethoden erforderlich. Die Verknüpfungshierarchie der Objekte und die Beschreibung der Such- und Interpolationsmethoden sind ausführlich in [3] und [8] beschrieben.

8.3. Weiterentwicklung der Overset-Methode

In vorangegangenen Projekten sind eine Reihe von Methoden zur Strömungssimulation unter Nutzung der Overset-Technik entwickelt worden. Diese Methoden wurden auf ihre Anwendbarkeit in diesem Projekt überprüft. Ziel der vorausgehenden Entwicklungen war das Erreichen einer hohen Flexibilität bei der Zusammenschaltung von rekursiv verschachtelten Objekten mit den jeweils zugeordneten Bewegungsmodellen. Die hohe Flexibilität der entwickelten Methoden hat zur Folge, dass der Aufwand für die Parallelisierung der Berechnungsverfahren erheblich ansteigt. Der Schwerpunkt der Entwicklung wurde auf die Erweiterung und Verbesserung der Bewegungsmodelle gelegt, die ausführlich getestet und anschließend in das MOUSE-Paket implementiert wurden.

8.3.1. Bewegungsmodelle

Zur Simulation von allgemeinen Passiervorgängen wurden Bewegungsmodelle entwickelt und in die Software integriert. Die Bewegungsmodelle, die im Rahmen des Projektes SicherBin entwickelt wurden, konzentrierten sich im Wesentlichen auf die Realisierung translatorischer Bewegungen der Teilgitter. Durch die Entwicklungsarbeiten im Projekt SimuBin erfolgte eine Modifizierung der Bewegungsmodelle, so dass eine Rotationsbewegung der Teilgitter möglich ist. Diese Entwicklungen ermöglichen, dass die dynamische Schwimmelage eines Schiffes bei der Strömungssimulation mit berücksichtigt wird. Insbesondere bei der Fahrt eines Schiffes in begrenztem Fahrwasser wird das

Strömungsverhalten wesentlich von Trimm und Absenkung beeinflusst. Innerhalb dieses Projektes wurden die Bewegungsmodelle überarbeitet und für die Interaktionen zwischen unterschiedlichen Störkörpern erweitert. Insbesondere wurden die Verfahren dahingehend modifiziert, dass sie allgemeingültiger sind und ein breiteres Anwendungsgebiet abdecken.

Generell können die Bewegungsmodelle in zwei Gruppen aufgeteilt werden (Abbildung 8.1). Die erste Gruppe beschreibt von außen einem Teilgitter aufgeprägte, also vom Anwender definierte Bewegungen, bei denen die Geschwindigkeit, die Richtung und die Beschleunigung vorgegeben werden (z.B. rotierende Propeller oder eine Vorausfahrt eines Schiffes). Die zweite Gruppe der Bewegungsmodelle sind die Modelle, deren Bewegung (Richtung, Geschwindigkeit) durch die Interaktion des Körpers mit dem Fluid induziert wird. Diese Modelle werden im Folgenden als so genannte bedingte Bewegungsmodelle bezeichnet (z.B. dynamische Schwimmelage eines Schiffes).

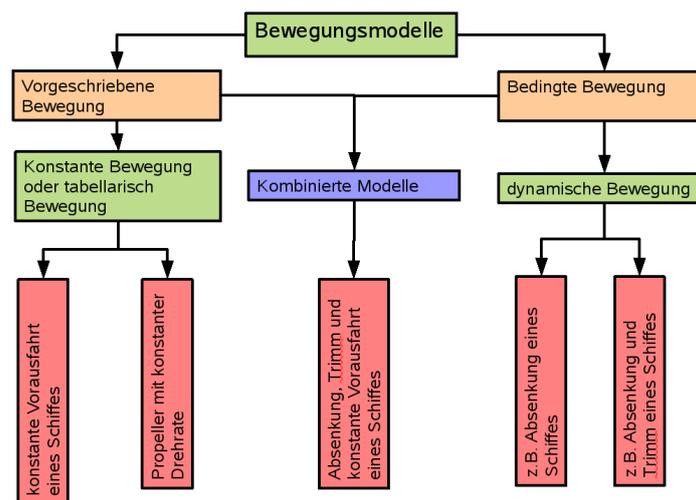


Abb. 8.1.: Bedingte und vorgeschriebene Bewegungsmodelle sowie Beispiele der Anwendung.

Betrachtet man den allgemeinsten Fall einer bedingten Bewegung in allen Freiheitsgraden, so wird die Wirkung der Strömung auf die sich ändernde Bewegung des Körpers folgendermaßen bestimmt. Nach jedem Zeitschritt werden die auf einen Körper wirkenden Kräfte und Momente ermittelt. Die Bestimmung der Kräfte und Momente erfolgt im Inertsystem, einem nicht bewegten Referenzsystem. Im Anschluss werden diese Kräfte in das sich bewegende System transformiert. Im Bewegungsmodell werden nun Beschleunigungen und Geschwindigkeiten sowie die neue Position bestimmt und in das lokale System transformiert. Danach erfolgt die Verschiebung bzw. Drehung des Gitters in die berechnete Lage, die sich aus aufgeprägter und bedingter Bewegung ergeben kann. Die Kombination dieser beiden Bewegungsarten wurde für die Simulation

von Passiervorgängen angepasst. Durch diese Entwicklungen kann das reale Verhalten eines Schiffes bei Interaktion mit anderen Schiffen wiedergegeben werden. Jedes Overset-Objekt ist mit einem eigenen Bewegungsmodell versehen, so dass mit diesem Bewegungsmodell prinzipiell der Passiervorgang simuliert werden kann. Für die Modellierung des Experimentes im Schlepptank wird das Modell geführt bewegt. Dieser Freiheitsgrad wird von außen vorgegeben und die dynamische Schwimmelage wird reduziert auf je einen rotatorischen und translatorischen Freiheitsgrad damit die Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen mit den numerischen Berechnungen verglichen werden können.

Numerische Untersuchungen mit den entwickelten Ansätzen der Realisierung der Bewegung haben gezeigt, dass es sinnvoll ist, ein weiteres Bewegungsmodell einzuführen, um die Fahrt von Schiffen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten zu realisieren. Wird das Bewegungsverhalten mit den beiden oben beschriebenen Verfahren modelliert, erhöht sich die Rechenzeit um ein Vielfaches. Die Schiffe müssen solange durch das Fluid bewegt werden, bis sich eine stabile Lösung einstellt. Aus diesem Grund muss ein sehr großes Lösungsgebiet definiert werden, welches physikalisch nicht notwendig ist. Im Gegensatz dazu wird bei herkömmlichen CFD-Berechnungen mit fahrenden Schiffen die Geschwindigkeit am Einstromrand vorgegeben und das Schiff fest im Fluid fixiert. Bei diesem Verfahren ist die Größe des Lösungsgebietes klar definiert und nicht von der Stabilität der Berechnung abhängig. Diese Methode kann auch bei Berechnungen mit den entwickelten Bewegungsmodellen eingesetzt werden, sofern sich beide Schiffe mit der gleichen Geschwindigkeit fortbewegen. Für die Bewegung von Schiffen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten wurde ein weiteres Bewegungsmodell entwickelt, welches die Schiffsgeschwindigkeit durch geeignete Freigabe und Unterdrückung von Freiheitsgraden bzw. durch Modifizierung der Anströmgeschwindigkeiten ermöglicht.

8.3.2. Propellermodell

Zur Berücksichtigung einer Propellerwirkung wurde ein Scheibenmodell aus den Basismethoden des Programmpaketes MOUSE [17] modifiziert. Die Anpassung des Modells erfolgte mit dem Ziel der Integration der Aktuatordisk in ein beliebiges Teilgitter der interagierenden Schiffe im Lösungsgebiet unter Berücksichtigung der Wirkrichtung des Propellers im globalen Koordinatensystem. Bei der bestehenden Implementierung erfolgte die Bestimmung der Zuordnung der Elemente und Knoten am Interface zwischen

Propeller und Grundgitter schon bei der Initialisierung der Berechnung. Liegt die Aktuatordisk innerhalb eines Overset-Gitters und bewegt sich dieses, wird die Aktuatordisk mitbewegt. Die Wirkrichtung des Schubes wird im globalen Koordinatensystem definiert und der Bewegung entsprechend angepasst (Abbildung 8.2).

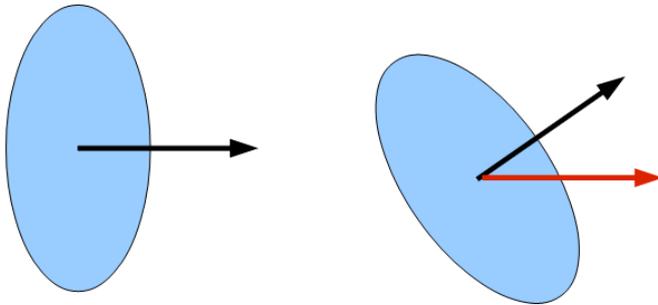


Abb. 8.2.: Anpassung des Propellermodells an die Overset-Methode. Der rote Pfeil zeigt die Wirkrichtung des Schubes ohne Anpassung.

8.3.3. Parallelisierung der Overset-Objekt Methode

Die in diesem Projekt durchzuführenden Simulationen sind komplexe Berechnungen mit sehr hohem Rechen- und Speicheraufwand. Das ist vor allem darin begründet, dass die Bewegung von interagierenden Schiffen nicht als stationäre Berechnung durchgeführt werden kann und die Diskretisierung von mehr als einem Schiffsmodell die Anzahl der Gitterelemente zur Beschreibung der Geometrie deutlich erhöht. Der Speicherbedarf für einen Berechnungsfall und die Notwendigkeit für parametrische Untersuchungen möglichst viele Berechnungen in kurzer Zeit zu realisieren, machte eine Parallelisierung der Overset-Objekt Methode unabdingbar. Die Parallelisierung der Methode erfolgte zeitlich gegen Ende des Projektes SimuBin und zu Beginn dieses Projektes. Die algorithmische Umsetzung der Parallelisierung ist detailliert in [3] dokumentiert. Die hohe Komplexität und die Forderung nach flexiblen allgemeingültigen Methoden erschweren die Parallelisierung nicht unerheblich. Änderungen der Methoden ziehen immer wieder programmtechnische Anpassungen der Parallelrechenalgorithmen nach sich. Da sich der gewählte Ansatz für die Parallelprogrammierung als richtig erwiesen hat, wurde jedoch an diesem Konzept festgehalten. Auf eine detaillierte Beschreibung des Konzeptes wird hier verzichtet. Es werden kurz die benötigten Programmteile beschrieben.

Im Programmpaket MOUSE war schon eine Parallelisierungsmethode für Einzelgitter enthalten. Diese Parallelisierung beruht auf dem Konzept der Gebietszerlegung. Die zerlegten Gebiete haben Überlappungsbereiche, so dass ein Prozess auf einer CPU

einen Gitterbereich abdeckt, auf dem er für die Lösung verantwortlich ist, während die Daten im Überlappungsbereich aus dem Gültigkeitsbereich anderer Prozesse kommen. Zwischen den einzelnen Prozessen müssen also Daten ausgetauscht werden. Die Informationen darüber, welche Gitterpunkte im Überlappungsbereich eines Teilgebietes liegen, wird vor Beginn der Rechnung ausgeführt, da sich diese Zuordnungen zur Laufzeit des Programms nicht ändern.

Bei der Parallelisierung der Overset-Objekt Methode kann jedes Einzelgitter wie bisher zerlegt werden. Diese Zuordnung innerhalb der Einzelgitter liegt also ebenfalls vor Beginn der Simulation vor. Der Schwerpunkt der Arbeiten bei der Parallelisierung liegt in der Kopplung der Overset-Objekte durch Interpolation. Durch die Bewegung der einzelnen Teilgitter ändern sich die Zuordnungen zwischen den Interpolationspartnern. Des Weiteren ändern sich die Transformationen zwischen den einzelnen Overset-Objekten. Die Interpolation muss diese sich ständig ändernden Transformationen berücksichtigen.

Es wurden Methoden entwickelt, die ein effizientes Auffinden der Schnittstellen zwischen den zu interpolierenden Gittern ermöglichen. Durch diese effizienten Suchalgorithmen führt das Versenden und Empfangen von Daten zwischen den parallelen Prozessen nicht zu einer Überlastung des Netzwerkes.

8.4. Dynamische Schwimmelage

An einem umströmten Schiffskörper stellt sich eine Druckverteilung ein, welche von der hydrostatischen Druckverteilung im Ruhezustand abweicht. Zur Gewährleistung des Gleichgewichts der Summe aller Kräfte und Momente reagiert ein Schiff mit einer Anpassung der Schwimmelage. Dies geschieht in den schwingungsfähigen Freiheitsgraden, bei denen eine Auslenkung vom Gleichgewichtszustand eine Rückstellkraft bzw. ein rückstellendes Moment hervorruft. Diese Freiheitsgrade sind Tauchen, Rollen und Stampfen, welche sich hier in der mittleren dynamischen Absenkung, der Krängung und dem Trimm widerspiegeln.

Bei einer Umströmung des Schiffes, die weitgehend symmetrisch zur Mittschiffsebene ist, bleibt die Krängung durch die Vorausfahrt im Glattwasser in der Regel unbeeinflusst. In den meisten hier durchgeführten Versuchen zu den Effekten bei Passiervorgängen galt es, instationäre Querkräfte zu messen. Da der Angriffspunkt dieser Querkräfte nicht vorab bekannt ist, würde die Messung der Kraft bei geführten Versuchen mit freier Rollachse eine Ausweichbewegung und damit eine nicht der Realität entsprechende Krängung bewirken. Daher wurde in den experimentellen Untersuchungen die Krängung unterdrückt, so dass sich die dynamische Schwimmelage auf die Absenkung und den Trimm beschränkt.

Zur Validierung der entwickelten Methoden wurden Simulationen mit einem Panmax Containerschiff (KCS) zur Bestimmung der dynamischen Schwimmelage in stationären Fahrtzuständen durchgeführt und die Simulationen wurden mit Driftversuchen und Versuchen zur Untersuchung des Tankwandeinflusses verglichen.

8.4.1. Simulationen zu Driftversuchen

Für eine erste Kontrolle der Simulationsergebnisse wurden zunächst Driftversuche herangezogen, welche eine Validierung der Kräfte und der dynamischen Schwimmelage ohne zusätzliche Fehlerquellen, beispielsweise durch instationäre Abläufe, zulassen. Als Modell wurde das Panmax Containerschiff (KCS) mit einem Tiefgang von 10,80 m bei 19,00 m Wassertiefe verwendet. Die Versuche wurden mit Driftwinkeln von 0° , 2° , 4° und 8° mit freiem Trimm und freier Absenkung für eine Geschwindigkeit entsprechend 16 kn in der Großausführung durchgeführt.

In den nachstehenden Abbildungen ist exemplarisch der Vergleich zwischen Experiment und Simulation für das Giermoment und den Trimmwinkel dargestellt. Die Ergeb-

nisse für das Giermoment zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Experimenten. Die Abhängigkeit des dynamischen Trimmings vom Driftwinkel wird ebenfalls gut wiedergegeben, allerdings wird dieser in der Simulation bislang etwas unterschätzt.

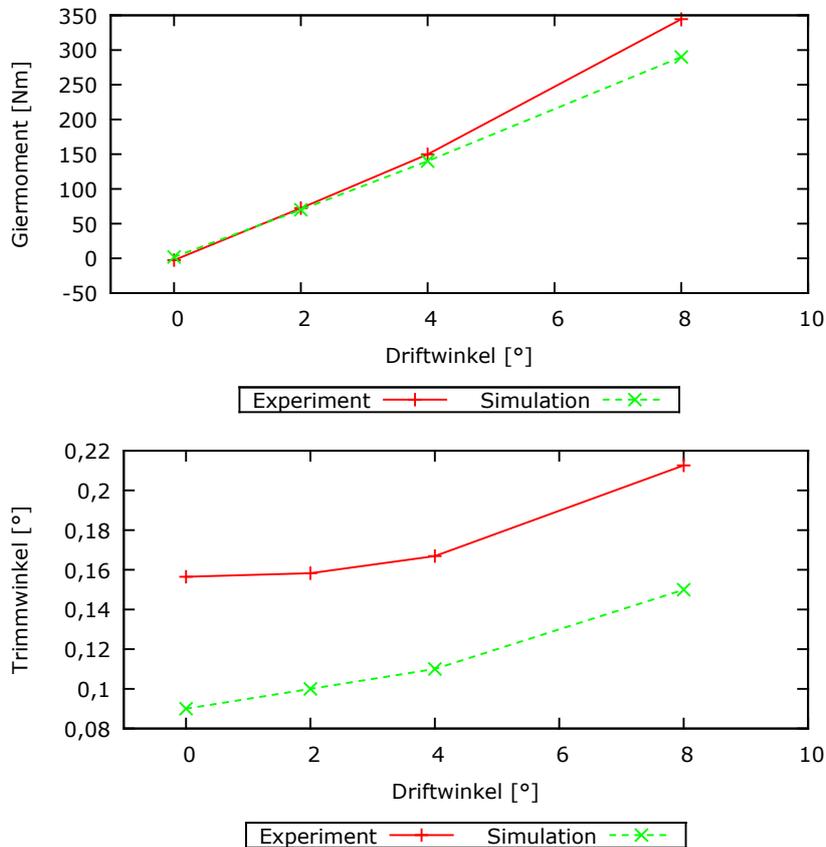


Abb. 8.3.: Giermoment und Trimmwinkel unter Drifteinfluss.

8.4.2. Simulationen zum Tankwandeinfluss

Zur weiteren Validierung der Bestimmung der dynamischen Schwimmelage wurden Simulationen bei unterschiedlichen Wandabständen durchgeführt. Exemplarisch werden die Simulationsergebnisse für einen Wandabstand von 1 m, entsprechend 40 m in der Großausführung, dargestellt. Die verwendeten Gitter und die Positionierung des KCS im Rechengebiet sind in Abbildung 8.4 dargestellt, in Analogie zur Situation im Versuchstank.

In den nachfolgenden Tabellen werden die experimentellen Daten mit den Werten aus der Simulation verglichen. Die erste Tabelle bezieht sich auf eine Geschwindigkeit des Modells von 0,813 m/s, die zweite auf eine Geschwindigkeit von 1,220 m/s. Der Trimmwinkel wird, im Gegensatz zum Vergleich bei den Driftversuchen, nun leicht überschätzt.

Die Absenkung wird für beide Geschwindigkeiten etwas unterschätzt. Die Seitenkräfte und das Giermoment werden dafür sehr gut wiedergegeben.

0,813 m/s	Y [N]	N [Nm]	Absenkung [mm]	Trimm [°]
EFD	6,05	-6,36	10,21	0,0257
CFD	5,91	-6,29	6,05	0,0573

1,220 m/s	Y [N]	N [Nm]	Absenkung [mm]	Trimm [°]
EFD	16,5	-20,58	23,44	0,0973
CFD	16,49	-22,64	18,40	0,1203

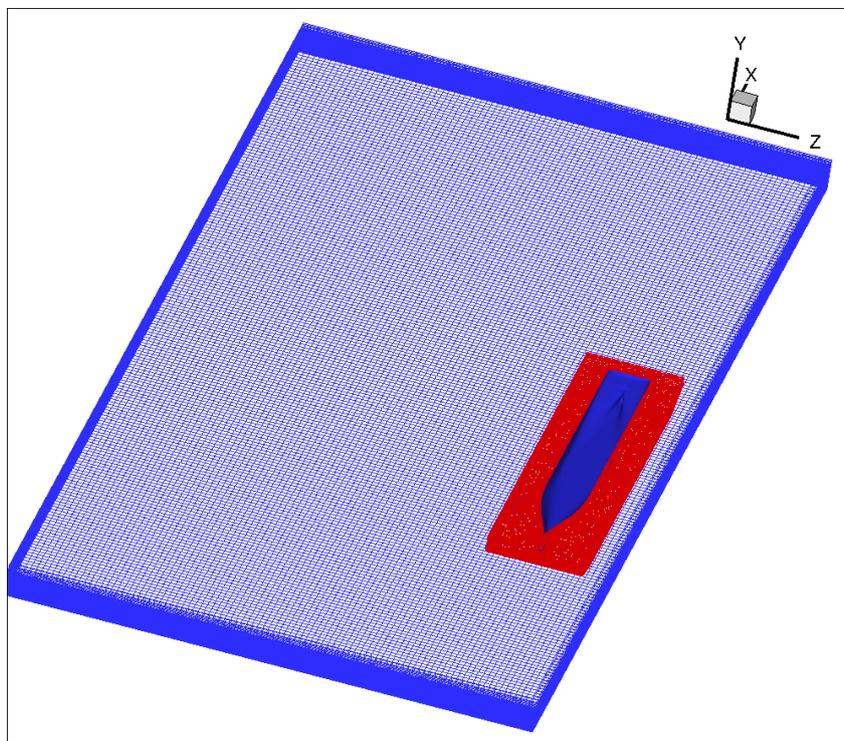


Abb. 8.4.: Positionierung des Schiffsgitters im Simulationsgebiet bei einem Wandabstand von 1 m.

Insgesamt wird mit den neu entwickelten Methoden das physikalische Verhalten gut und dem Trend nach richtig wiedergegeben. Damit eignet sich das Verfahren, um als Basis für die vom Simulator benötigte Modellbildung zu dienen.

8.5. Numerische Simulationen von Passiervorgängen

Bisher wurden die entwickelten Methoden zur Bestimmung der dynamischen Schwimm- lage für ein einzelnes Schiff im stationären Fahrtzustand genutzt. Die Implementierung von getrennten Bewegungsmodellen für jedes im Lösungsgebiet fahrende bzw. ruhen- de Schiff ermöglicht die Berechnung der Schwimm- lage der interagierenden Schiffe. Im Folgenden werden diese Methoden auf zwei Schiffe, ein Feederschiff und ein Panmax- Containerschiff (KCS), in unterschiedlichen Passiersituationen angewendet. Die Länge des KCS zwischen den Loten beträgt 230 m, bei einem Tiefgang von 10,80 m. Der Fee- der hat, bei einer Länge von 126 m zwischen den Loten, einen Tiefgang von 6,50 m. Alle berechneten Werte aus den Simulationen werden auf die entsprechenden Modelle im Maßstab 1:40 bezogen.

8.5.1. Passiervorgang an einem ruhendem Schiff

Bei den hier betrachteten Simulationen wird ein ruhendes Feederschiff von einem ty- pischen Containerschiff (KCS) passiert. Das Modell des KCS bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 1,464 m/s, entsprechend 18 kn, auf einer Trajektorie parallel zur Tankwand. Die Bewegungsmodelle der Einzelschiffe sind so definiert, dass sich die Schwimm- lage des Feeders durch die Wirkung der Umströmung selbst einstellen kann, während das Bewegungsmodell des Containerschiffes alle Freiheitsgrade fixiert. In Ana- logie zum Experiment wird ein Simulationsgebiet generiert, das der Tankbreite im Mo- dellversuch entspricht. Die Länge des Rechengebiets wird zur Reduktion des numeri- schen Aufwands auf einige Modelllängen beschränkt. Die Ausdehnung des Lösungs- gebietes muss dabei so gewählt werden, dass eine Beeinflussung der Lösung durch die Ränder verhindert wird. Die Fahrt des Schiffes wird nicht am Eintrittsrand vorgege- ben, sondern im Bewegungsmodell des Schiffes definiert. Das Wasser befindet sich, abgesehen von der Verdrängungsströmung des KCS, in Ruhe.

8.5.1.1. Winkeldifferenz 0°

Bei der Simulation ohne Kurswinkeldifferenz zwischen beiden Schiffen ist der Feeder parallel zur Trajektorie des KCS ausgerichtet und die Vorschiffe zeigen in die gleiche Richtung. In Abbildung 8.5 ist die Positionierung zu Beginn der Simulation dargestellt. Die Länge des Hintergrundgitters beträgt rund das Sechsfache der Länge des KCS. Dieses Gitter wurde so generiert, das es modular für eine Reihe von Passiervorgängen

eingesetzt werden kann. Durch diese Vorgehensweise wird der Gittergenerierungsaufwand für die Vielzahl von Simulationen deutlich reduziert. Nachteilig bei dieser Methode ist, dass sich die Anzahl der Elemente unnötig vergrößert, da notwendige Verfeinerungen in Bereichen mit hohen Druck- bzw. Geschwindigkeitsgradienten, allgemeingültig für alle Passiervorgänge sein sollen. Auf möglichen Trajektorien der Schiffsgitter innerhalb des Hintergrundgitters wurden ebenfalls Verfeinerungen vorgenommen, damit für die Schiffsgitter immer eine ausreichende Lösungsankopplung mit dem Hintergrundgitter gewährleistet ist.

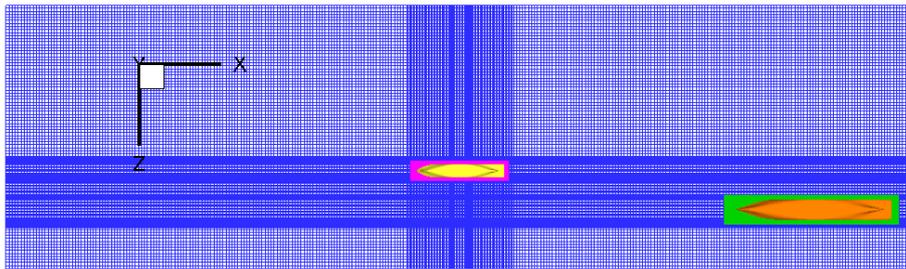


Abb. 8.5.: Positionen der Schiffsgitter im Hintergrundgitter zum Beginn der Simulation.

Abbildung 8.6 zeigt die Veränderung der freien Wasseroberfläche gegenüber der Ruhewasseroberfläche als Contourplot. Die auf den Feeder wirkenden Kräfte und Momente werden in Abbildung 8.23 mit den experimentellen Daten verglichen. Es sind Abweichungen zwischen dem Experiment und der Simulation vorhanden, beispielsweise in der Längskraft X bei der relativen Position $t_r = -1,0$. Insgesamt gibt die Simulation den Verlauf der Kräfte und des Giermomentes jedoch gut wieder. Der Verlauf von Absenkung und Trimm zeigt die Veränderung der dynamischen Schwimmhöhe bei der Vorbeifahrt des Schiffes (Abbildung 8.8).

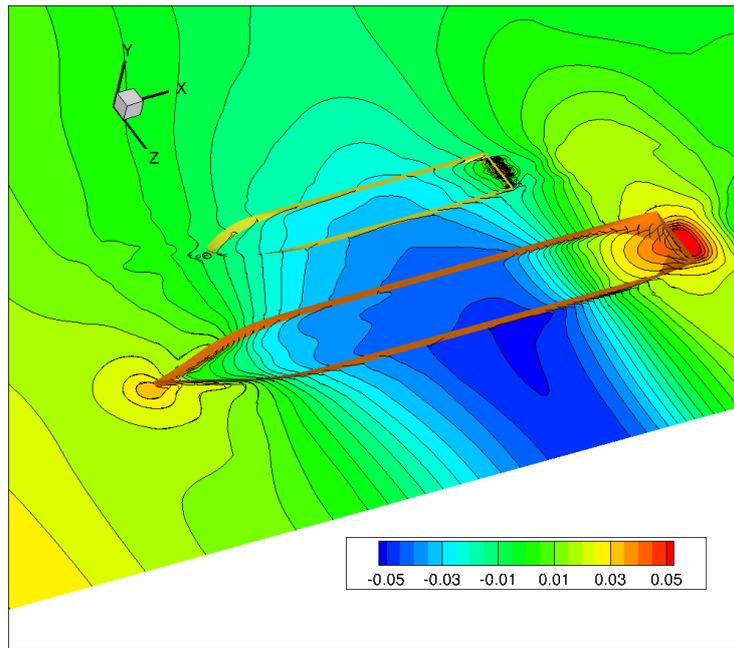


Abb. 8.6.: Auslenkung der freien Oberfläche bei der Vorbeifahrt am ruhenden Feeder mit einer Differenz der Kurswinkel von 0° .

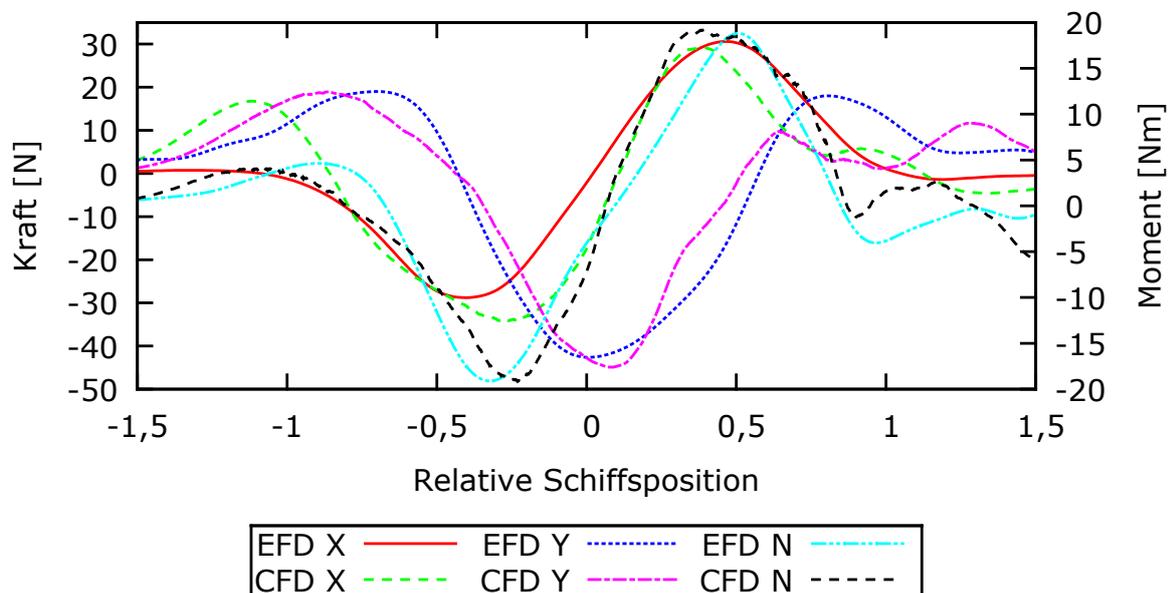


Abb. 8.7.: Längskräfte X, Querkräfte Y und Giermomente N aus Experiment und Simulation für den stillliegenden Feeder bei einer Differenz der Kurswinkel von 0° .

Die Abbildung 8.8 zeigt, dass Trimm und Absenkung des Schiffes in Teilbereichen deutlich vom Experiment abweichen. Insbesondere in einem Bereich der noch vor dem eigentlichen Überholvorgang liegt ($-1,5 < t_r < -1,0$) zeigen sich Unterschiede zwischen

experimentellen Untersuchungen und der computergestützten Berechnung des Bewegungsverhaltens. Diese Abweichung ist begründet in der Initialisierung der Simulation, denn das KCS wird in ein ruhendes Gebiet eingesetzt und instantan bewegt, was bedeutet, dass das Schiff sofort mit der Schiffsgeschwindigkeit bewegt wird. Die in der Realität vorhandene Anfahrphase wird übersprungen. Es bildet sich analog zur den Messfahrten im Schlepptank (siehe Kapitel 4.5 auf Seite 21) eine Anfahrwelle aus, die sich mit Stauwellengeschwindigkeit in Fahrtrichtung des KCS bewegt. Im Gegensatz zum Modellversuch ist die Länge des Simulationsgebiets nicht ausreichend, so dass die Wirkung der Anfahrwelle auf den Feeder schon vor der Vorbeifahrt des KCS abgeklungen ist. Das bewirkt ein Austauschen des Feeders (negative Absenkung) mit buglastiger Vertrimmung, bevor das Modell in Folge der eigentlichen Interaktion während des Passierens wie erwartet zunächst hecklastig und später buglastig vertrimmt.

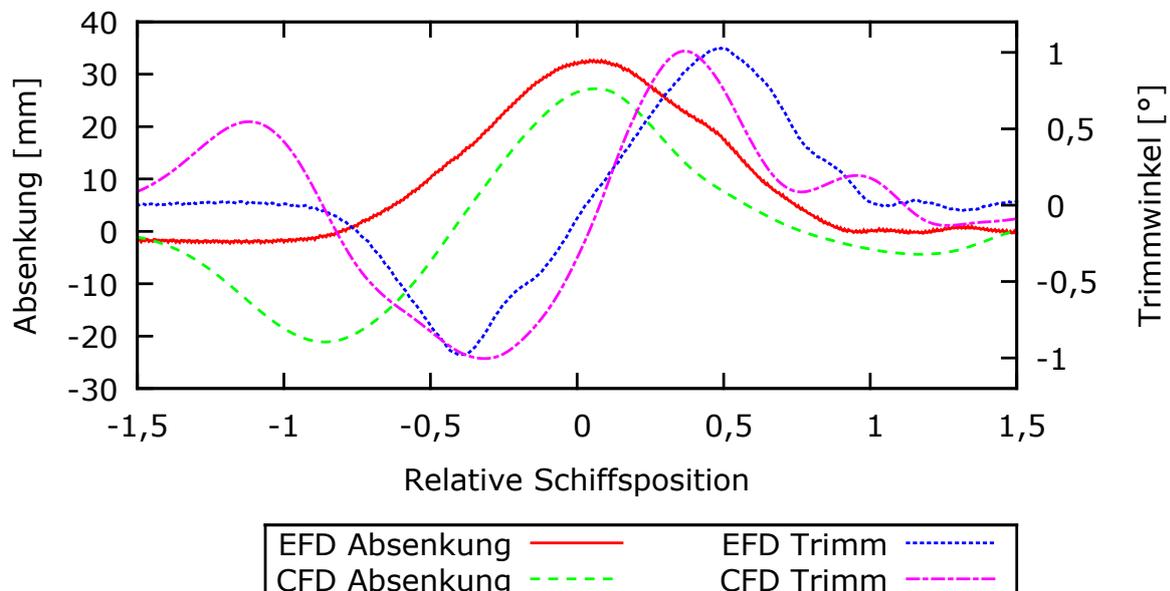


Abb. 8.8.: Absenkung und Trimm aus Experiment und Simulation für den stillliegenden Feeder bei einer Differenz der Kurswinkel von 0° .

8.5.1.2. Winkeldifferenz 90°

Die Rahmenbedingungen aller Simulationen der Vorbeifahrt an einem ruhenden Schiff sind identisch. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Berechnungen ergeben sich aus der Lage der Schiffe zueinander. Bei einer Winkeldifferenz der interagierenden Schiffe von 90° ist der Feeder normal zur Trajektorie des KCS ausgerichtet. Der lichte Abstand zwischen dem vorderen Lot des Feeders und der Seitenwand des KCS beträgt wie zuvor 32 m. Die Abbildung 8.9 gibt diese Konstellation wieder und der Farbverlauf

zeigt die Auslenkung der Oberfläche zu einem Zeitpunkt in der Mitte des Passiervorgangs. Die Abbildungen 8.10 und 8.11 zeigen die zeitlichen Verläufe der Längskraft, der Querkraft, des Giermomentes, der Absenkung und des Trimms im Vergleich mit dem Experiment. Wieder zeigt sich im Bereich $-1,5 < t_r < -0,75$ die Beeinflussung durch die Anfahrwelle. Im weiteren Verlauf des Überholvorganges wird durch die numerische Simulation eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Experiment erreicht.

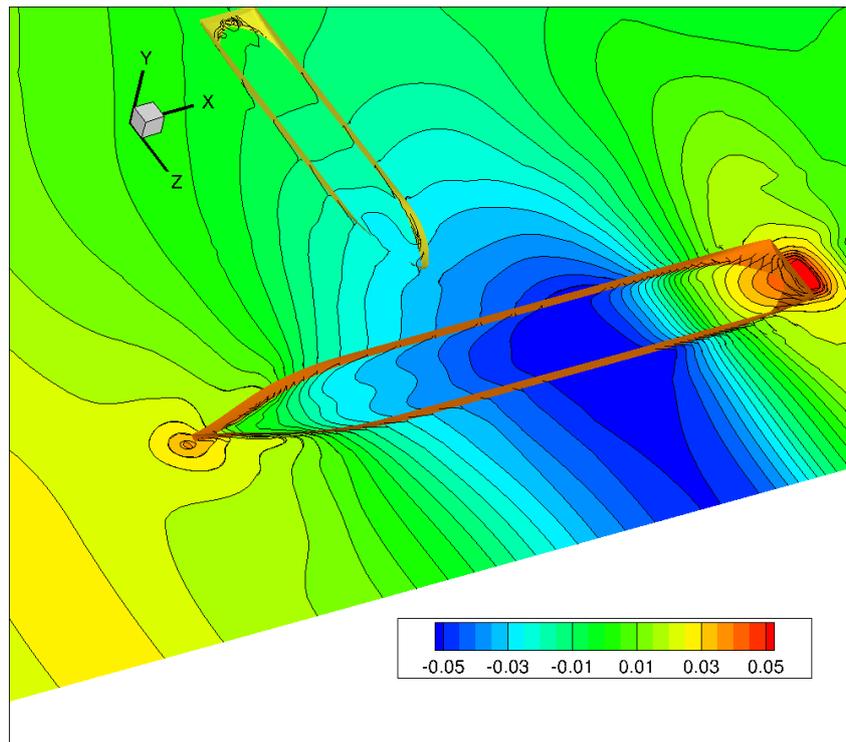


Abb. 8.9.: Auslenkung der freien Oberfläche bei der Vorbeifahrt am ruhenden Feeder mit einer Differenz der Kurswinkel von 90° .

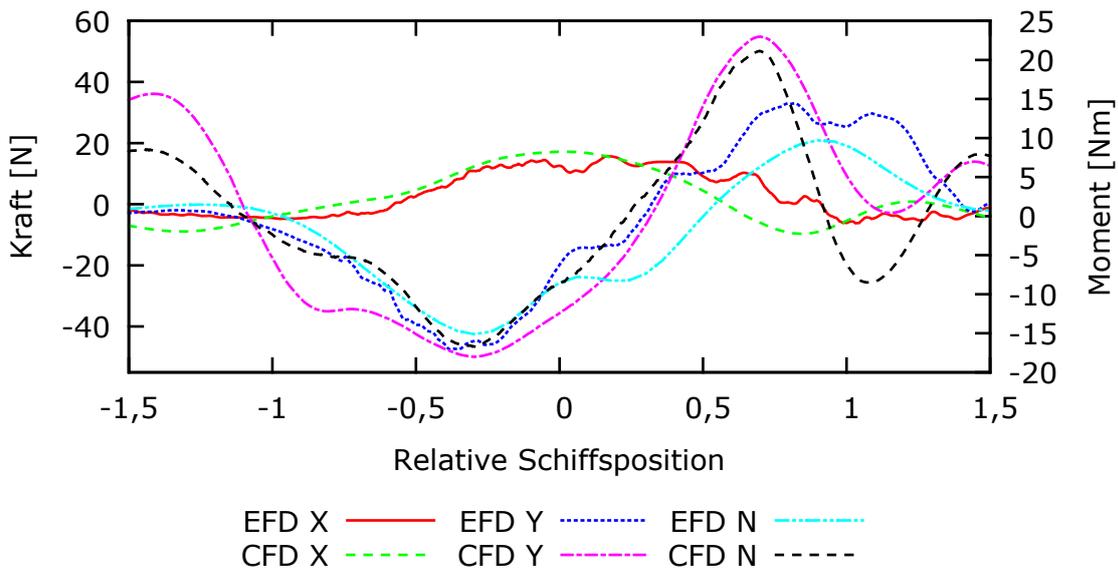


Abb. 8.10.: Längskräfte X, Querkräfte Y und Giermomente N aus Experiment und Simulation für den stillliegenden Feeder bei einer Differenz der Kurswinkel von 90°.

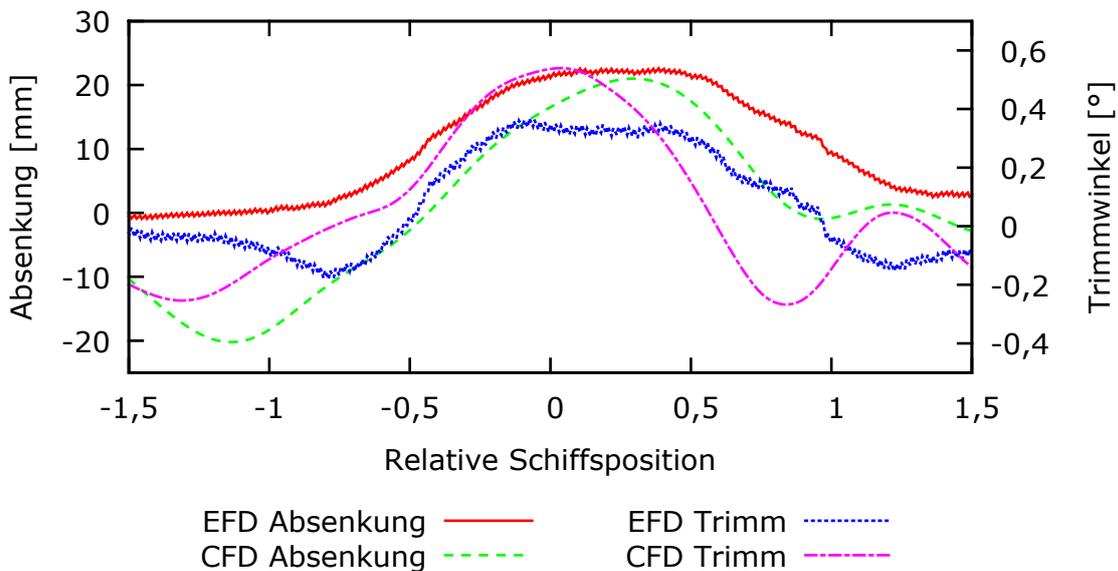


Abb. 8.11.: Absenkung und Trimm aus Experiment und Simulation für den stillliegenden Feeder bei einer Differenz der Kurswinkel von 90°.

8.5.1.3. Winkeldifferenz 45°

In dieser Simulation wird der Feeder in einem Winkel von 45° zur Trajektorie des KCS positioniert (Abbildung 8.12). Der Farbverlauf stellt die Auslenkung der Oberfläche zu

einem Zeitpunkt des Passiervorgangs dar. In Abbildung 8.13 sind die zeitlichen Verläufe der Längskraft, der Querkraft und des Giermomentes über der relativen Position t_r aufgetragen. Die Abbildung 8.14 zeigt die zeitlichen Verläufe der Absenkung und des Trimmwinkels in der Simulation und dem Experiment. Die Auswertung der Ergebnisse lässt erkennen, dass für alle Simulationen ohne Anfahrphase eine Beeinflussung durch die Anfahrwelle im Bereich $-1,5 < t_r < -1,0$ erkennbar ist. Der weitere Verlauf des Manövers wird durch die Simulation gut wiedergegeben.

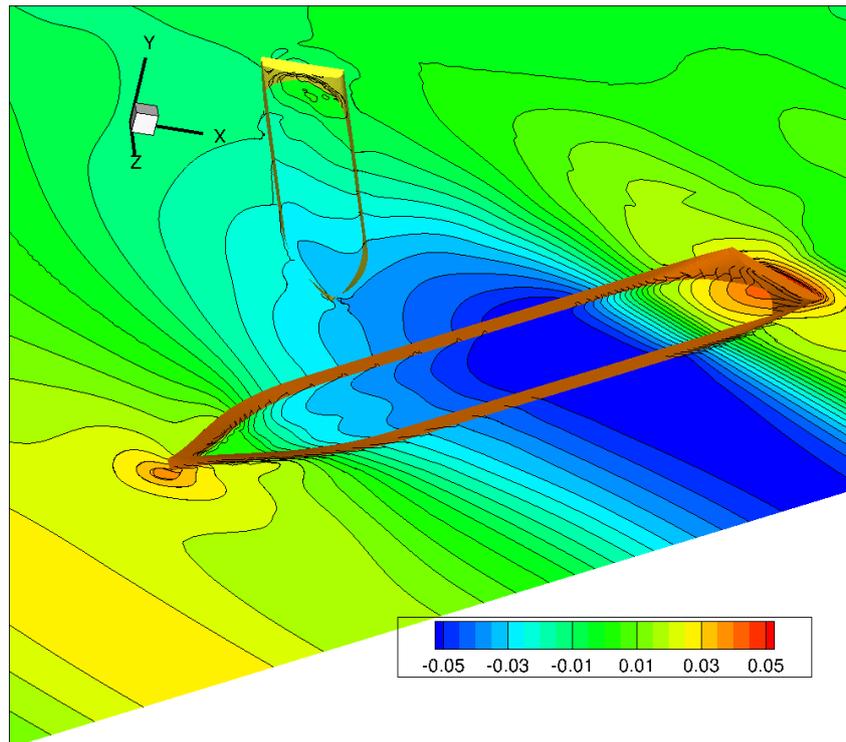


Abb. 8.12.: Ruhender Feeder bei einem Kurswinkel von 45° und Auslenkung der freien Oberfläche.

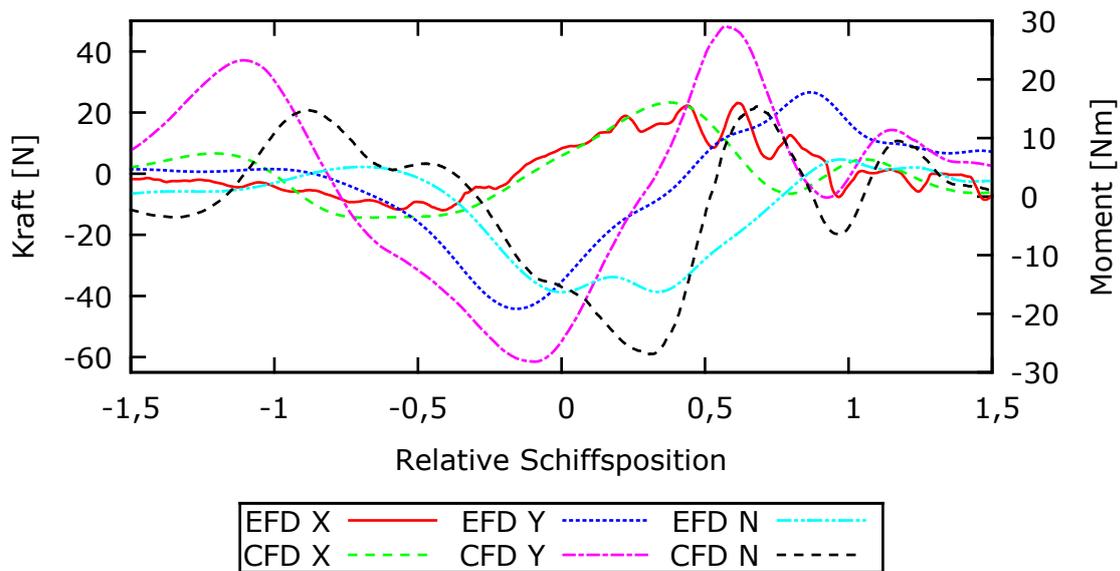


Abb. 8.13.: Längskräfte X, Querkräfte Y und Giermomente N aus Experiment und Simulation für den stillliegenden Feeder bei einer Differenz der Kurswinkel von 45°.

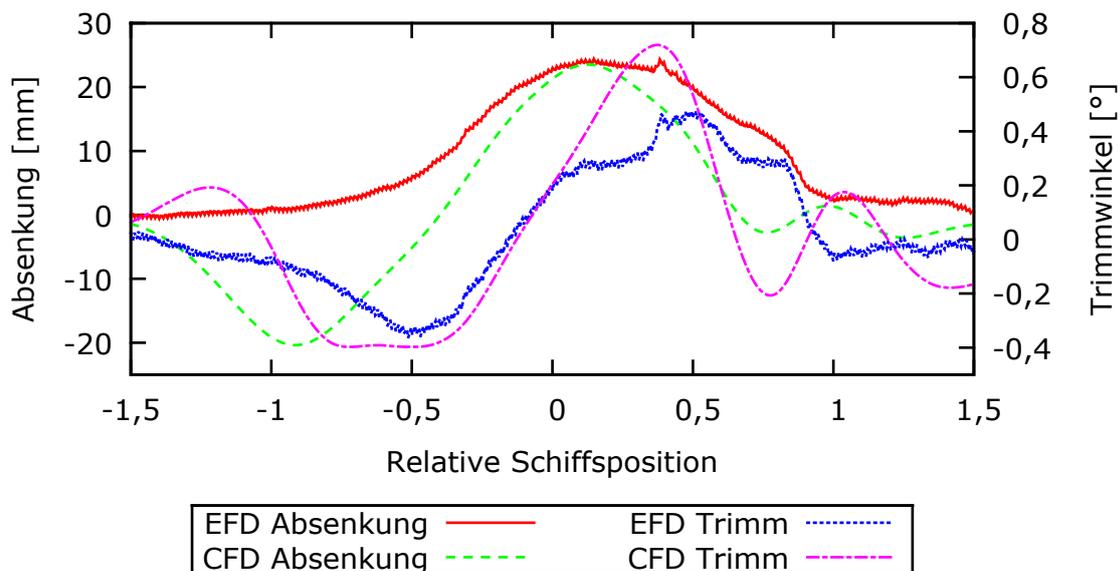


Abb. 8.14.: Absenkung und Trimm aus Experiment und Simulation für den stillliegenden Feeder bei einer Differenz der Kurswinkel von 45°.

Wenn es gelingt die Wirkung der Anfahrwelle zu reduzieren, dann geben die Simulationen die Verläufe der Kräfte, des Momentes, der Absenkung und des Trimmwinkels gut wieder.

8.5.2. Passiervorgänge durch Überholen des Feeders

In der Binnenschifffahrt ist das Passieren von Schiffen, die sich mit unterschiedlichen Vorausgeschwindigkeiten bewegen, ein häufig auftretender Interaktionsfall. In diesem Abschnitt werden Simulationen zum Vorgang des Überholens, mit jeweils konstanter, aber unterschiedlicher Vorausgeschwindigkeit beider Fahrzeuge, durchgeführt.

8.5.2.1. Überholvorgang zweier sich parallel bewegender Schiffe

Der hier untersuchte Passiervorgang modelliert die Vorbeifahrt eines Containerschiffes (KCS) an einem Feederschiff, wobei die Fahrtrichtung beider Schiffe identisch ist. Das Modell des KCS bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 1,464 m/s entsprechend 18 kn in der Großausführung. Die Geschwindigkeit des Feeders wurde mit 0,203 m/s festgelegt. Das Containerschiff wird fest eingespannt, so dass eine dynamische Veränderung der Schwimmelage nicht möglich ist. Durch die Wirkung der Vorbeifahrt des KCS Modells erfährt der Feeder eine Veränderung der dynamischen Schwimmelage. Trimm und Absenkung stellen sich im Laufe der Simulation entsprechend der Strömungsverhältnisse ein. Für diese Simulationen werden die gleichen Gitter wie im Abschnitt 8.5.1 verwendet. Am Einströmrand des Gewässers wird keine Strömungsgeschwindigkeit vorgegeben. Die Geschwindigkeit beider Schiffe wird über das schiffseigene Bewegungsmodell realisiert. Beide Schiffe bewegen sich instantan zum Beginn der Simulation. In der Abbildung 8.15 ist die Ausgangssituation beim Simulationsstart dargestellt. Die Abbildung 8.16 zeigt die Auslenkung der freien Oberfläche zu mehreren Zeitpunkten des Überholvorganges. Durch die abrupte Bewegung beider Schiffsgitter zu Beginn der Simulation wird auch hier eine Anfahrwelle erzeugt. Der Einfluss der Anfahrwelle kurz vor dem Überholvorgang ist deutlich in der Abbildung 8.16 zu erkennen. Dies findet sich ebenfalls in den Abbildungen 8.17 und 8.18 wieder, die die Längskraft, die Querkraft, das Giermoment, die Absenkung und den Trimm mit den experimentellen Daten vergleichen. Ab einer relativen Schiffsposition von $t_r = -0,5$ gibt es eine gute Übereinstimmung bei allen Kraft- und Bewegungsgrößen, ausgenommen die Absenkung des Schiffes, die leicht unterschätzt wird.

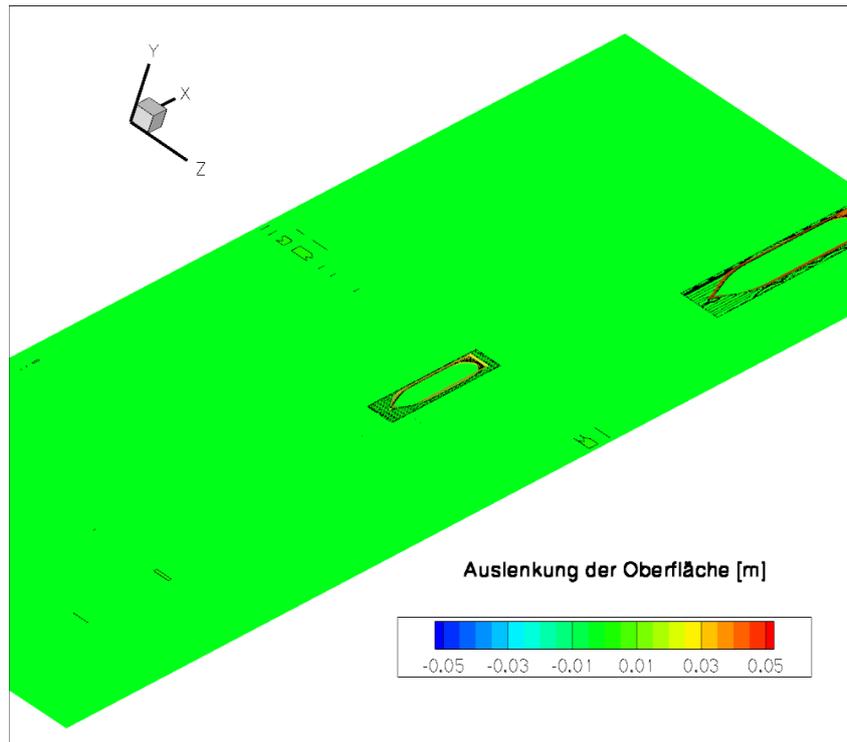


Abb. 8.15.: Positionierung der Schiffsgitter zu Beginn der Simulation.

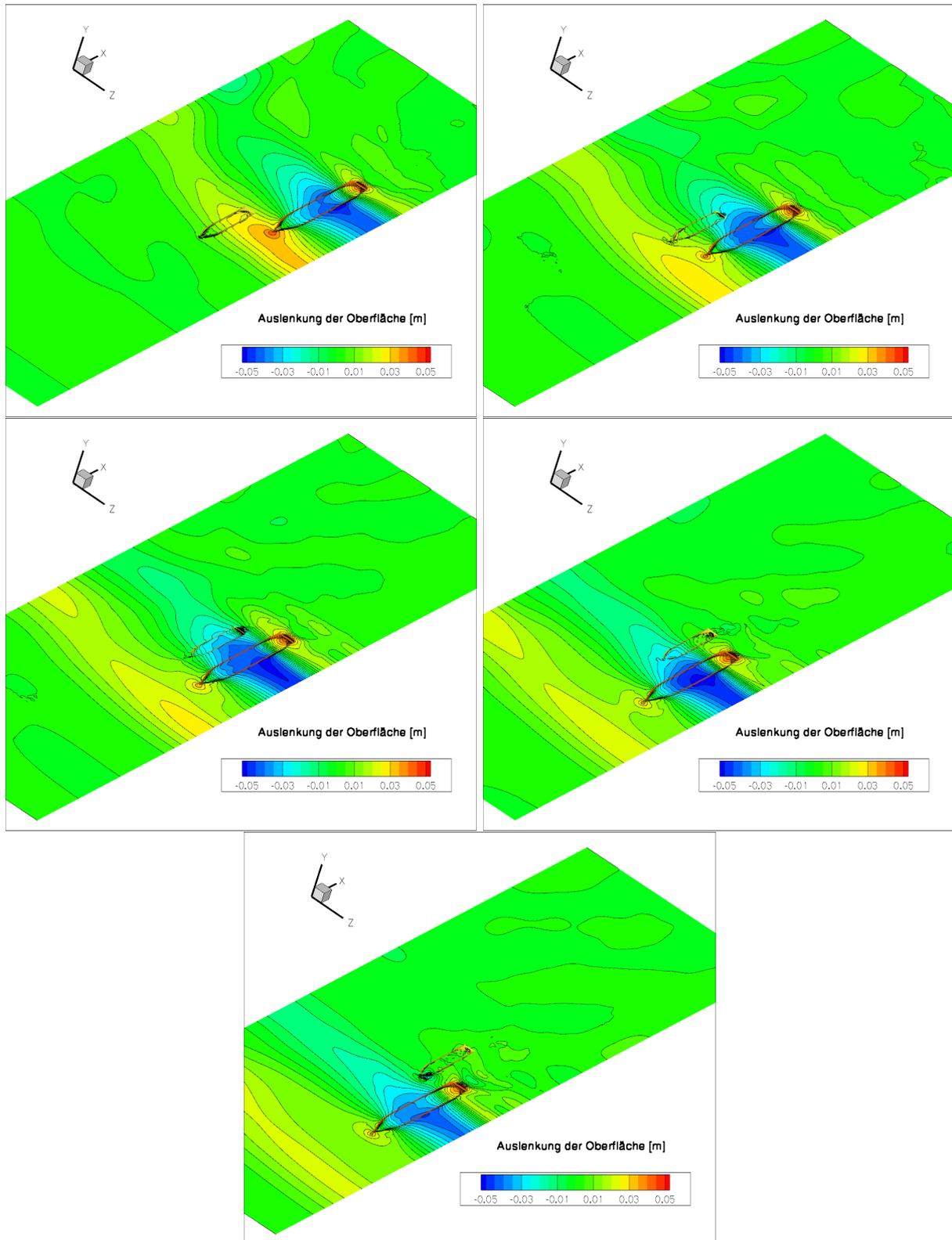


Abb. 8.16.: Das KCS passiert den Feeder mit einer Geschwindigkeit von 1,464 m/s während sich der Feeder mit einer Geschwindigkeit von 0,203 m/s bewegt. Die Auslenkung der Oberfläche ist in [m] als Farbverlauf dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Anfahrwelle des KCS erst nach dem Passiervorgang vollständig vom Bug entfernt.

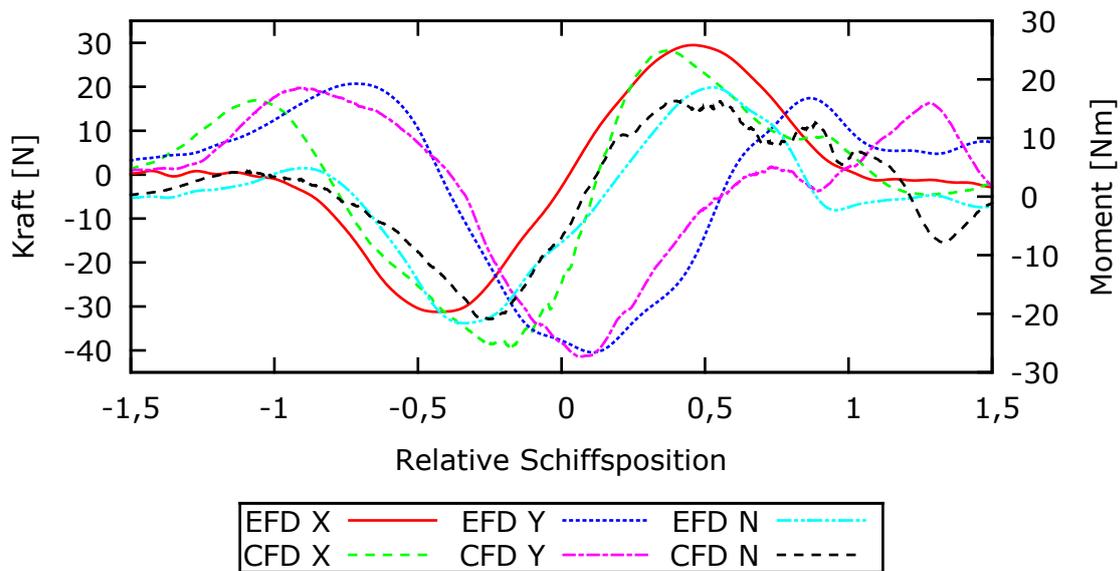


Abb. 8.17.: Längskräfte X, Querkräfte Y und Giermomente N aus Experiment und Simulation für den Feeder bei zwei bewegten Schiffgittern.

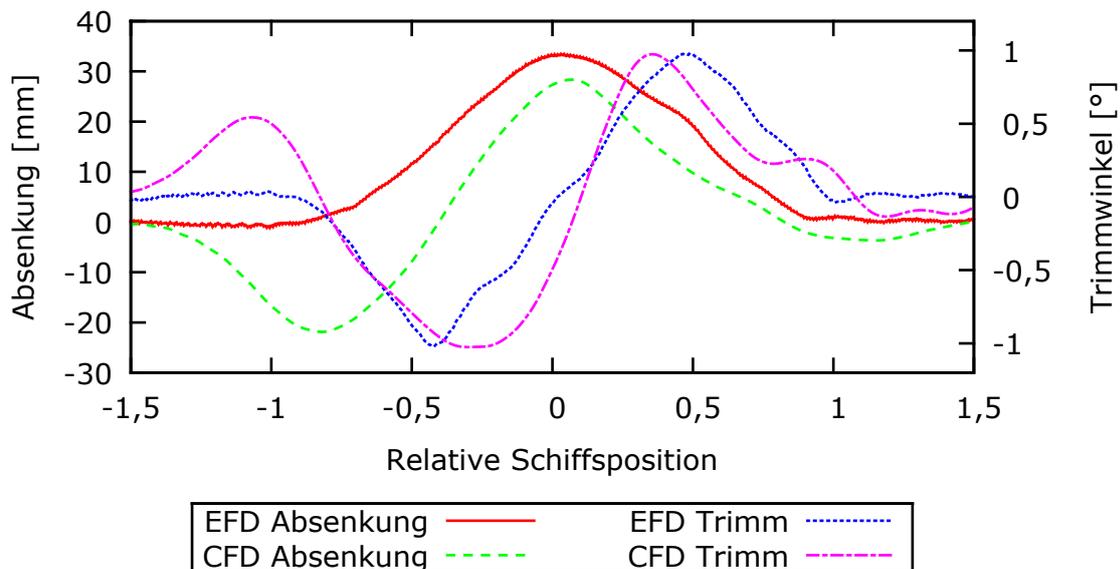


Abb. 8.18.: Absenkung und Trimmwinkel für den Feeder beim Überholen. Die Anfahrwelle des Überholers beeinflusst die dargestellte dynamische Schwimmlage des überholten Feeders deutlich.

8.5.2.2. Änderung der Simulationstechnik beim parallelen Passieren

Die Auswertung der Simulationen des Überholvorganges zeigte, dass die Anfahrwelle der Schiffe einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Aus diesem Grund wur-

de die Simulationstechnik verändert, mit dem Ziel, die Wirkung der Anfahrwelle bzw. die Anfahrwelle selbst zu verhindern. Es wurden ähnliche Passiervorgänge wie in 8.5.2.1 untersucht, jedoch wurden die Schiffsgeschwindigkeit des Feeders und die Simulationstechnik geändert. In dieser Simulation wird der Feeder stationär im Simulationsgebiet positioniert und mit der entgegengesetzten Schiffsgeschwindigkeit von 0,407 m/s (5 kn) angeströmt. Die Fahrt des Schiffes wird durch die Vorgabe der Schiffsgeschwindigkeit am Eintrittsrand des Lösungsgebietes realisiert. Die Abbildung 8.19 beinhaltet schematisch die Überlagerung der Geschwindigkeiten. Die Vorausgeschwindigkeit des KCS ergibt sich aus der Differenz der Schiffsgeschwindigkeiten zwischen KCS und Feeder. Wie schon im Abschnitt 8.5.1 beobachtet, genügt dies wahrscheinlich nicht, um die durch instantane Schiffsbewegung generierte Anfahrwelle zu reduzieren. Aus diesem Grund wurde die Simulation auf unterschiedlich langen Hintergrundgittern ausgeführt. Zum einen wurde das bisherige Gitter, Gitter 1, gewählt und das KCS von der bisherigen Position gestartet. Zwei weitere Gitter wurden generiert und der Abstand in Längsrichtung zwischen dem Feeder und dem KCS wurde um eine halbe (Gitter 2) bzw. zwei (Gitter 3) Schiffslängen des KCS vergrößert. In der Abbildung 8.20 ist der Verlauf der Absenkung auf den unterschiedlichen Gittern und im Experiment dargestellt. Die Abbildung 8.21 stellt analoges für den Trimmwinkel des Feeders dar. Mit größer werdendem Abstand zwischen den Schiffen kann der Effekt durch die Anfahrwelle deutlich reduziert werden, Abbildung 8.22.



Abb. 8.19.: Überlagerung der Schiffsgeschwindigkeiten mit der Anströmgeschwindigkeit des Feeders beim parallelen Passieren.

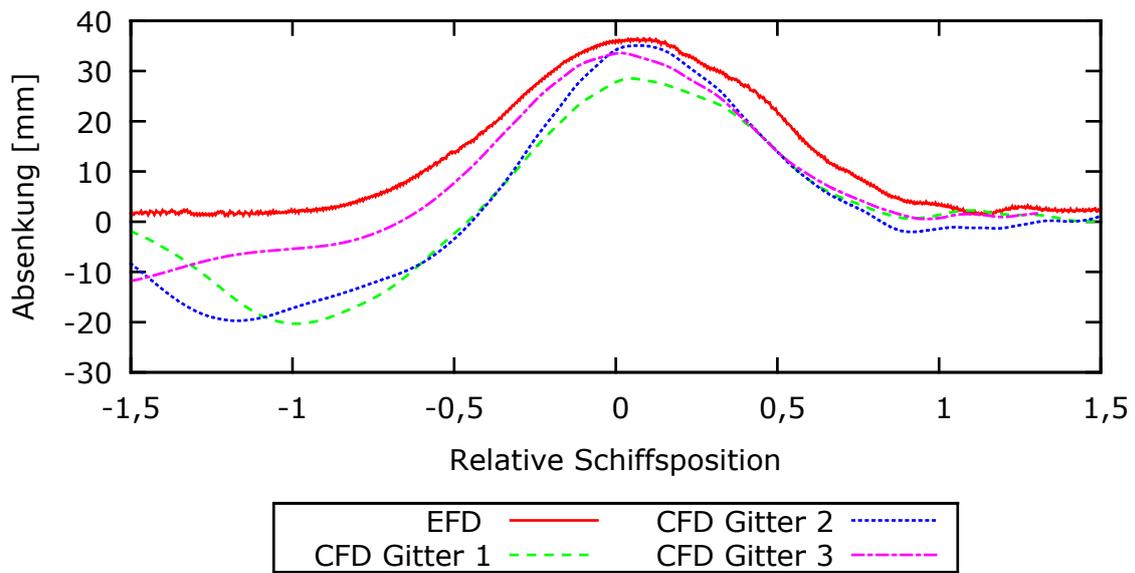


Abb. 8.20.: Absenkung des Feeders auf unterschiedlich langen Simulationsgebieten.

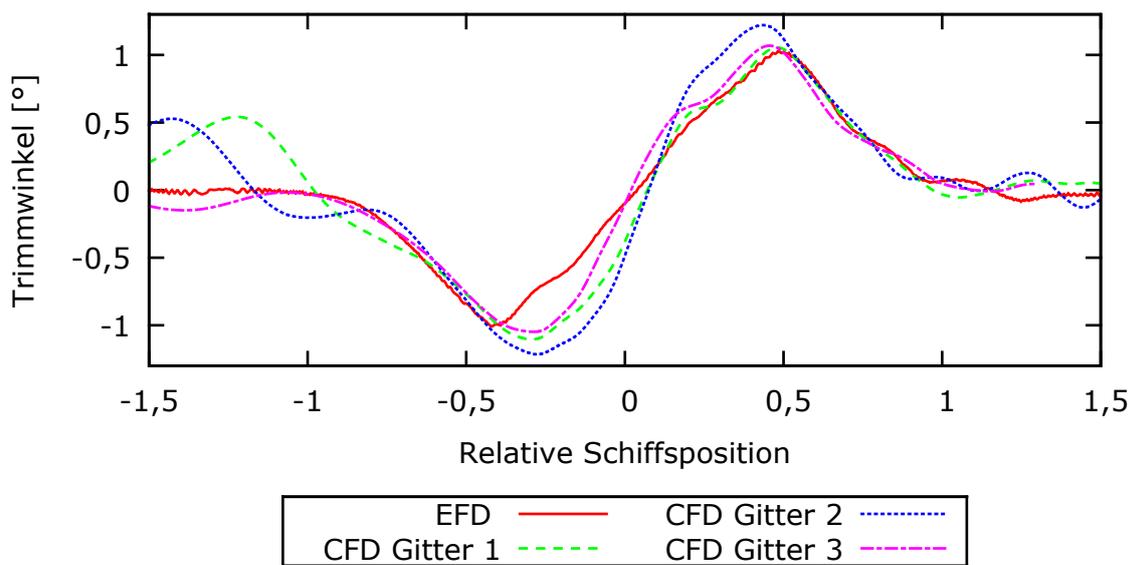


Abb. 8.21.: Trimmwinkel des Feeders auf unterschiedlich langen Simulationsgebieten.

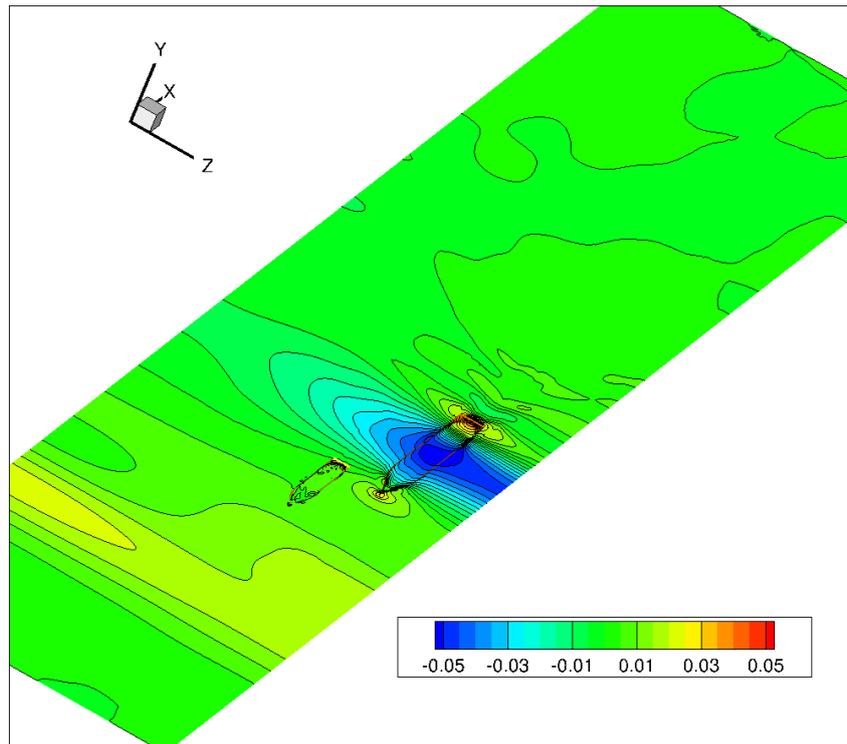


Abb. 8.22.: Auslenkung der Oberfläche beim Passieren des Feeders in einem verlängerten Simulationsgebiet mit Differenzgeschwindigkeit.

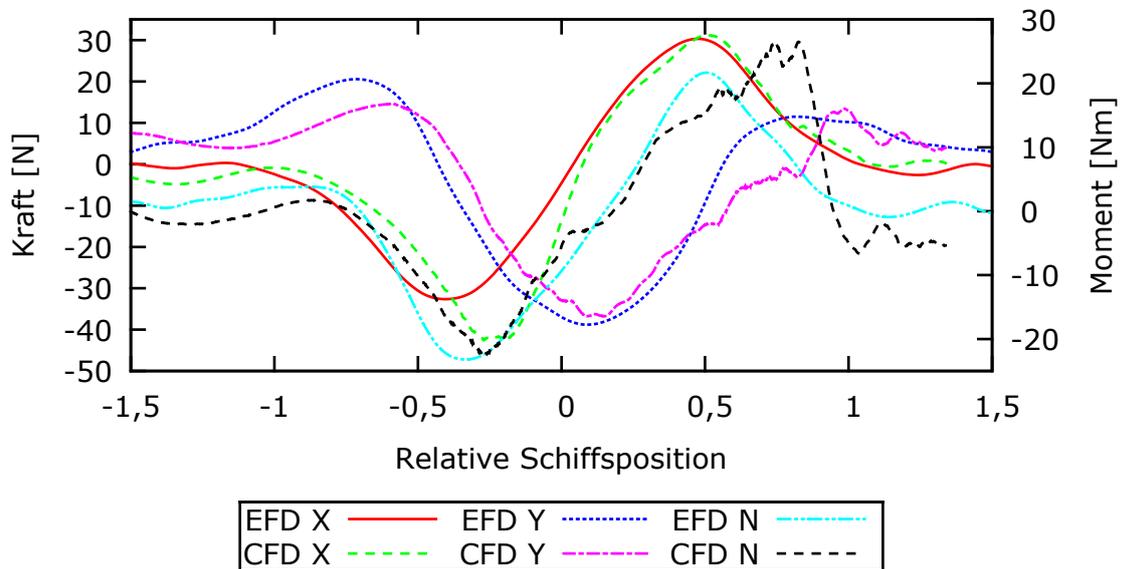


Abb. 8.23.: Längskräfte X, Querkräfte Y und Giermomente N aus Experiment und Simulation für den Feeder beim Passiervorgang mit Differenzgeschwindigkeit auf dem verlängerten Gitter 3.

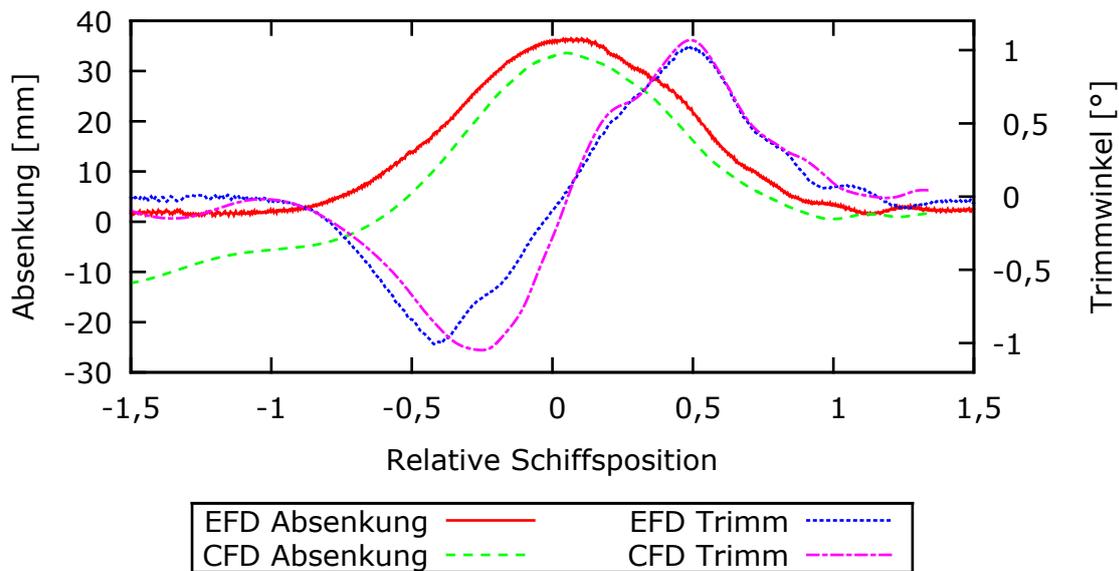


Abb. 8.24.: Absenkung und Trimmwinkel am Feeder beim Überholen. Der Einfluss der Anfahrwelle des Überholers auf die dynamische Schwimmelage des Feeders wurde durch das verlängerte Simulationsgebiet reduziert.

Die Kräfte und das Giermoment in der Simulation auf dem Gitter 3 werden mit den experimentellen Daten verglichen, Abbildung 8.23. Die Verlängerung des Simulationsgebietes verbessert die Übereinstimmung zwischen der Simulation und dem Experiment deutlich. In der Abbildung 8.24 sind die Verläufe der Absenkung und des Trimmwinkels im Vergleich zum Experiment dargestellt. Der Verlauf des Trimmwinkels zeigt sehr gute Übereinstimmung im Vergleich zum Experiment. Die Absenkung des Schiffes zu Beginn des Passiervorgangs konnte durch die numerischen Maßnahmen deutlich verbessert werden und zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment. Insgesamt approximieren die numerischen Simulationen auf dem, um zwei KCS-Längen, verlängerten Simulationsgebiet die experimentellen Ergebnisse deutlich besser. Dies wird durch einen stark erhöhten numerischen Aufwand erreicht. Zur weiteren Verbesserung der Ergebnisse müsste das Simulationsgebiet noch weiter verlängert werden. Dadurch wird der numerische Aufwand jedoch erheblich erhöht.

8.5.2.3. Überholvorgang mit geänderter Geschwindigkeitsüberlagerung

Der Ansatz, die Simulationstechnik wie im Abschnitt 8.5.2.2 auf Seite 70 zu verändern, setzt eine Vergrößerung des Rechengbietes voraus. Der damit verbundene erhöhte Simulationsaufwand, bezogen auf Speicher und Rechenzeit, erschwert die Realisierung von parametrischen Untersuchungen. Aus diesem Grund wurde nach weiteren

Ansätzen zur Verbesserung der Simulationstechnik gesucht. Bei dem vorherigen Ansatz erfolgte die Definition der Schiffsgeschwindigkeit für jedes Schiff unterschiedlich. Für Schiff 1 wurde die Geschwindigkeit am Einströmrand vorgegeben und für Schiff 2 ergab sich die Geschwindigkeit aus der Differenz der Geschwindigkeit am Einströmrand und der im Bewegungsmodell definierten Geschwindigkeit. Die Auswahl, auf welche Art ein Schiff seine Fortschrittsgeschwindigkeit aufgeprägt bekam, erfolgte beliebig. Untersuchungen haben gezeigt, dass es notwendig ist, die Geschwindigkeitsdefinition für beide Schiffe so zu wählen, dass der Einfluss des mit dem Bewegungsmodell definierten Schiffes so gering wie möglich ist. Da das Containerschiff (KCS) durch seine Größe räumlich einen sehr großen Einfluss auf das umgebende Wasser besitzt, wird nun statt dem KCS der Feeder bewegt. Dazu wird wieder eine Geschwindigkeitsüberlagerung durchgeführt, Abbildung 8.25, diesmal jedoch mit der Anströmgeschwindigkeit des KCS. Der rote Pfeil gibt die Bewegungsrichtung des Feeders an. Des Weiteren wird das Simulationsgebiet stark verkürzt, auf ca. dreieinhalb Schiffslängen des KCS. In einem ersten Schritt wird nun eine stationäre Lösung bestimmt. Dabei werden die Schiffe so positioniert, dass dies einer Situation kurz vor dem eigentlichen Passiervorgang entspricht, Abbildung 8.26. Die stationäre Lösung wurde für eine Wassertiefe von 0,475 m berechnet. Die Geschwindigkeit des KCS betrug 1,464 m/s und die Geschwindigkeit des Feeders 0,976 m/s. Im Gegensatz zu den bisherigen Simulationen musste ein neues Bewegungsmodell für den Feeder entwickelt werden. Das Feederschiff kann frei trimmt und abgesenkt werden. Die Geschwindigkeit wird über das Bewegungsmodell realisiert. Zur Bestimmung der stationären Lösung muss die Wirkung der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen dem Feeder und dem KCS berücksichtigt werden, obwohl sich das Schiffsgitter des Feeders nicht entgegen der Anströmung bewegt. Die Bewegung durch die Gewichtskraft und das Moment um die Querachse sind jedoch frei. Die Weiterentwicklungen ermöglichen jetzt, dass das Containerschiff ebenfalls eine dynamische Schwimmlagenveränderung erfahren kann. Im zweiten Schritt, der Simulation des eigentlichen Überholvorganges, wird das Bewegungsmodell des Feeders dadurch geändert, dass er sich jetzt entsprechend der Differenzgeschwindigkeit parallel zum KCS bewegt.

Der Vergleich der gemessenen und der simulierten Verläufe für die Kräfte und Momente am Feeder ist in Abbildung 8.27 dargestellt. Die Abbildung 8.28 beinhaltet den Vergleich der Verläufe der Absenkung und des Trimmwinkels. Die verbesserte Übereinstimmung der simulierten und der gemessenen Werte konnte durch die Veränderung der Simulationstechnik erreicht werden. Durch den Wechsel der Simulationsmethoden, von stationär auf instationär, zeigt sich eine geringe Abweichung im Trimmwinkelverlauf

bei $t_r = -1,2$. Im Bereich $0,5 < t_r < 1,0$ werden die Kräfte, das Moment, die Absenkung und der Trimm etwas unterschätzt, der charakteristische Verlauf wird jedoch weiterhin gut wiedergegeben.

Sowohl für den Feeder als auch für das KCS wurde die dynamische Schwimmelage bestimmt. In den Abbildungen 8.29 und 8.30 werden die Längskraft, die Querkraft, das Giermoment, die Absenkung und der Trimm für das KCS und den Feeder über der relativen Schiffposition dargestellt. Während die Kräfte und das Giermoment auf das KCS durch den Passiervorgang beeinflusst werden, bleiben Absenkung und Trimmwinkel nahezu unbeeinflusst.

Bei dieser Simulation wurde der Einfluss einer Anfahrwelle durch instantane Bewegung völlig eliminiert. Es müssen dazu jedoch zwei Simulationen durchgeführt werden. Eine Simulation zur Bestimmung einer stationären Lösung und eine weitere für den eigentlichen Passiervorgang.



Abb. 8.25.: Überlagerung der Schiffsgeschwindigkeiten mit der Anströmgeschwindigkeit des KCS von 1,464 m/s. Der rote Pfeil zeigt die Bewegungsrichtung des Feeders in der Simulation.

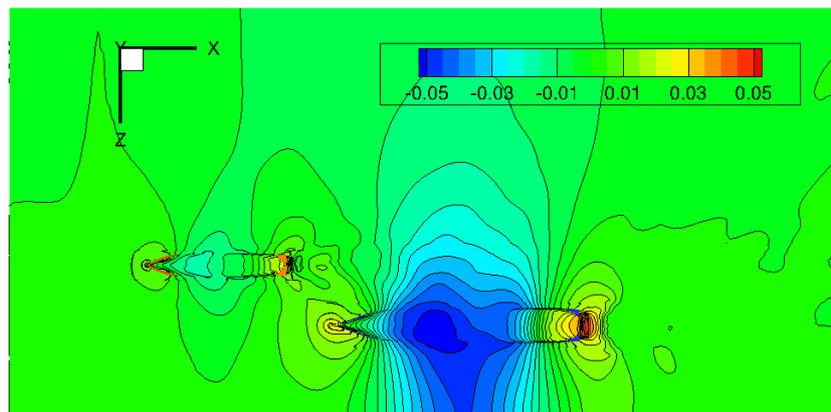


Abb. 8.26.: Stationäre Lösung als Initialisierung für den Überholvorgang.

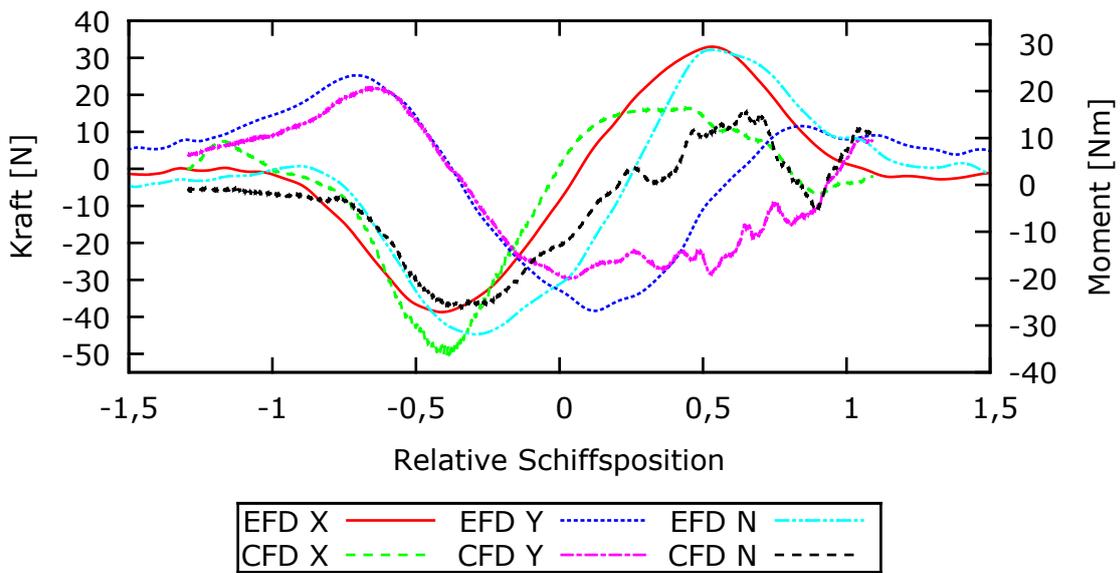


Abb. 8.27.: Längskräfte X, Querkräfte Y und Giermomente N aus Experiment und Simulation für den Feeder beim Passiervorgang mit Differenzgeschwindigkeit.

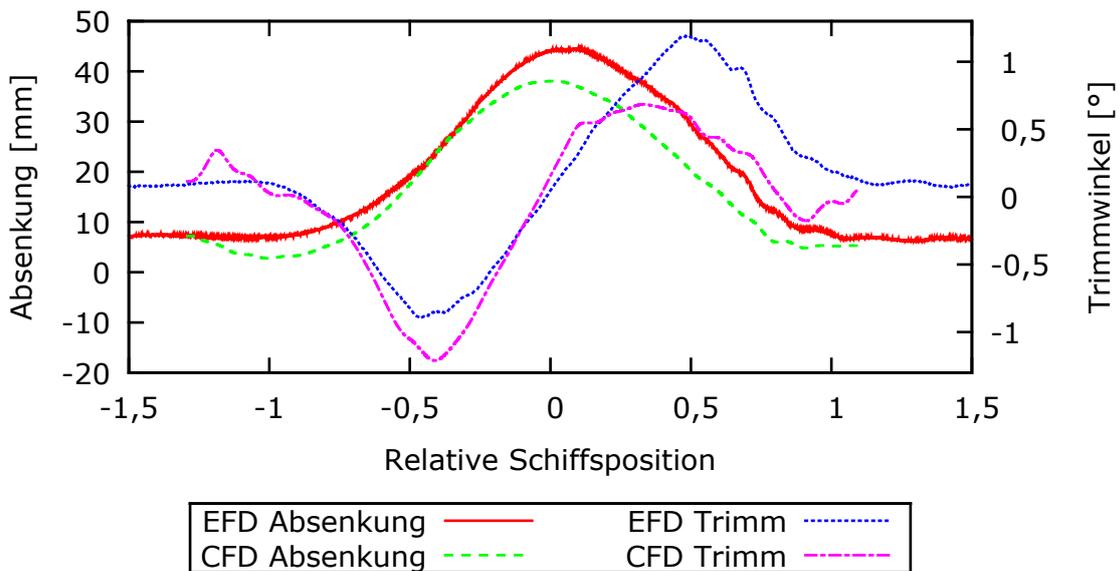


Abb. 8.28.: Absenkung und Trimmwinkel aus Experiment und Simulation für den Feeder. Das Modell des Feeders fährt mit einer Geschwindigkeit von 0,976 m/s.

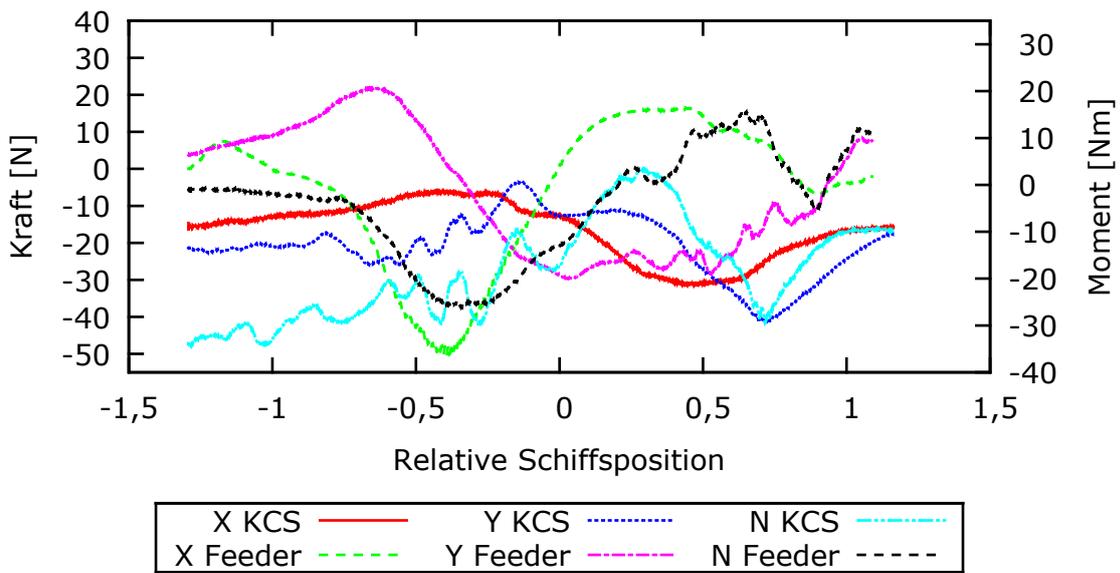


Abb. 8.29.: Längskräfte X, Querkräfte Y und Giermomente N aus der Simulation am Feeder und am KCS.

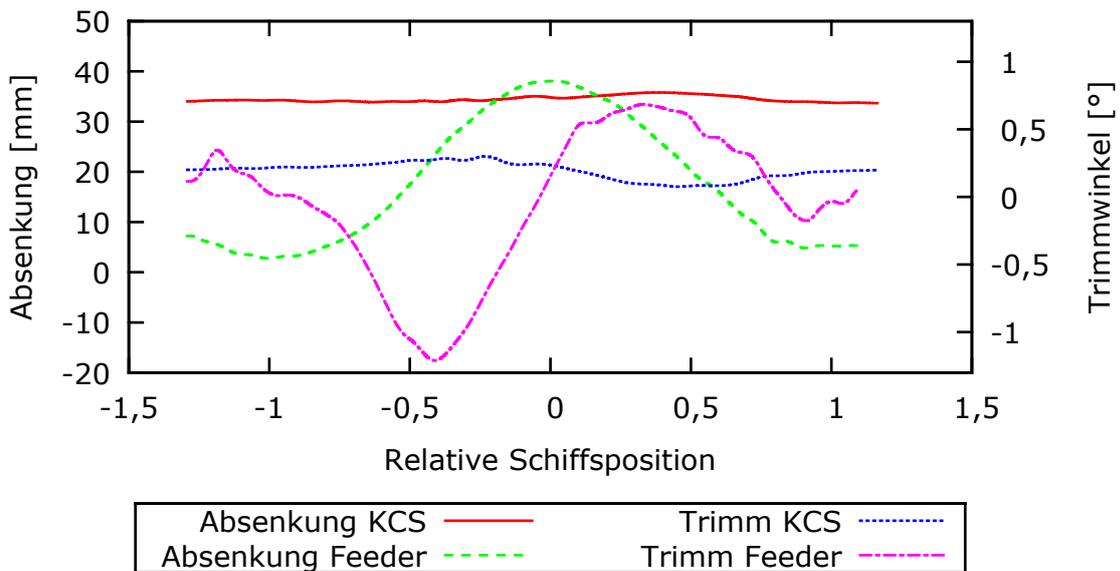


Abb. 8.30.: Absenkung und Trimmwinkel aus der Simulation am Feeder und am KCS.

8.5.3. Simulationen zur Untersuchung des Schrägpasrierens

Unter Schrägpasrieren werden hier Passiervorgänge zwischen zwei Schiffen verstanden, deren Bewegungstrajektorien sich in einem beliebigen Winkel kreuzen. Die experimentelle Untersuchung solcher Situationen ist im Flachwassertank des DST wegen der limitierten Breite des Versuchstanks nur schwer oder gar nicht durchzuführen.

Zur Entwicklung eines mathematischen Kräfte Modells, Teil IV, welches die Interaktion beim Passieren auch für Schiffe mit verschiedenen Kurswinkeln beschreibt, wurden numerische Untersuchungen durchgeführt. Basierend auf einem empirischen Ansatz werden Situationen des Schrägpasrierens auf parallele Situationen zurückgeführt. Dieser Ansatz wurde mit den numerischen Simulationen überprüft und verbessert. Dies ist ein mehrstufiger Prozess, der an einem Beispiel exemplarisch vorgestellt wird.

In einem ersten Schritt wurden Simulationen zum parallelen Passieren durchgeführt. Daran anschließend erfolgten Simulationen zum Schrägpasrieren. Im dritten Schritt wird ein Zusammenhang zwischen den parallelen und schrägen Passierfahrten hergestellt. In allen folgenden Simulationen bewegt sich das Panmax Schiff KCS mit einer Geschwindigkeit von 1,464 m/s (18 kn) und passiert den Feeder, welcher mit einer Geschwindigkeit von 0,732 m/s (9 kn) fährt. Die Wassertiefe beträgt 0,475 m (19 m). Für den Feeder wurden Absenkung und Trimm, für das KCS die Absenkung berücksichtigt.

8.5.3.1. Modellierung des Simulationsgebietes

Die anstehenden Simulationen werden immer mit den gleichen Gittern für das KCS und den Feeder durchgeführt. Ebenso wird für alle Simulationen das gleiche Hintergrundgitter genutzt. Die Größe des Simulationsgebietes beträgt in Längsrichtung 5,5 und in der Breite 3,5 Schiffslängen des KCS. Abbildung 8.31 zeigt die verwendeten Gitter mit einer typischen Positionierung der Schiffsgitter während eines Passiervorgangs.

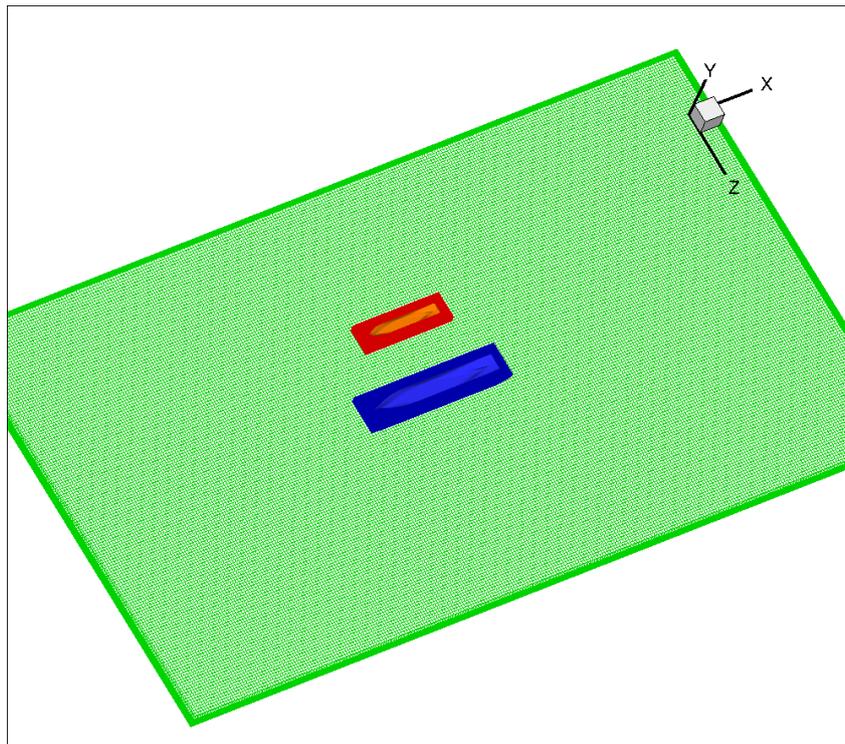


Abb. 8.31.: Genutzte Gitter zur Untersuchung des Schrägpassierens.

Wie in Abschnitt 8.5.2.3 beschrieben, wird das KCS mit der entgegengesetzten Fahrgeschwindigkeit angeströmt. Die Geschwindigkeit des Feeders wird mit dieser Anströmgeschwindigkeit überlagert und man erhält die Geschwindigkeit, mit der sich der Feeder durch das Simulationsgebiet bewegt. Für das KCS wurde vorab eine stationäre Lösung unter Berücksichtigung seiner Absenkung berechnet. Diese wird als Initialisierung für den Passiervorgang genutzt.

Anschließend wurde der Feeder in diese stationäre Lösung eingesetzt und instantan bewegt. Für den Feeder wurden die Absenkung und der Trimm berücksichtigt.

8.5.3.2. Paralleles Passieren: Erster Schritt

Unter den oben genannten Bedingungen wurden parallele Passiervorgänge bei lichten Abständen von 0,8 m, 0,9 m, 1,0 m, 1,1 m, 1,2 m, 1,5 m, 2,0 m, 2,5 m und 3,0 m (Modellmaßstab) durchgeführt. Zu einer relativen Schiffposition von ca. $t_r = 0$ zeigt der Farbverlauf in den Abbildungen 8.32 und 8.33 die Auslenkung der freien Oberfläche bei verschiedenen Passierabständen.

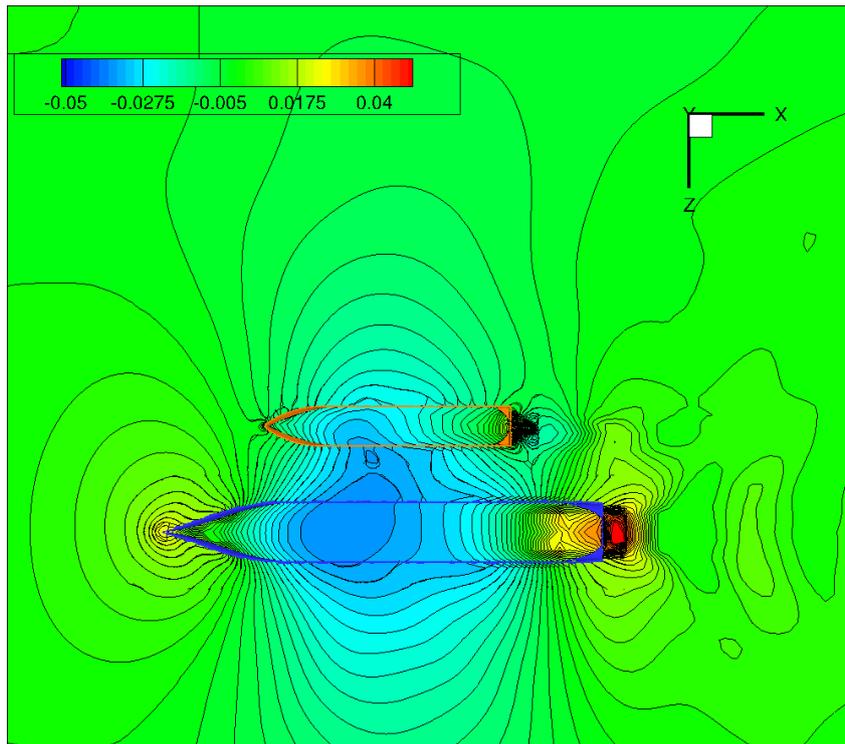


Abb. 8.32.: Auslenkung der Oberfläche bei einem parallelen Passierabstand von 0,8 m.

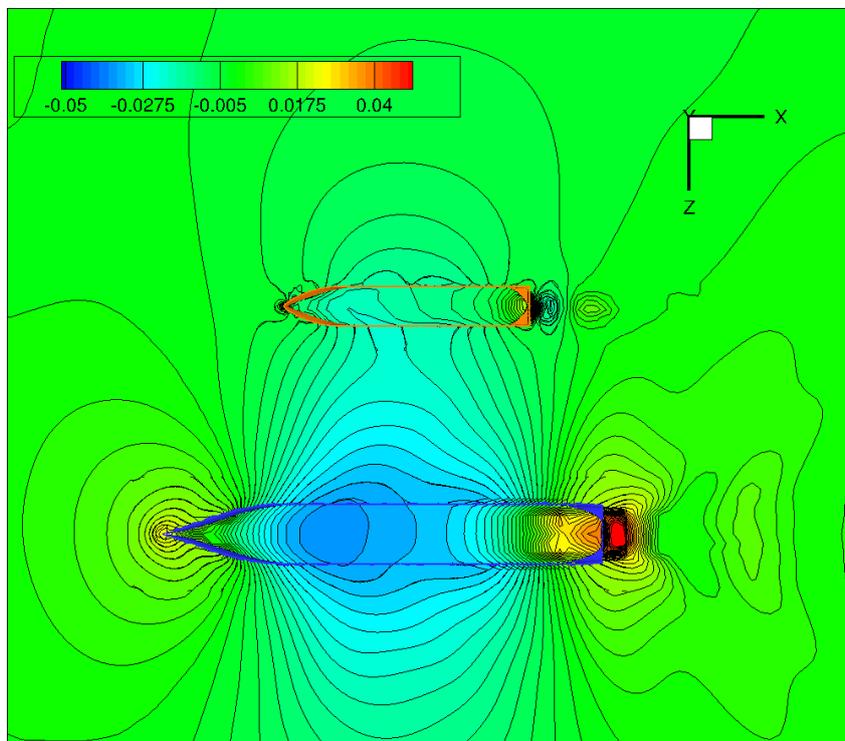


Abb. 8.33.: Auslenkung der Oberfläche bei einem parallelen Passierabstand von 2,5 m.

Die Abbildungen 8.34 bis 8.37 zeigen die Verläufe der Seitenkräfte, des Giermomentes, der Absenkung und des Trimmwinkels bei den unterschiedlichen Passierabständen über der relativen Schiffposition. Mit zunehmendem Abstand zwischen den Schiffen reduziert sich der Einfluss des KCS auf den Feeder. Im Bereich der relativen Schiffposition $0,5 < t_r < 1,0$ schwanken Giermoment und Querkraft im Gegensatz zu den anderen Bereichen stark. In dieser Position befindet sich der Feeder im Heckwellensystem des KCS.

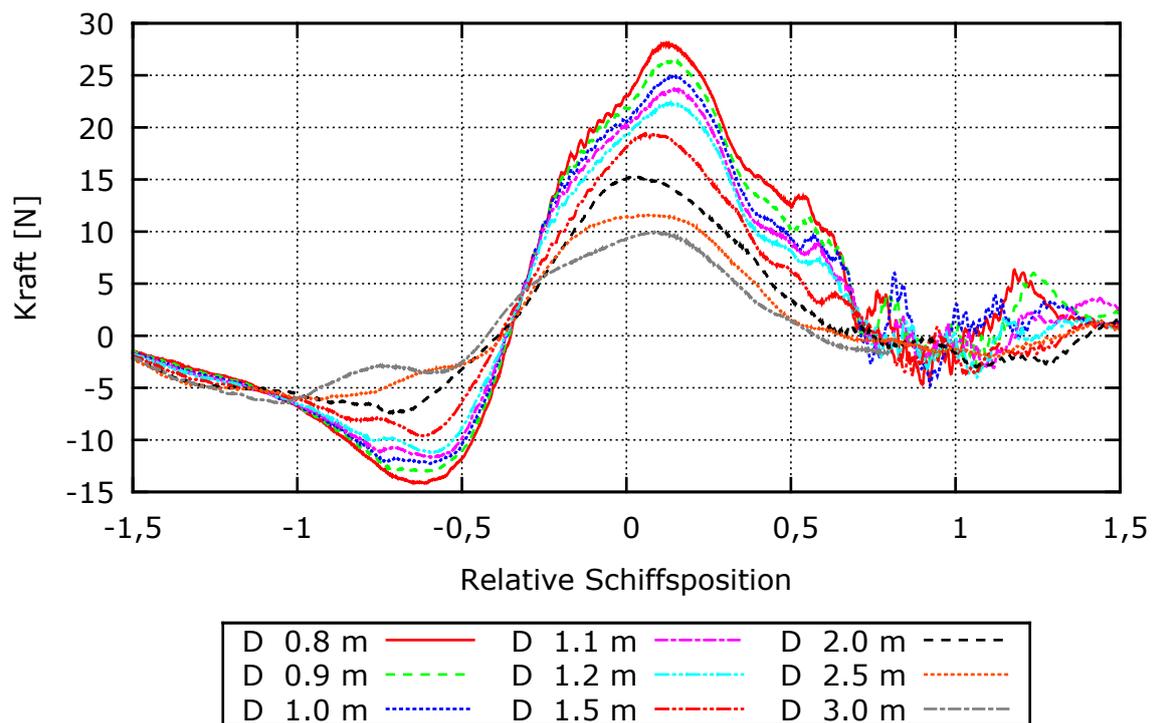


Abb. 8.34.: Querkraft am Feeder bei unterschiedlichen parallelen Passierabständen.

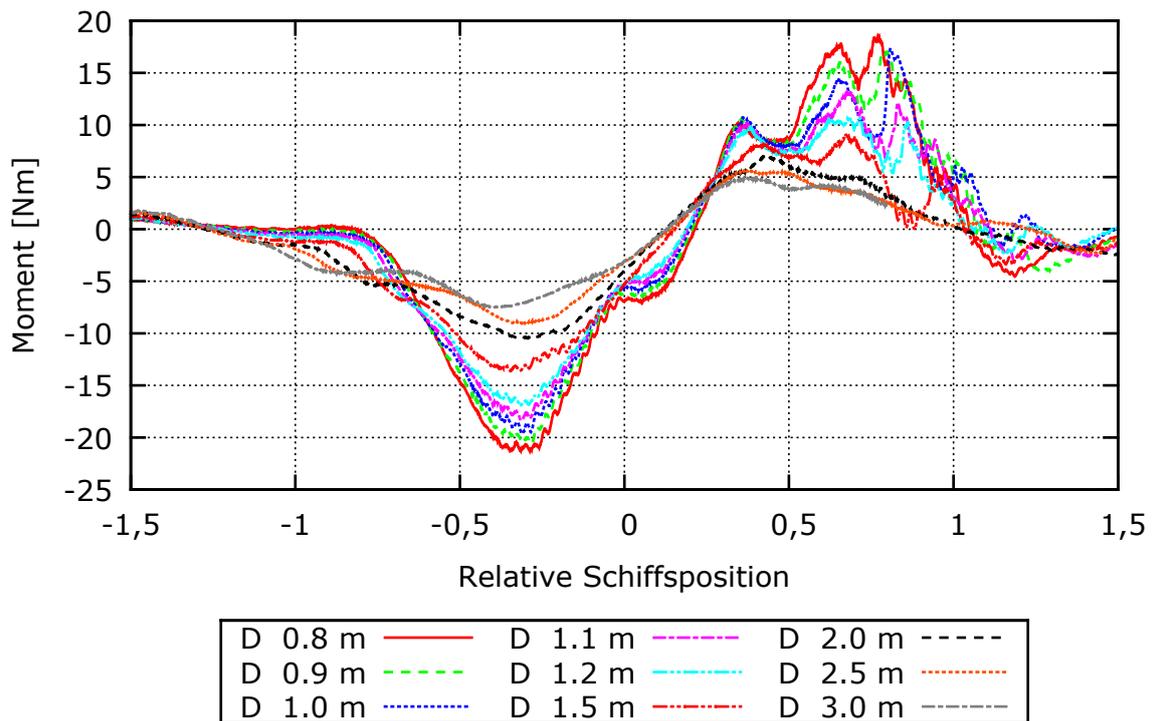


Abb. 8.35.: Giermoment am Feeder bei unterschiedlichen parallelen Passierabständen.

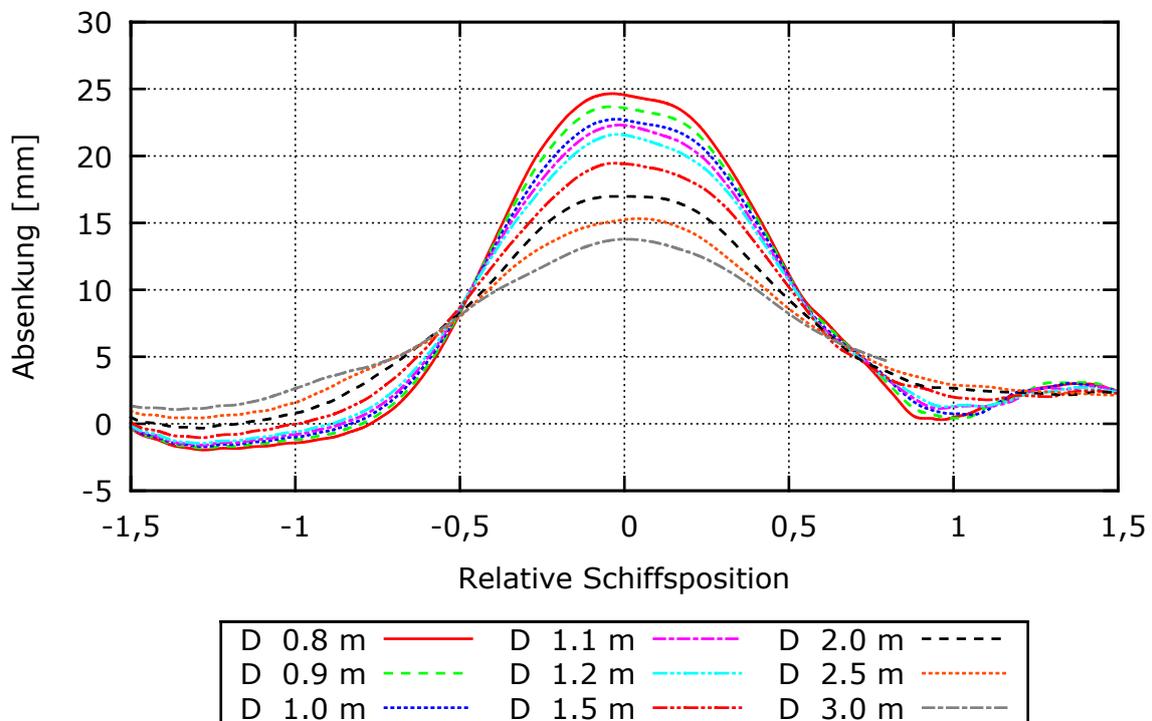


Abb. 8.36.: Absenkung am Feeder bei unterschiedlichen parallelen Passierabständen.

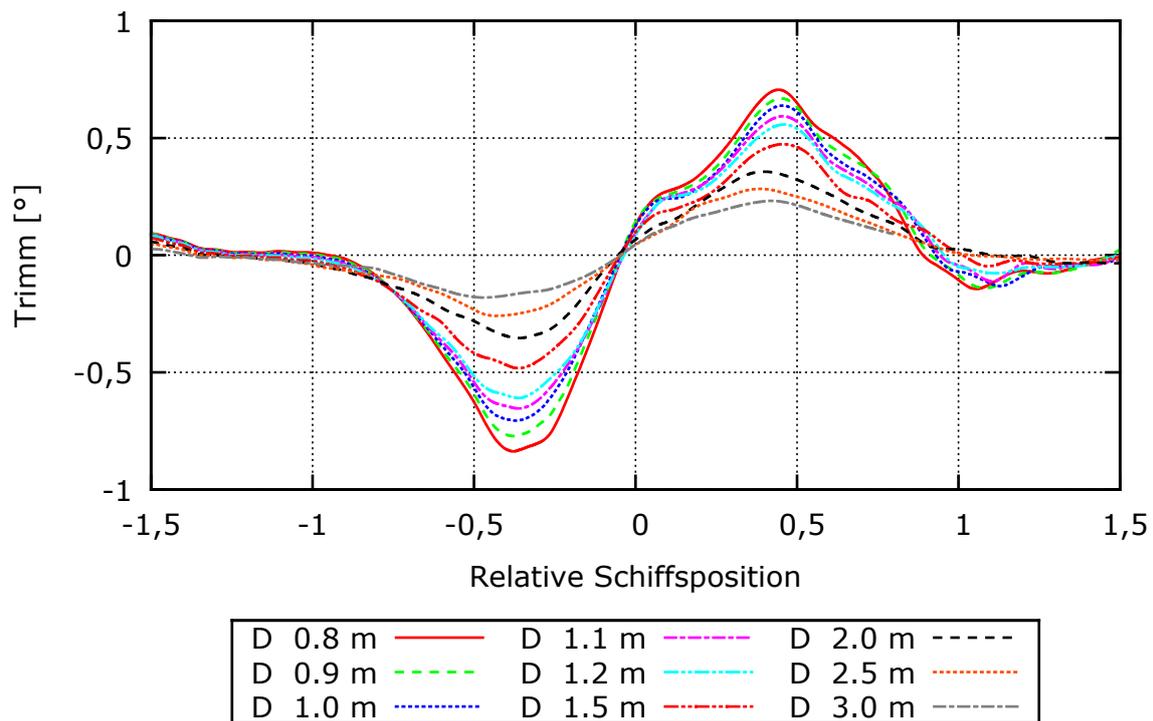


Abb. 8.37.: Trimmwinkel am Feeder bei unterschiedlichen parallelen Passierabständen.

Insgesamt zeigen die Verläufe für Querkraft, Giermoment und Trimmwinkel einen plausiblen Verlauf. Eine Ausnahme bildet die Absenkung. Im Bereich einer relativen Schiffposition von $t_r = -1,0$ zeigen einige Simulationen eine leichte Austauchung des Feeders. Diese leichte Austauchung ist sowohl der instantanen Bewegung des Feeders geschuldet, als auch einer Störung in der stationären Startlösung. Abbildung 8.38 stellt sowohl die Startposition des Feeders zu Beginn der Simulation, als auch diese Störung in Form einer lokal erhöhten freien Oberfläche der Startlösung dar. Insgesamt ist die Kombination dieser Einflüsse aber gering. Speziell die Seitenkraft und das Giermoment reagieren auf diesen Effekt nicht.

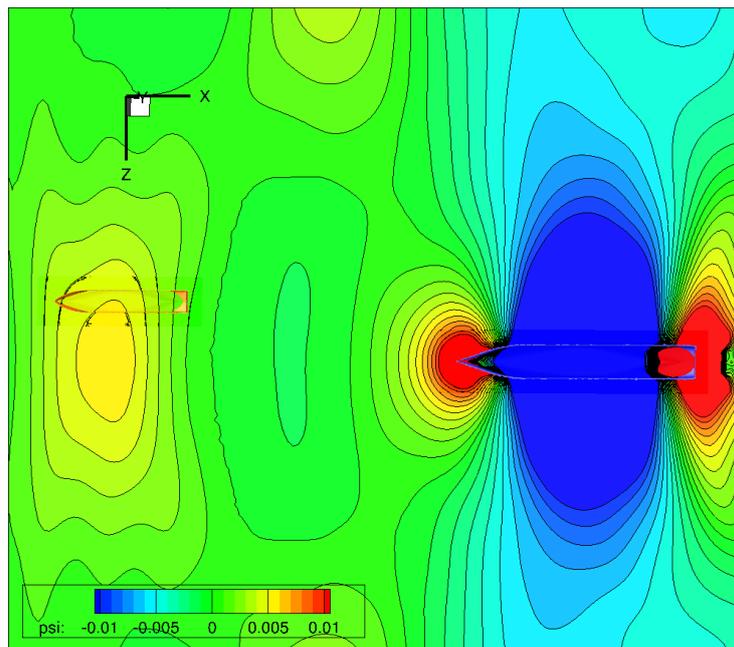


Abb. 8.38.: Darstellung der Auslenkung der freien Oberfläche in der Startlösung als Farbverlauf. Der Feeder wird in einem Bereich einer erhöhten freien Oberfläche in diese Lösung für die Umströmung des KCS eingesetzt.

8.5.3.3. Schrägpässieren: Zweiter Schritt

Unter den gleichen Strömungsbedingungen wie bei den parallelen Passiervorgängen wurden Simulationen zum Schrägpässieren unter einem Winkel von 30° durchgeführt. Eine typische Startposition des Feeders im Hintergrundgitter zeigt Abbildung 8.39. Auch im Falle des Schrägpässierens wird der Feeder in die stationäre Lösung eingesetzt und instantan bewegt. Die Gittergeschwindigkeit seines Netzes wird wieder durch Überlagerung der Anströmgeschwindigkeit des KCS bestimmt. Diese vektorielle Addition veranschaulicht Abbildung 8.40. Der rote Pfeil kennzeichnet die resultierende Gittergeschwindigkeit des Feeders.

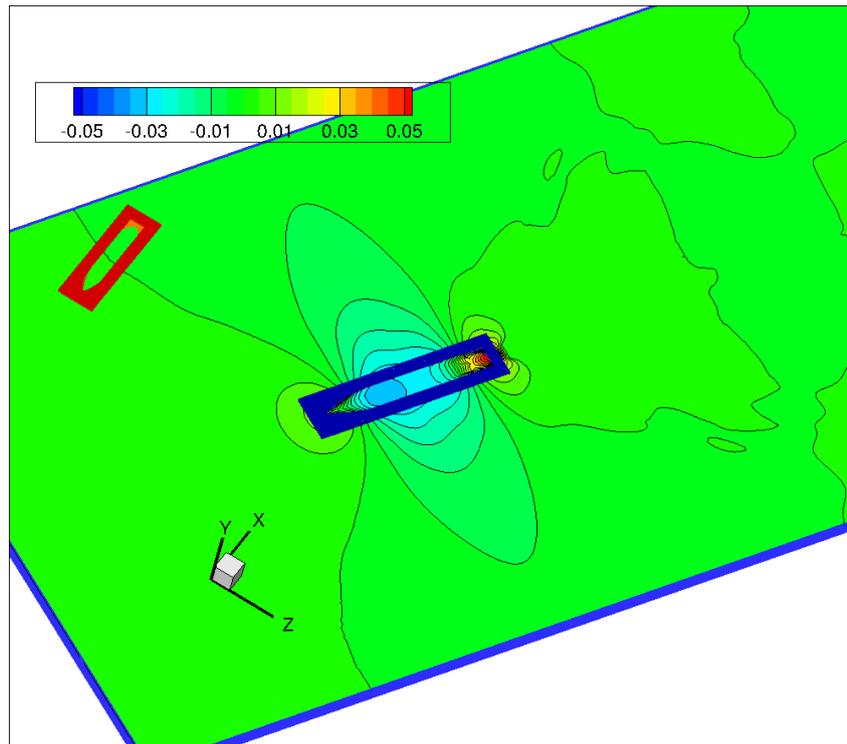


Abb. 8.39.: Simulationsgebiet und Positionierung der Gitter sowie die stationäre Startlösung.

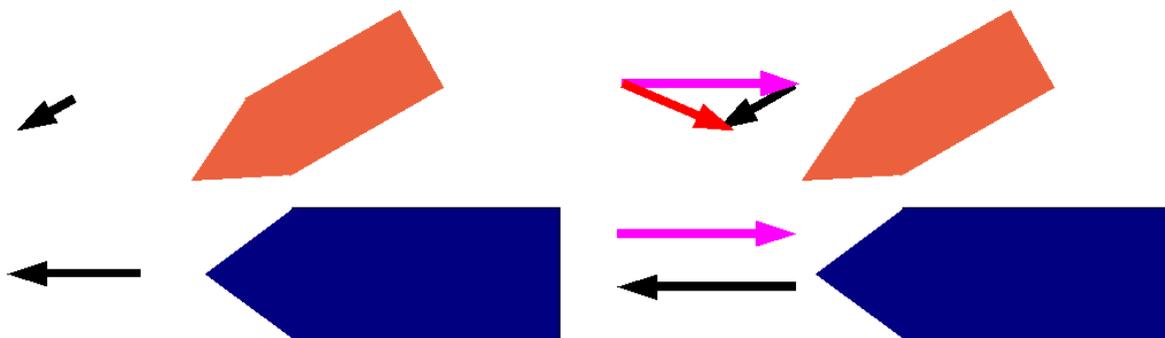


Abb. 8.40.: Überlagerte Geschwindigkeit des Feeders (roter Pfeil) mit der Anströmgeschwindigkeit des KCS beim Schrägpassieren.

Die Auslenkung der freien Oberfläche und die Position des Feeders zu unterschiedlichen Zeitpunkten eines schrägen Passiervorgangs sind in Abbildung 8.41 dargestellt. Der lichte Abstand beim Schrägpassieren wird bestimmt, indem das Eigenschiff, also das Schiff, auf das die Wirkung des anderen betrachtet wird, um seine Hochachse auf den Kurs des anderen Schiffes gedreht wird. In der dargestellten Situation wird also der Feeder um 30° nach Steuerbord rotiert, woraufhin der lichte Abstand zwischen den Bordwänden bestimmt wird. Zum gleichen lichten Abstand zwischen Feeder und KCS

sind in der Abbildung 8.42 die Schiffspeditionen und die Auslenkung der freien Oberfläche dargestellt.

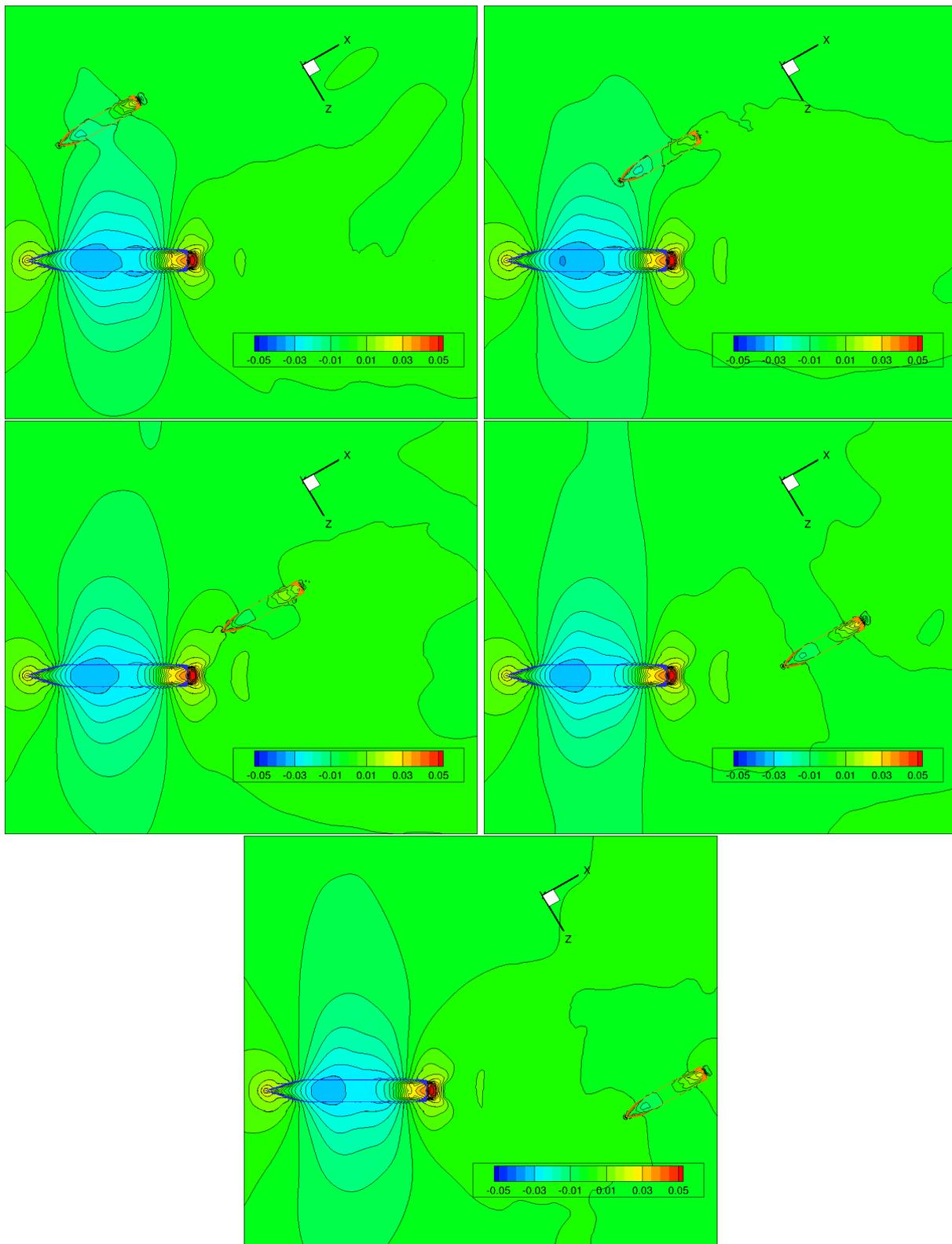


Abb. 8.41.: Auslenkung der Oberfläche zu unterschiedlichen Zeitpunkten des Schrägpassierens.

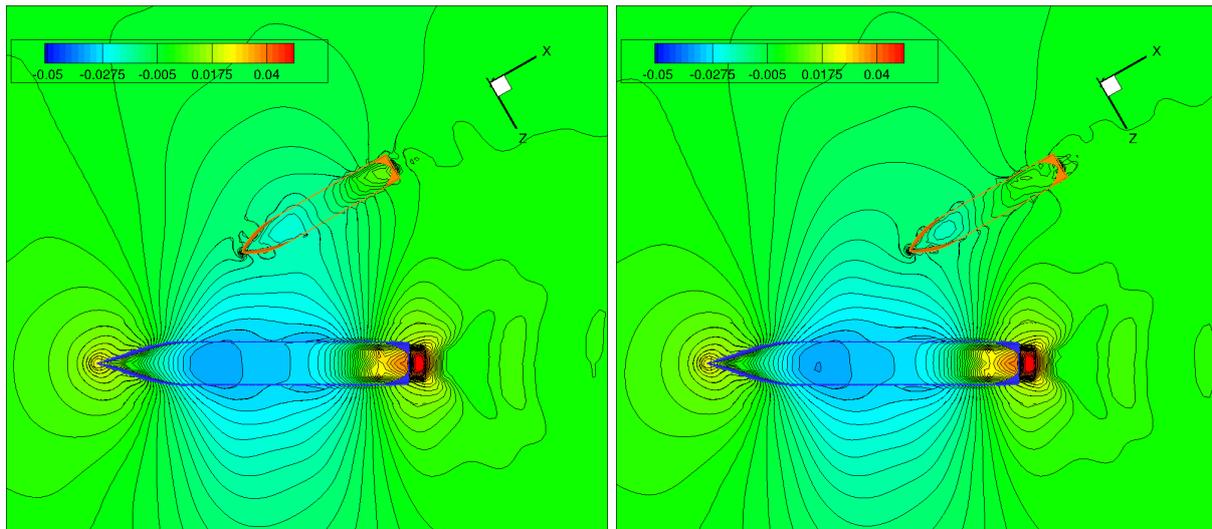


Abb. 8.42.: Auslenkung der freien Oberfläche bei gleichem lichten Abstand des Feeders zum KCS aus unterschiedlichen Passiervorgängen.

8.5.3.4. Modellierungsansatz: Dritter Schritt

Nachdem die zuvor beschriebenen Simulationen durchgeführt und ausgewertet wurden, werden die Schrägpassiervorgänge anhand des in Kapitel IV näher beschriebenen Ansatzes in parallele Überholmanöver transformiert. Der Vergleich der Interaktionseffekte erlaubt daraufhin eine Beurteilung der Zulässigkeit des gewählten Ansatzes. Zu jeder parallelen Passierfahrt werden die Schnittpunkte der Trajektorien des Feeders aus den schrägen Passierfahrten bestimmt. Abbildung 8.43 zeigt die Skizze eines solchen Rasters.

Die in der schrägen Passierfahrt auf den Feeder wirkende Längs- und Querkraft wird in ein um 30° gedrehtes Koordinatensystem transformiert. So können sie mit den Kräften aus der parallelen Passierfahrt verglichen werden. Die Abbildungen 8.44 bis 8.46 stellen diesen Bezug für die Längskraft, die Querkraft und das Giermoment eines parallelen Passiervorgangs mit den transformierten Kenngrößen an den Schnittpunkten der Trajektorien dar.

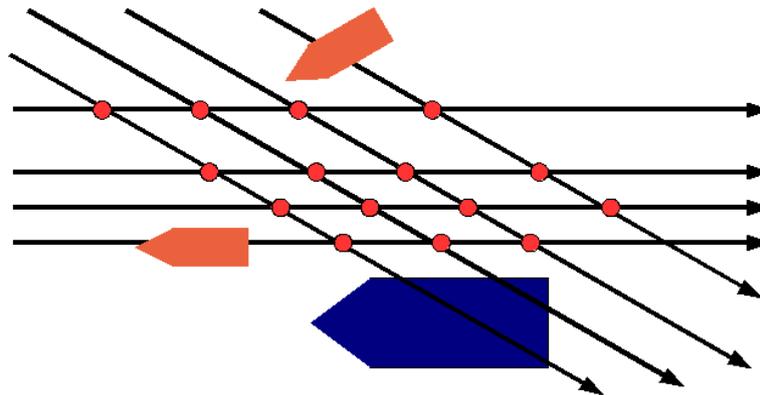


Abb. 8.43.: Skizze der Trajektorienschnittpunkte zwischen parallelen und schrägen Simulationen.

Während der Feeder sich durch das Primärwellental des KCS bewegt, $-0,5 < t_r < 0,5$, ist das in den schrägen Passierfahrten bestimmte Giermoment größer als in der parallelen Passierfahrt. Dies gilt nicht ganz so ausgeprägt auch für die transformierte Längskraft. Hier stößt der Modellierungsansatz an seine Grenzen da Bug und Heck des Feeders sich in unterschiedlich starken Einflusszonen des Überholers befinden. Die Charakteristik der Wirkungen wird jedoch wiedergegeben, so dass die Modellierung für die Verwendung in den Simulatoren geeignet scheint. Die transformierte Querkraft der schrägen Passierfahrten stimmt mit der Seitenkraft aus der parallelen Passierfahrt hervorragend überein.

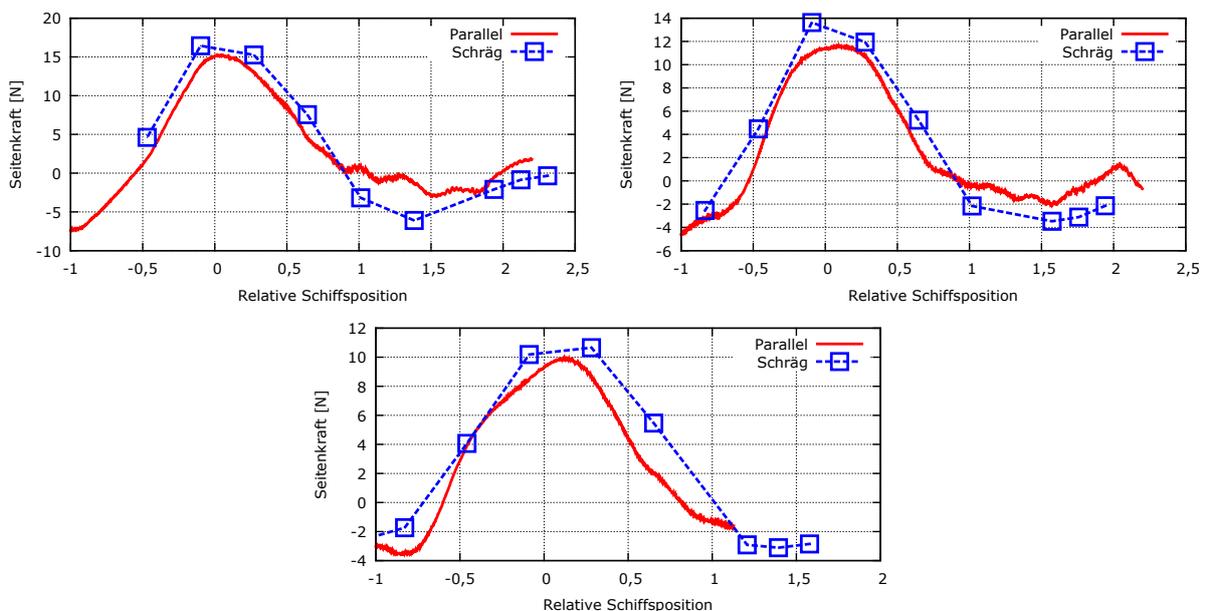


Abb. 8.44.: Vergleich der Querkräfte am Feeder zwischen parallelem und schrägem Passieren für die lichten Abstände von 2,0 m (oben rechts), 2,5 m (oben links) und 3,0 m (unten).

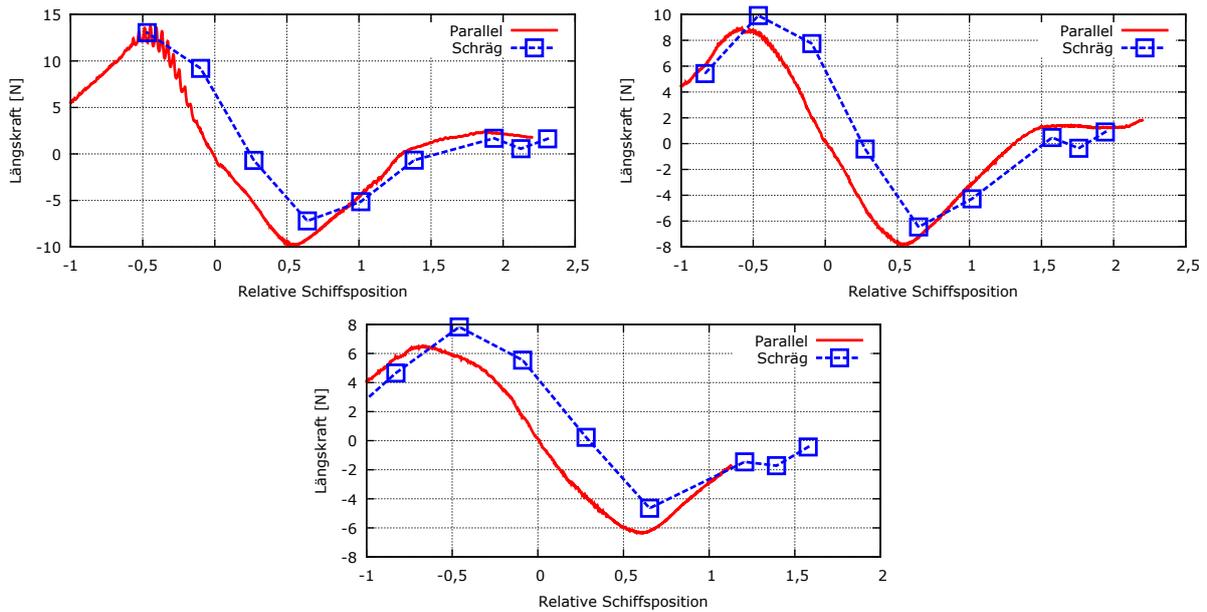


Abb. 8.45.: Vergleich der Längskräfte am Feeder zwischen parallelem und schrägem Passieren für die lichten Abstände von 2,0 m (oben rechts), 2,5 m (oben links) und 3,0 m (unten).

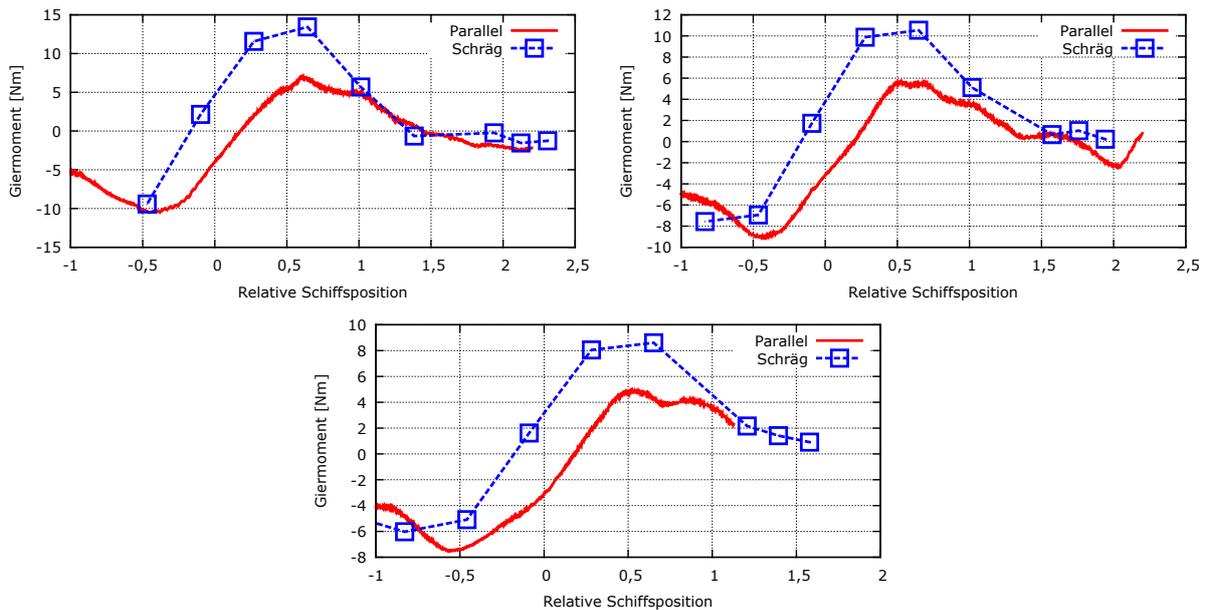


Abb. 8.46.: Vergleich des Giermomentes am Feeder zwischen parallelem und schrägem Passieren für die lichten Abstände von 2,0 m (oben rechts), 2,5 m (oben links) und 3,0 m (unten).

Das vorgestellte dreistufige Verfahren wurde angewendet, um die Datenbasis für die mathematische Modellierung zu ergänzen. Zusätzlich wurden die gewonnenen Erkenntnisse genutzt, einen Zusammenhang zwischen parallelem und schrägem Passieren herzustellen.

8.5.4. Paralleles Passieren und Surf Riding

Während der Passierversuche wurde das Modell meist mit konstanter Geschwindigkeit geschleppt und die auf das Modell wirkenden Kräfte in Längs- und Querrichtung wurden in der Verbindung zum Schleppwagen gemessen. Passiert ein großes Schiff, wie der KCS, ein kleineres, wie den Feeder, lässt sich so ein Längskraftverlauf mit erheblicher Amplitude messen. In der Realität beeinflussen diese Kräfte direkt die Vorausgeschwindigkeit des Feeders. Er wird aufgrund der auf ihn wirkenden Kräfte in einem Überholvorgang zunächst abgebremst und später beschleunigt. Zur Berücksichtigung dieser Wirkung wird in den folgenden Simulationen das Bewegungsmodell des Feeders angepasst. Neben den Freiheitsgraden für die dynamische Schwimmelage wird ein weiterer translatorischer Freiheitsgrad zugelassen, welcher die Änderung der Geschwindigkeit infolge der in Fahrtrichtung wirkenden Kräfte zulässt.

Das KCS, dessen Absenkung berücksichtigt wird, passiert den Feeder in einem lichten Abstand von 1,25 m (50 m) mit einer Geschwindigkeit von 0,813 m/s (10 kn). Die Geschwindigkeit des Feeders beträgt 0,569 m/s (7 kn). Zu einer Situation kurz vor dem Passiervorgang wurde wie in 8.5.2.3 eine stationäre Lösung bestimmt. Von dieser stationären Lösung ausgehend wurden drei Simulationen durchgeführt und miteinander verglichen. Als Referenzsimulation wurde der Feeder mit geführter Geschwindigkeit und Berücksichtigung der dynamischen Schwimmelage passiert. Für den Feeder musste in einer separaten Simulation der Schub approximiert werden, der ihn in einer Einzelfahrt auf der vorgegebenen Geschwindigkeit hält. Da in diesen Berechnungen der Schwerpunkt auf der Funktionalität des modifizierten Bewegungsmodells lag, wurde die Viskosität des Fluids vernachlässigt, so dass dieser Selbstpropulsionspunkt nicht dem des Modellversuchs entspricht.

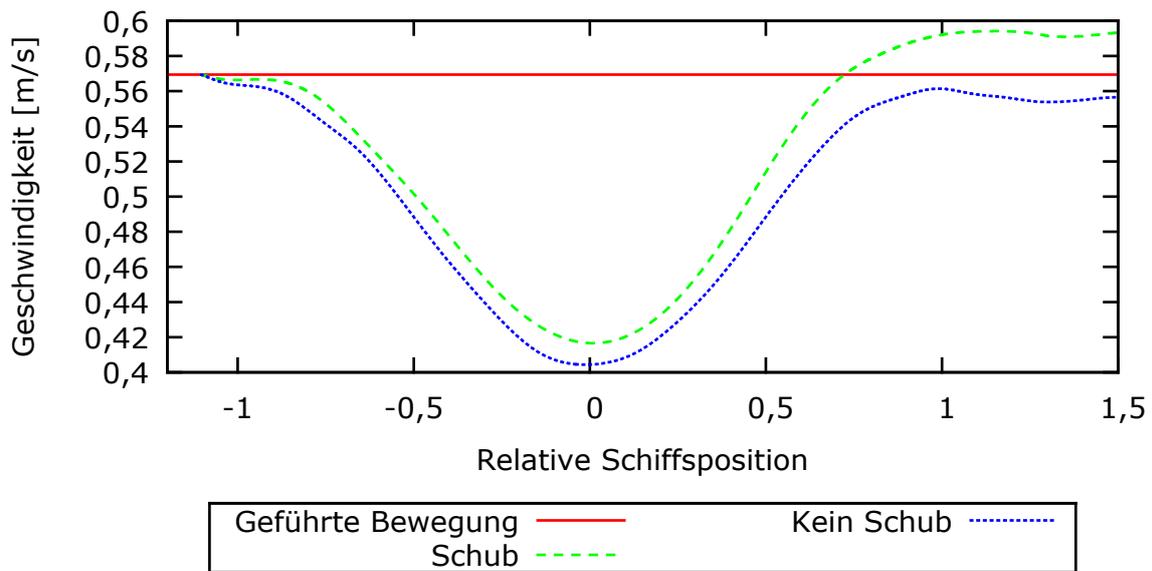


Abb. 8.47.: Geschwindigkeitsänderung aufgrund des Krafteinflusses beim Passieren.

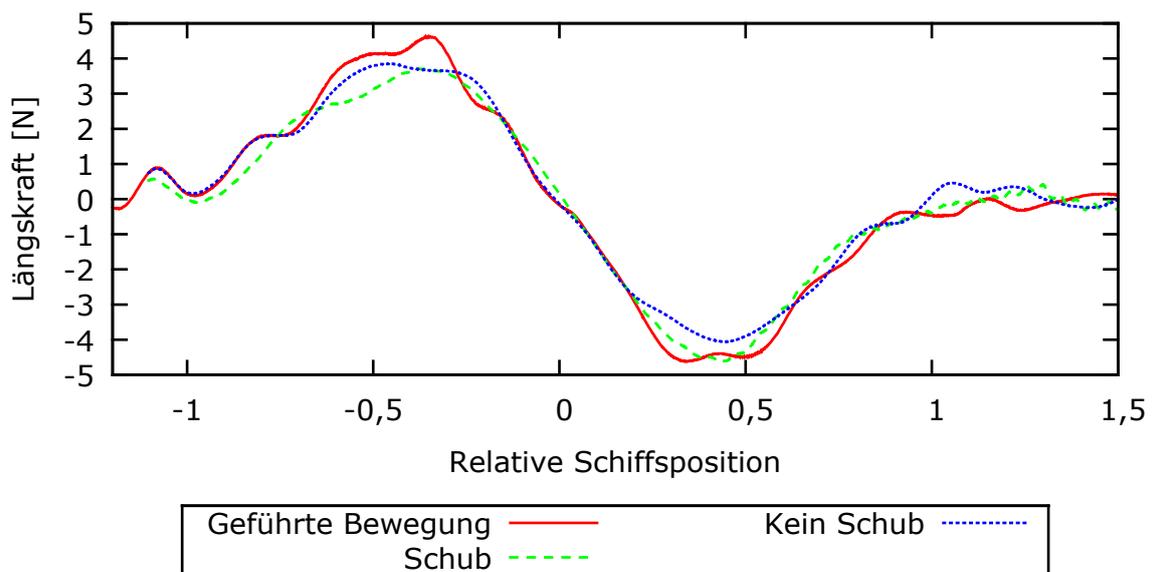


Abb. 8.48.: Änderung der Längskraft durch Krafteinfluss beim Passieren.

Es werden dazu zwei Simulationen durchgeführt, eine Simulation ohne Schub und eine mit einem Schub, basierend auf der Simulation zur Bestimmung des numerischen Selbstpropulsionspunkts.

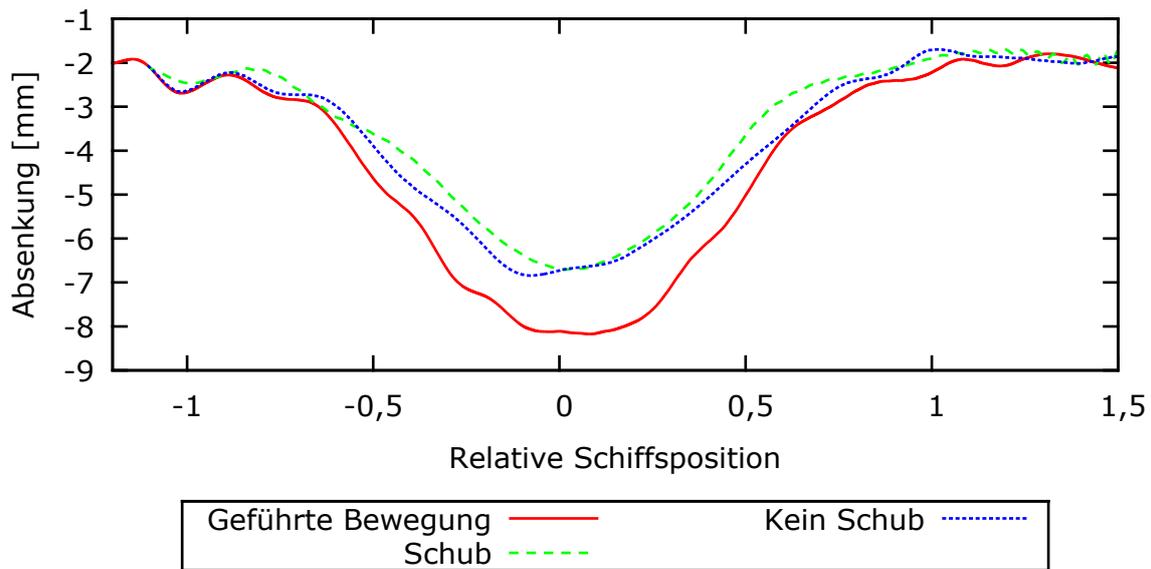


Abb. 8.49.: Änderung der Absenkung durch Kräfteinfluss beim Passieren.

Die Fahrtgeschwindigkeit des Feeders wird mit dem neuem Bewegungsmodell während des Passierens stark beeinflusst, Abbildung 8.47. Der Feeder verringert beim Eintritt in das Primärwellensystem des KCS seine Geschwindigkeit bis zur Position $t_r = 0$. Anschließend vergrößert sich die Geschwindigkeit wieder, bis er ungefähr zur Position $0,8 < t_r < 1,0$ eine maximale Geschwindigkeit erreicht. Im Anschluss daran verringert sich die Geschwindigkeit wieder etwas. Dieser hier nicht besonders stark ausgeprägte Effekt der erhöhten Geschwindigkeit wird als Surf Riding bezeichnet. Dass die Ausgangsgeschwindigkeit nicht erreicht wurde, ist dem nicht exakt eingestellten Schub geschuldet. Die maximalen Kräfte für die Simulationen mit dem modifizierten Bewegungsmodell liegen unterhalb von denen der Referenzsimulation (Abbildung 8.48). Die Absenkung verändert sich in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Feeders (Abbildung 8.49).

In der Phase dieser erhöhten Geschwindigkeit wird von Nautikern gelegentlich eine reduzierte Ruderwirksamkeit beschrieben [11]. Um diesen Effekt zu erklären, wird häufig eine in Fahrtrichtung des Überholers gerichtete Strömungskomponente vermutet. Diese würde sowohl die verringerte Anströmgeschwindigkeit und damit Wirksamkeit des Ruders, als auch eine Beschleunigung des Schiffes erklären. Abbildung 8.50 zeigt die längsgerichtete Geschwindigkeitskomponente der Strömung relativ zum KCS als Contourplot für die Position $t_r = 0,8$. Es zeigt sich eine durch den Feeder fast unbeeinflusste Verdrängungsströmung um das KCS. Lediglich im Bugstau ist eine kleine Zone mit negativen, also in Fahrtrichtung gerichteten, Strömungsgeschwindigkeiten zu erkennen.

Der Feeder befindet sich also eher in einem Bereich erhöhter Anströmgeschwindigkeit, so dass dieser Erklärungsansatz für die reduzierte Steuerfähigkeit und die erhöhte Vorausgeschwindigkeit nicht bestätigt werden kann. Die Wasserspiegelauslenkung des Primärwellensystems ist ein Effekt, der durch die vom Schiff erzeugten Übergeschwindigkeiten hervorgerufen wird. Es liegt auch an der durch den Heckstau erzeugten, wellenähnlichen Erhebung der freien Oberfläche keine in Laufrichtung weisende Orbitalströmung vor. Die Beschleunigung ist daher offenbar nahezu ausschließlich auf die Hangabtriebskraft an der geneigten Wasseroberfläche zurückzuführen.

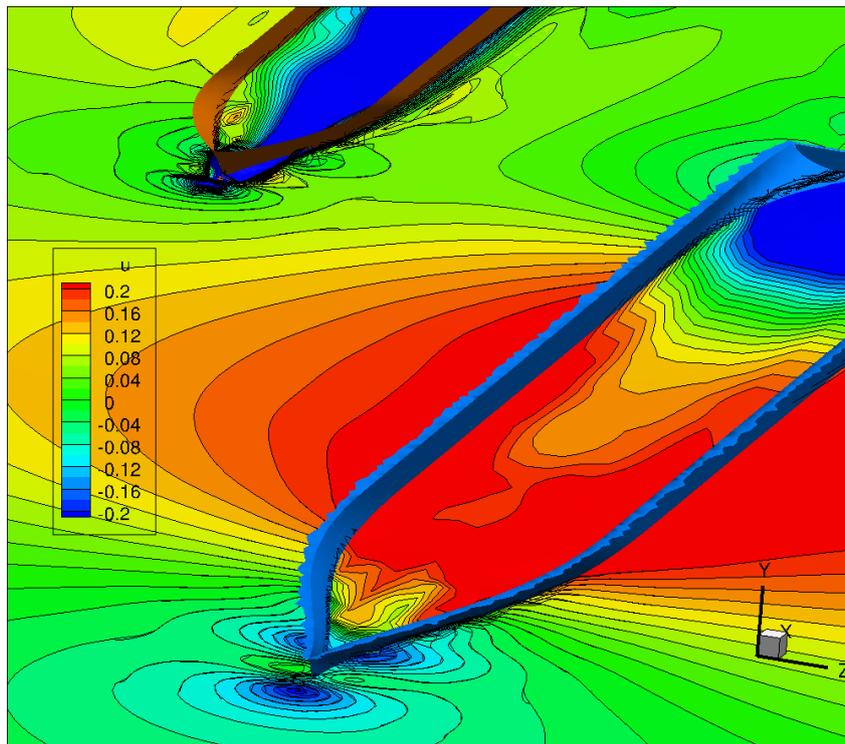


Abb. 8.50.: Verteilung der Geschwindigkeit in Längsrichtung an der freien Oberfläche als Farbverlauf. Es zeigt sich fast im gesamten Umfeld des KCS eine entgegen der Fahrtrichtung laufende Verdrängungsströmung.

Mit dem modifizierten Bewegungsmodell verhält sich der Feeder wie im frei gefahrenen Versuch. Wegen der vorgenommenen Einschränkungen ist ein direkter Vergleich jedoch nicht möglich. Das Bewegungsmodell ist jedoch geeignet, die Rückwirkung der Strömung auf ein Schiff zu beschreiben. Zusätzlich ist durch die numerischen Methoden ein detaillierter Einblick in die Strömungsverhältnisse möglich, die experimentell nur sehr aufwändig oder gar nicht großflächig erfassbar sind.

9. Ergänzende Untersuchungen mit Ansys-CFX

Durch numerische Berechnungen soll der in Kapitel 5.2 auf Seite 27 beschriebene Einfluss der Propellerdrehrate und der Schiffsgeschwindigkeit auf die Ruderwirkung näher untersucht werden. Bei entsprechender Validierung dieser Methode zur Berechnung der Ruderkraft, können die Modellversuche durch Berechnungsverfahren ergänzt werden und die Datenbasis für die mathematische Modellbildung kann erweitert werden.

9.1. Verfahren zur Berechnung der Ruderkräfte

Die Strömungsverhältnisse im Zustrom zum Propeller-Rudersystem eines Schiffes können nur durch Verfahren vollständig modelliert werden, bei denen die Reibung und der Einfluss der Turbulenz auf die Strömung Berücksichtigung finden. Eine Alternative zu den viskosen Verfahren sind sogenannte Panel-Verfahren, mit deren Hilfe die Ruderkräfte im Propellerstrahl ebenfalls effizient berechnet werden können. Die bekannten Verfahren betrachten das System Propellerstrahl-Ruder, da der Auftrieb am Ruder im Wesentlichen durch den Propellerstrahl erzeugt wird. Nachteil dieser Verfahren ist jedoch, dass eine bei größeren Anstellwinkeln auftretende Ablösung am Ruderblatt vernachlässigt wird. Um den Einfluss der Ablösung auf die Ruderkraft zu ermitteln, müssen viskose Verfahren eingesetzt werden. Im Rahmen dieses Projektes findet das Programmpaket ANSYS-CFX zur Beschreibung der inkompressiblen, reibungsbehafteten und turbulenten Strömung am Schiff Anwendung. Die Auswirkungen der Turbulenz auf die Strömung wurden mit dem $k-\omega$ -SST Modell von Menter [12] beschrieben.

Die Wirkung eines Ruders wird durch die Anströmung eines Profiles realisiert. Die Anströmung des Ruders setzt sich zusammen aus der Schiffsgeschwindigkeit und aus dem Geschwindigkeitsanteil der durch den Propeller induziert wird. Wobei der größere Geschwindigkeitsanteil aus der Axialkomponente des Propellerstrahles resultiert. Durch

Veränderung des Ruderwinkels und damit verbunden des Anströmwinkels verändern sich die Kräfteverhältnisse am Ruder.

Um den Einfluss von Zustromgeschwindigkeit und Propellerdrehrate auf die Ruderkräfte zu ermitteln, sollen numerische Freifahrtversuche mit einem Propeller-Rudersystem bei unterschiedlichen Betriebspunkten durchgeführt werden.

Die Wirkung des Propellers auf das Ruder kann durch eine vollständige Auflösung der Geometrie und der Bewegung des Propellers erfolgen. Da es sich bei derartigen Untersuchungen um instationäre Berechnungen handelt, ist der zeitliche Aufwand entsprechend hoch und für parametrische Untersuchungen nicht realisierbar. Aus diesem Grund wurde für die hier durchgeführten numerischen Untersuchungen ein Kraft-Scheiben-Modell zur Realisierung der Propellerwirkung eingesetzt. Durch die Aktuatordisk werden entsprechend dem Schub und Drehmoment aus der Freifahrtkurve des Propellers, Geschwindigkeiten induziert, die vergleichbar mit dem Geschwindigkeitsfeld im realen Propellerstrahl sind. In einem abgeschlossenen Forschungsprojekt [10] wurden die durch das Kraft-Scheiben-Modell induzierten Geschwindigkeitskomponenten mit experimentellen Messungen verglichen und zeigten eine gute Übereinstimmung. Die Verteilung von Schub und Drehmoment auf die Volumenelemente der Propellerdisk erfolgt radial unterschiedlich. Das Maximum der Axialkomponente liegt bei einem Radienverhältnis von $r/R \approx 0,8$.

9.2. Beschreibung der Berechnungsfälle

Mit der ausgewählten, in Abbildung 9.1 dargestellten Ruder-Propeller-Kombination sollen Berechnungen bei unterschiedlichen Fortschrittsgraden im Modellmaßstab durchgeführt werden. Für diese Untersuchungen wurde das Ruder R851 aus dem DST-Bestand verwendet. Die Propellerscheibe, in Abbildung 9.1 rot dargestellt, soll die Eigenschaften des rechtsdrehenden Propellers mit der Nummer P258r modellieren. Die Ausdehnung der Aktuatordisk entspricht dem Propellerdurchmesser von $D = 0,180$ m.

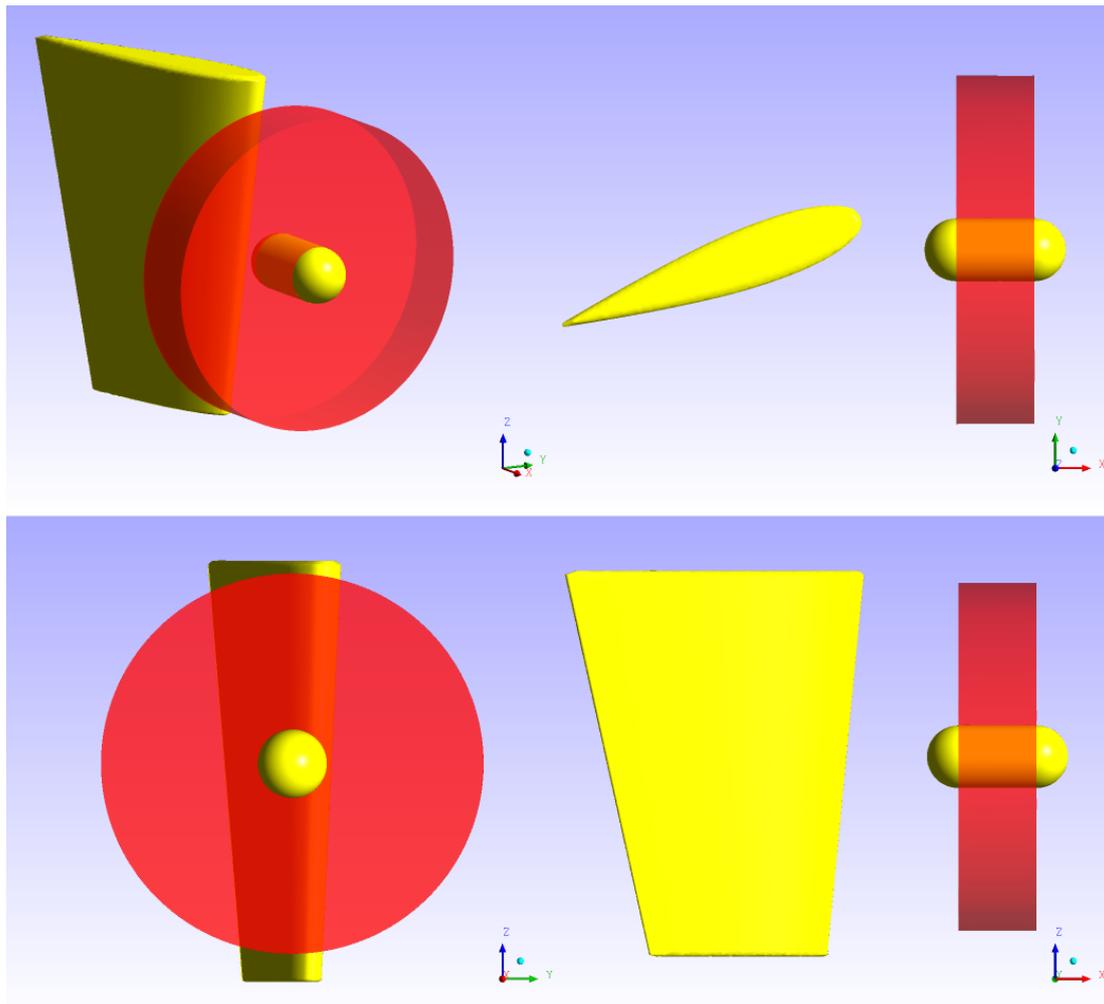


Abb. 9.1.: Darstellung der Geometrie der Berechnungsfälle in 4 Ansichten.

In der Abbildung 9.2 ist die Charakteristik des Propellers in einem Freifahrttdiagramm zusammengefasst worden. Die Beiwerte für Schub und Drehmoment K_T , K_Q , η und der Fortschrittsgrad J werden wie folgt berechnet.

$$J = \frac{V_A}{nD}, \quad K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, \quad K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad \text{und} \quad \eta = \frac{JK_T}{2\pi K_Q} \quad (9.1)$$

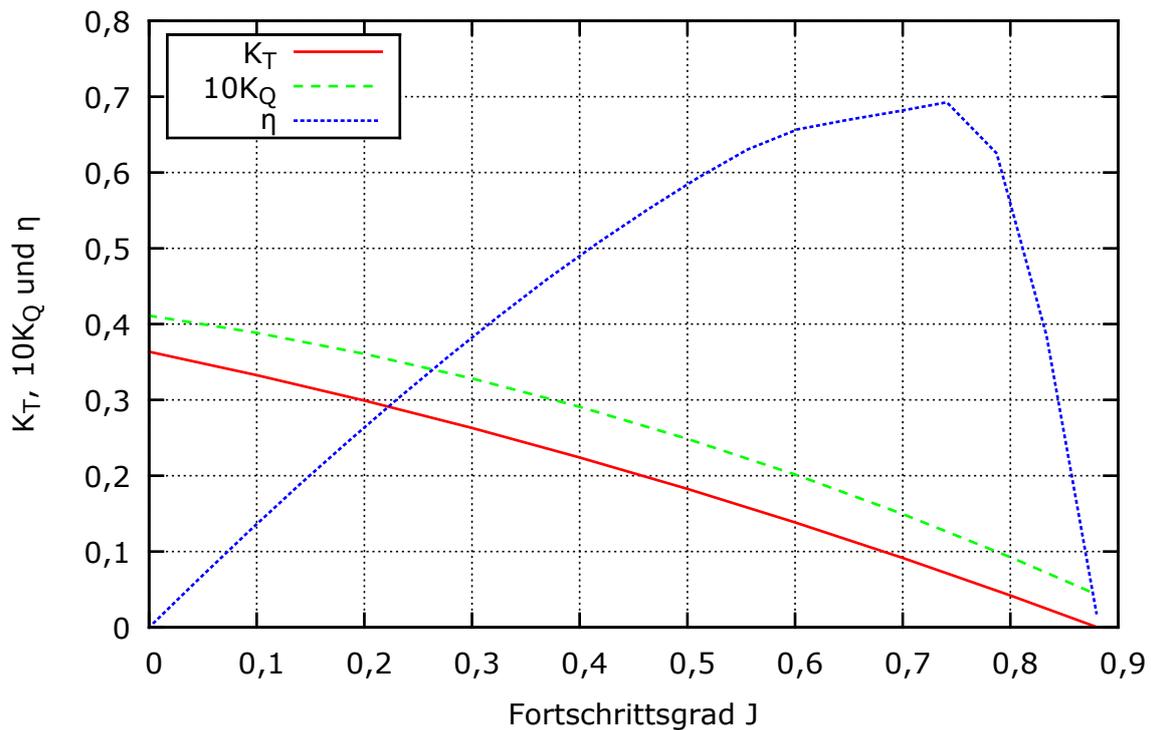


Abb. 9.2.: Freifahrt diagramm Propeller P258.

Der Propeller wird wie bei einem Freifahrtversuch homogen mit der Geschwindigkeit V_A angeströmt. Die Variation des Fortschrittsgrades J erfolgt über die Veränderung der Drehzahl des Propellers und der Anströmgeschwindigkeit V_A .

Tab. 9.1.: Berechnungsfälle V_A -Variation

Berechnungsfall	J	K_T	$10K_Q$	V_A [m/s]	T [N]	Q [Nm]
1.1	0,40	0,220	0,285	0,792	27,9	0,662
1.2	0,45	0,200	0,265	0,891	25,4	0,606
1.3	0,50	0,180	0,245	0,990	22,9	0,560
1.4	0,55	0,160	0,225	1,089	20,3	0,514
1.5	0,60	0,135	0,205	1,188	17,1	0,469

In der Tabelle 9.1 sind die Berechnungsfälle mit veränderter Zustromgeschwindigkeit bei gleichbleibender Drehrate von $n = 11 \text{ s}^{-1}$ aufgeführt. Die ermittelten Werte für den Schub T und das Drehmoment Q werden als Eingabegrößen für die numerischen Untersuchungen mit Propellerdisk benötigt. Gleiches gilt für die in Tabelle 9.2 zusammengefassten Berechnungsfälle für die Drehraten-Variation. Diese Berechnungsfälle (Ta-

belle 9.2) sind bei einer fixen Anströmgeschwindigkeit von $V_A = 0,9 \text{ m/s}$ durchgeführt worden.

Tab. 9.2.: Berechnungsfälle Drehzahl-Variation

Berechnungsfall	J	K_T	$10K_Q$	$n [\text{s}^{-1}]$	$T [\text{N}]$	$Q [\text{Nm}]$
2.1	0,40	0,220	0,285	13,75	43,7	1,018
2.2	0,45	0,200	0,265	12,22	31,4	0,748
2.3	0,50	0,180	0,245	11,00	22,9	0,560
2.4	0,55	0,160	0,225	10,00	16,8	0,425
2.5	0,60	0,135	0,205	9,17	11,9	0,325

Für Finite-Volumen-Verfahren muss ein endliches Lösungsgebiet definiert werden. Die Grenzen dieses Gebietes müssen geometrisch beschrieben werden und es müssen Randbedingungen definiert werden, die das physikalische Problem beschreiben. An den Rändern kann die Variable (Druck bzw. Geschwindigkeit) selbst (Dirichlet-Randbedingung) oder der Gradient (Neumann-Randbedingung) als Randwert vorgegeben werden.

In der Abbildung 9.3 sind die definierten Randbedingungen schematisch dargestellt.

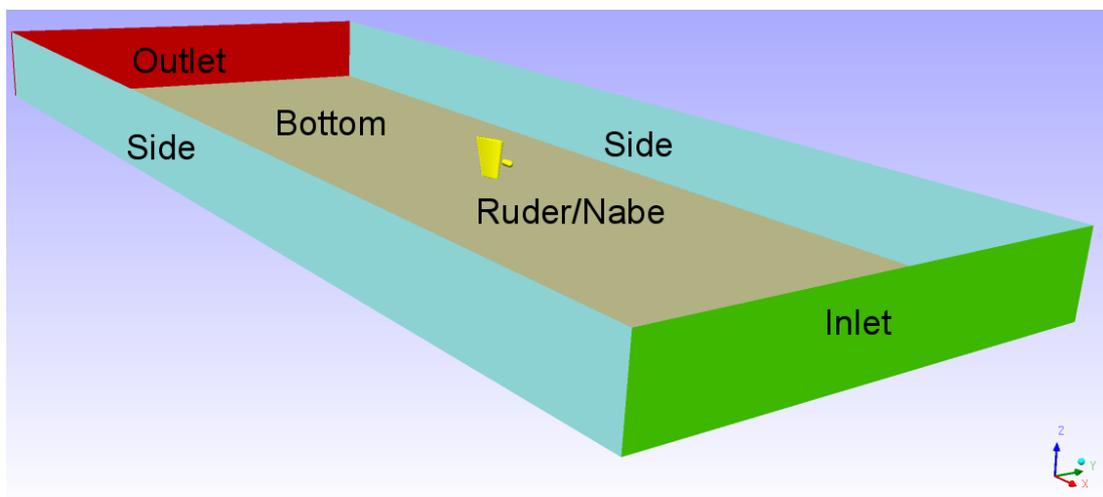


Abb. 9.3.: Schematische Darstellung der Randbedingungen.

Die Abstände zu den Berandungen wurden so gewählt, dass eine Beeinflussung der Lösung durch die notwendige Endlichkeit des Lösungsgebietes ausgeschlossen wird.

Einströmrand (Inlet) Der Einströmrand ist eine Dirichlet-Randbedingung, an dem eine homogene Anströmung vorgegeben wird, mit der das System Ruder/Propeller angeströmt werden soll.

Ausströmrand (Outlet) 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.

Ruder/Nabe Ruder und Nabe werden als reibungsbehaftete Wände definiert, an denen die Haftbedingung erfüllt ist (WALL NO SLIP).

Side Die seitliche Begrenzung wird als reibungsfreie Wand definiert. Es werden nur Geschwindigkeiten parallel zur Wand zugelassen. Es existieren keine Gradienten senkrecht zur Wand (WALL FREE SLIP).

Freie Wasseroberfläche Es wird keine freie Wasseroberfläche berechnet. 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).

Boden Am Boden gilt ebenfalls die Haftbedingung. Sie wird als reibungsbehaftete Wand (WALL NO SLIP) definiert. Zur Realisierung der Relativgeschwindigkeit wird der Boden als bewegte Wand definiert.

9.3. Gittergenerierung

Die Generierung der Rechengitter als Diskretisierung des Lösungsgebietes erfolgte mit dem Programmpaket ANSYS IcemCFD. Das gesamte Berechnungsgebiet setzt sich aus 3 Teilgittern zusammen, die über sogenannte General Grid Interfaces (GGI) miteinander gekoppelt wurden. In der Abbildung 9.4 sind die drei Teilgitter dargestellt.

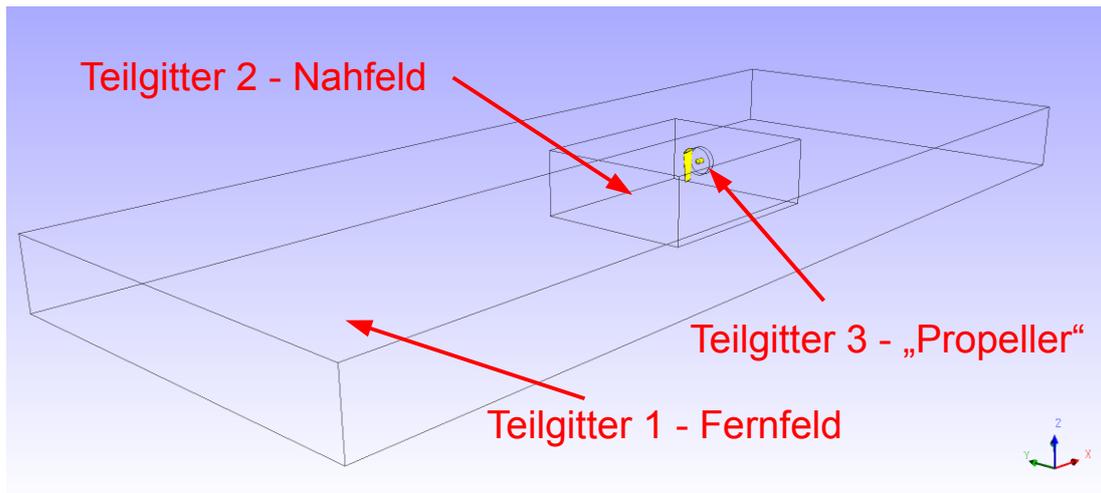


Abb. 9.4.: Teilgitter des Lösungsgebietes.

Das Teilgitter 1 und das Teilgitter 3 sind blockstrukturierte Gitter, die aus Hexaederelementen bestehen. Die Bereiche im Nahfeld (Teilgitter 2) wurden mit Tetraedern und Prismen gefüllt. Die Prismenschichten im unstrukturierten Gitterbereich (Teilgitter 2) wurden auf dem Ruder und auf der Nabe angeordnet, um die Grenzschicht aufzulösen. Die Abbildungen 9.5 und 9.6 zeigen beispielhaft Ausschnitte aus dem Gesamtgitter. In Abbildung 9.5 ist zu erkennen, dass die Propellerscheibe auch in axialer Richtung in mehrere Volumenelemente aufgeteilt wurde. Die Grenzschicht wurde mit 10 Prismenelementen, die in einem Verhältnis von 1,5:1 anwachsen, gebildet. Der Schnitt durch das Volumengitter, der in Abbildung 9.6 dargestellt ist, zeigt die lokalen Verfeinerungen des Gitters an der hinteren Ruderkante.

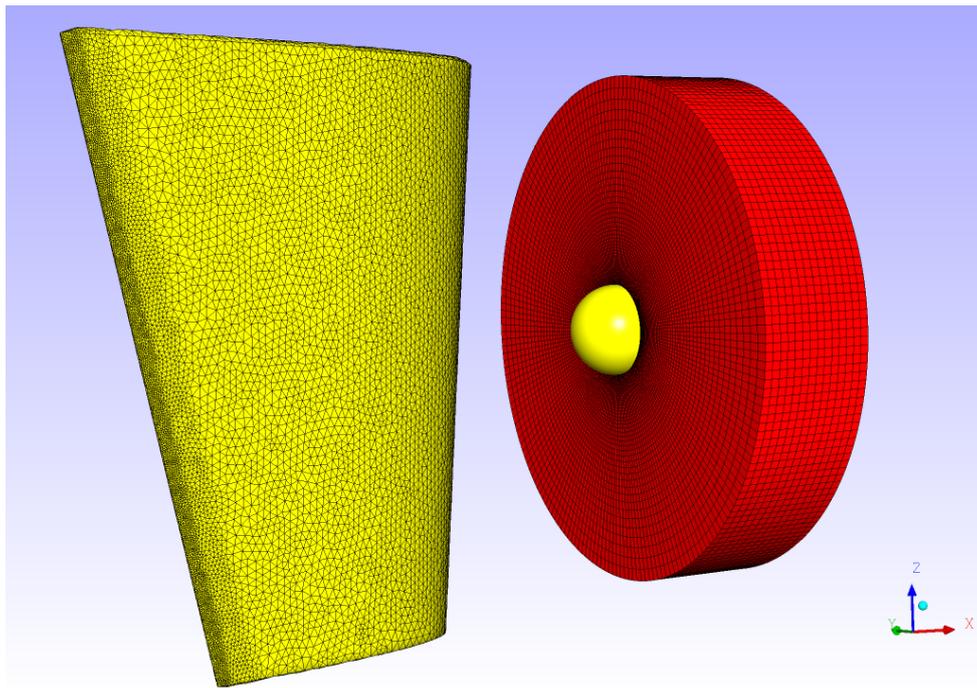


Abb. 9.5.: Oberflächengitter auf dem Ruder und der Propellerscheibe.

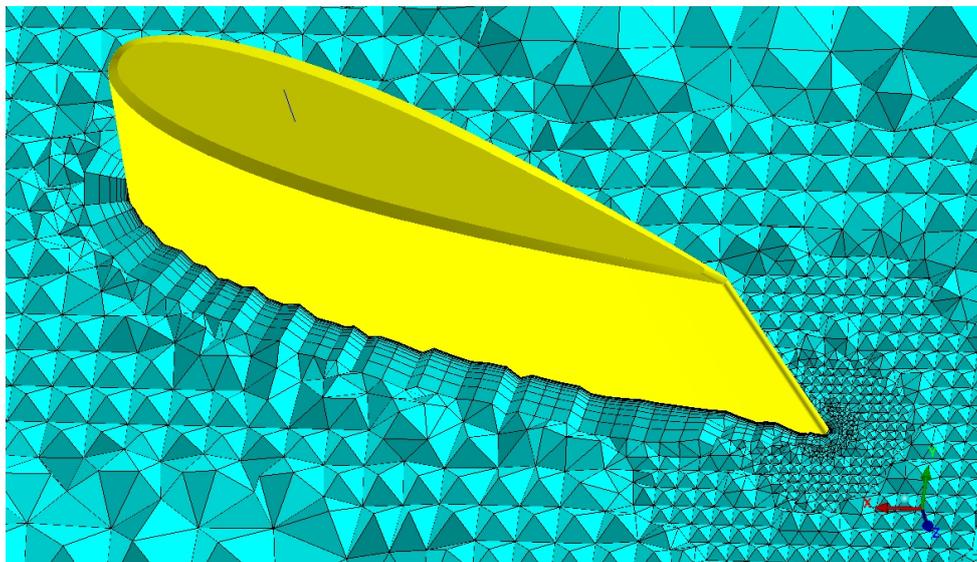


Abb. 9.6.: Prismenschichten am Ruder.

9.4. Ergebnisse

In den Berechnungen konnte bestätigt werden, dass die Veränderung der Drehrate eines Propellers einen wesentlich größeren Einfluss auf die Manövrier- und Kursfähig-

keit eines Schiffes hat, als die Veränderung der Schiffsgeschwindigkeit. Eine Veränderung des Fortschrittsgrades durch eine veränderte Schiffsgeschwindigkeit unter Beibehaltung der Propellerdrehrate führt nur zu geringen Veränderungen der Seiten- und Längskräfte am Ruder wie die blau- und lila-farbenen Kurvenverläufe in Abbildung 9.7 zeigen.

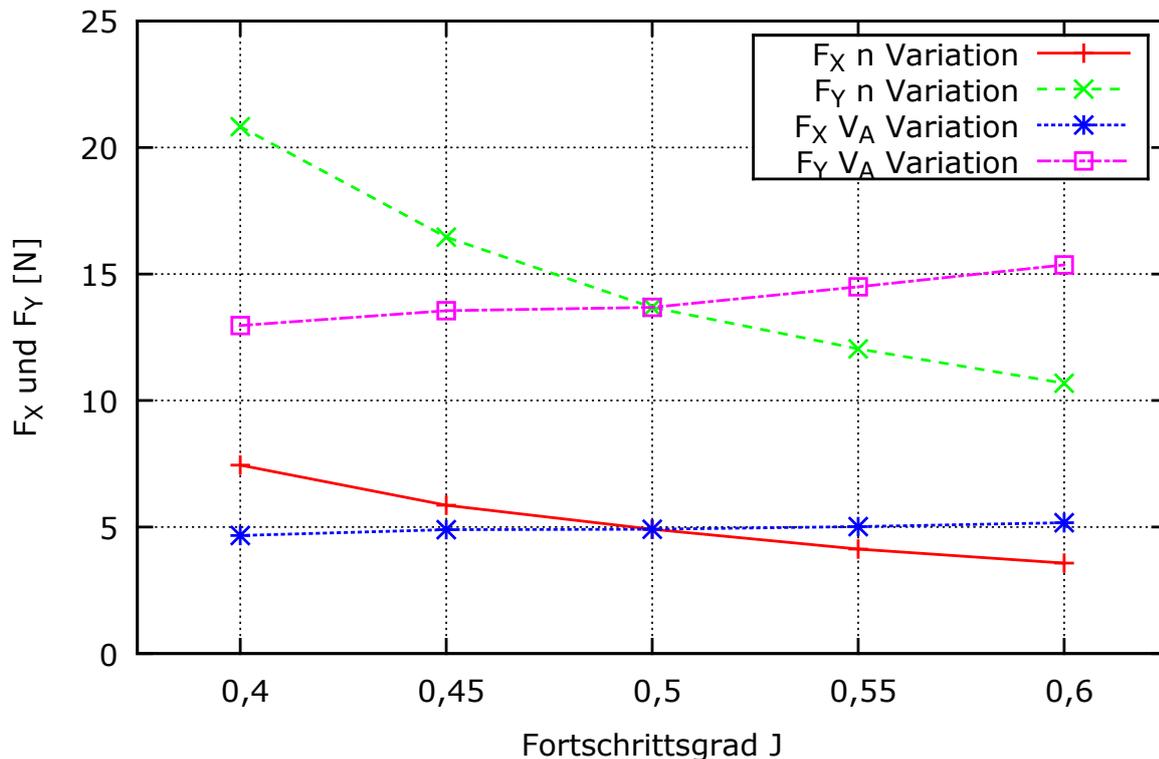


Abb. 9.7.: Kräfte am Ruder aufgetragen über Fortschrittsgrad für V_A - und n -Variation.

Eine Erhöhung der Drehzahl des Propellers, was gleichbedeutend mit der Reduzierung des Fortschrittsgrades ist, führt zu einem starken Anstieg der Seitenkraft (grüne Kurve in Abbildung 9.7) am Ruder und erhöht damit eindeutig die Ruderwirkung. Die Widerstandskraft (rote Kurve in Abbildung 9.7) des Ruders steigt ebenfalls an, jedoch etwas moderater. Um die Wirkung der Veränderung der einzelnen Variationsparameter n und V_A besser darzustellen, wurden die berechneten Werte über dem normierten Variationsparameter (Abbildung 9.8) aufgetragen. Die Werte wurden normiert mit der Ausgangsgeschwindigkeit V_{A0} bzw. mit der Anfangsdrehzahl n_0 .

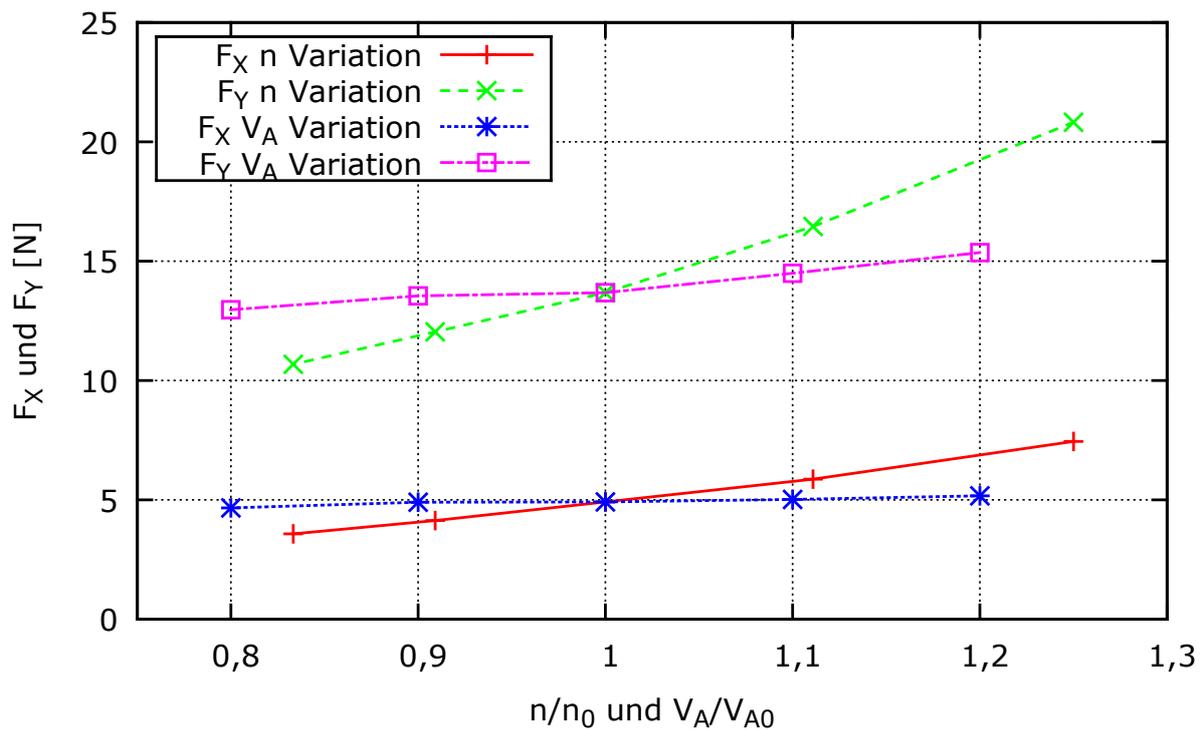


Abb. 9.8.: Kräfte am Ruder aufgetragen über normierten Variationsparametern.

In den Abbildungen 9.9 und 9.10 sind die veränderten Strömungsverhältnisse bei jeweils gleichem Fortschrittsgrad dargestellt. Es ist in beiden Abbildungen deutlich zu erkennen, dass die Kraftwirkung auf das Ruder bei geringen Fortschrittsgraden, also bei größeren Drehzahlen höher ist. Bei hohen Fortschrittsgraden wird der Einfluss der Anströmgeschwindigkeit stärker.

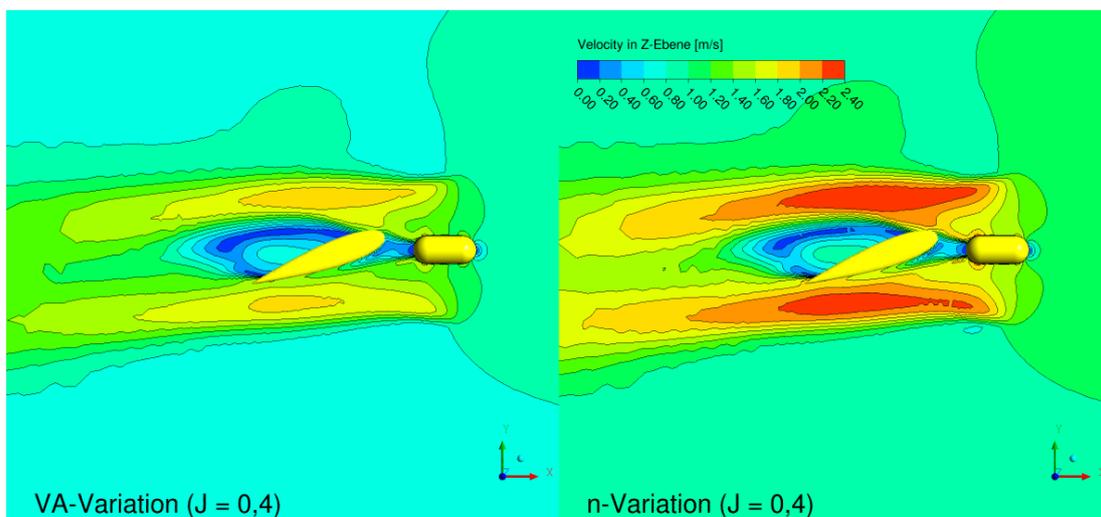


Abb. 9.9.: Geschwindigkeitsverteilung in z-Ebene bei Fortschrittsgrad $J = 0,4$ für V_A - und n -Variation.

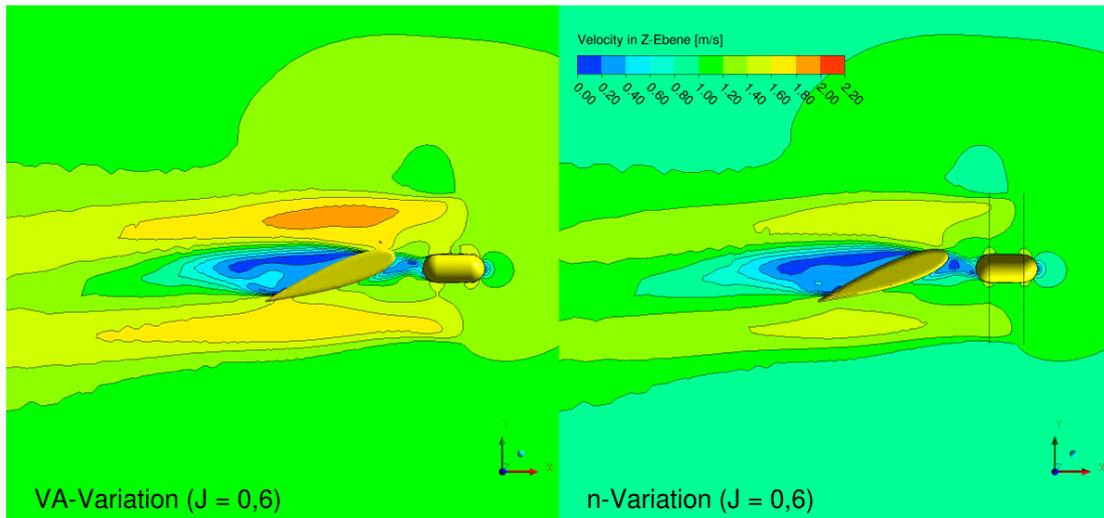


Abb. 9.10.: Geschwindigkeitsverteilung in z-Ebene bei Fortschrittsgrad $J = 0,6$ für V_A und n Variation

Teil IV.

Mathematische Modellierung

10. Aufbereitung der Daten aus EFD und CFD

Durch eine Vielzahl von verschiedenartigen Modellversuchen und durch die Weiterentwicklung von CFD-Verfahren sind umfangreiche Datenpools entstanden, die das Bewegungsverhalten von Schiffen in besonderen Fahrsituationen, wie zum Beispiel Überhol- bzw. Passiervorgänge, beschreiben. Die so gewonnenen Informationen über die am Schiff wirkenden Kräfte und das Bewegungsverhalten müssen gefiltert und aufbereitet werden. Die großen Datenmengen aus den experimentellen Untersuchungen, die Ergebnisdateien aus den CFD-Rechnungen und die Erkenntnisse aus speziellen Einzeluntersuchungen müssen in einer Datenbank zusammengefasst werden, um gezielte Fragestellungen bei der Entwicklung von mathematischen Modellen zu beantworten. Durch die Implementierung der erweiterten mathematischen Modelle in die Software des Simulators kann die Simulation des Fahrverhaltens der Schiffe weiter der Realität angepasst werden.

10.1. Dimensionslosmachung

Ein wichtiger Aspekt bei der Modellierung ist die Dimensionslosmachung der durch Modellversuche und CFD-Berechnungen gewonnenen Daten. Durch die Bildung von dimensionslosen Größen für die im Versuch gemessenen oder numerisch berechneten Kräfte und Momente befreit man sich vom Maßstab, in dem die Modellversuche oder die CFD-Rechnungen durchgeführt wurden. In einem weiteren Schritt kann man die dimensionslosen Daten auf die Großausführung umrechnen, wobei dann in Abhängigkeit von der jeweiligen Situation auch andere Maßstäbe zur Anwendung kommen können. Ein weiterer Aspekt der Dimensionslosmachung ist die Eliminierung bestimmter Einflüsse mit dem Ziel, in dimensionsloser Darstellung gewisse nichtlineare Zusammenhänge wie z.B. die quadratische Abhängigkeit von der Geschwindigkeit zu linearisieren und so

die Modellierung zu vereinfachen. Die Bildung von Kennzahlen für die am Schiff wirkenden Kraftgrößen ist durch verschiedene Ansätze, bei denen sich die physikalischen Einheiten immer neutralisieren, möglich (Gleichungen 10.1 bis 10.3).

$$F' = \frac{F}{m \cdot g} \quad (10.1)$$

$$F' = \frac{F}{m \cdot V^2 / L'} \quad (10.2)$$

$$F' = \frac{F}{\rho / 2 \cdot V^2 \cdot L \cdot T} \quad (10.3)$$

Bei den hier beschriebenen Varianten erfolgt die Bildung von dimensionslosen Kennzahlen durch jeweils unterschiedliche Zustandsgrößen. Alle in den Gleichungen auftretenden Längeneinheiten werden durch sinnvolle Größen wie den Tiefgang oder die Länge des Schiffes ersetzt. Für alle Arten der Dimensionslosmachung gilt zusätzlich, dass die Größen m , V , L und T die des Own Ships (OS), des Target Ships (TS) oder der Mittelwert aus beiden sein können, was die Anzahl möglicher Dimensionslosmachungen erhöht. Hierbei ist zu beachten, dass als Own Ship das Schiff definiert wird, auf welches die Kräfte eines anderen Schiffes wirken. Dementsprechend ist das Target Ship der Verursacher der am Own Ship auftretenden Kräfte. Insbesondere die Erkenntnis, dass die Verdrängungswirkung des Target Ships (Primärwellensystem) hauptsächlich verantwortlich ist für die Wirkung auf das Own Ship, führte dazu, dass für die weiteren Arbeiten, die durch die Fahrt des Schiffes und die durch die Interaktion mit anderen Schiffen auftretenden Kräfte mit der Masse des Target Ships und der Erdbeschleunigung (Gleichung 10.1) dimensionslos gemacht wurden. Für den Hebelarm des Giermomentes muss natürlich die Länge des Own Ships verwendet werden.

$$X' = X / (m_t \cdot g) \quad (10.4)$$

$$Y' = Y / (m_t \cdot g) \quad (10.5)$$

$$N' = N / (m_t \cdot g \cdot L_o) \quad (10.6)$$

Um einen Überblick über den Einfluss der Dimensionslosmachung (sowie die Einflussfunktionen) zu bekommen, wurde eine Korrelationsuntersuchung über alle Daten durchgeführt. Dabei wurde die Korrelation der Maximalwerte eines jeden Versuchs zur Art der Dimensionslosmachung und zu den möglichen Einflussfunktionen untersucht. Diese Korrelationsuntersuchung mit unterschiedlichen Ansätzen hat die Wahl des Verfahrens (Gleichungen 10.4 bis 10.6) bestätigt. In der Tabelle 10.1 sind die besten Ergeb-

nisse dargestellt. Eine absolute Korrelation von 1 konnte, wie erwartet, nicht erreicht werden.

Tab. 10.1.: Ergebnisse der besten Korrelationen

Korrelationsart	Korrelationsergebnis
$F' = \frac{F}{m_t g}$	0,7611
$F' = \frac{F}{\frac{m_t V_t^2}{L_t}}$	0,7346
$F' = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho V_t^2 L_O T_O}$	0,6109

Der Index t kennzeichnet physikalische Größen, die sich auf das sogenannte Target Ship beziehen, welches der Verursacher der auf ein anderes Schiff (Own Ship - Index o) wirkenden Kräfte ist. Für alle Gleichungen im Abschnitt Modellbildung gilt, dass der Index m einer physikalischen Größe den Mittelwert dieser Variablen für Target und Own Ship darstellt.

10.2. Glättung und Messdatenaufbereitung

Die in diesem Vorhaben durchgeführten Modellversuche wie Begegnen und Überholen von Schiffen, Ruderkraftmessungen und Bewegung des Schiffes unter einem vorgegebenen Gierwinkel, sind gekennzeichnet durch mehr oder weniger starke Schwankungen der gemessenen Größen. Die rohen Versuchsdaten werden mit einer Frequenz von 75 Hz aufgenommen. Für die Überführung der gewonnenen Informationen in die mathematische Modellierung ist es nicht notwendig und zielführend jeden einzelnen Messwert in die weitere Verarbeitung einzubeziehen. Um die Datenmengen zu begrenzen, müssen die gemessenen Werte maximal gefiltert und geglättet werden, ohne jedoch die im Messdatensatz enthaltenen Informationen zu verwischen. Der charakteristische Verlauf des gemessenen Signals muss erhalten bleiben. Im Rahmen dieses Projektes wurde für die Aufbereitung der Messdaten das im Forschungsprojekt SimuBin entwickelte MS-Visual-Basic-Programm „SimuBin-Auswertung“ angepasst und erfolgreich eingesetzt. In diesem Programm werden neben den Messwerten folgende versuchsspezifische Parameter erfasst (Tabelle 10.2):

Tab. 10.2.: Versuchsspezifische Parameter

Parameter

Begegnen
Überholen
Fahrtrichtung
Modellabmessungen
Modelleinbau
Synchronisierungsdetails

Die Daten werden als modifizierbarer ASCII-Datensatz mit allen relevanten Messwerten eingelesen. Von besonderem Interesse für die mathematische Modellierung sind hier die Kräfte und Momente an den gefesselten Modellen. Jeder eingelesene Messdatensatz wird automatisch analysiert und von der reinen Zeitachse der Messung auf die neue Abszisse „relative Passierzeit t_r “ umgerechnet. Diese Zeitskala ist wie folgt definiert:

$t_r = -1$ **Beginn der Überlappung:** Im Fall des Überholens trifft hier der Bug des TS auf das Heck des OS, beim Begegnen treffen die vorderen Lote aufeinander.

$t_r = 0$ **Mitte des Manövers:** Die Hauptspante sind genau nebeneinander.

$t_r = +1$ **Ende des Manövers:** Im Fall des Überholens verlässt das Heck des TS den Bug des OS, beim Begegnen treffen die hinteren Lote aufeinander.

Die rohen Messsignale werden durch eine glättende, abschnittsweise kubische Splinefunktion [16] gefiltert und dabei wird das Messrauschen eliminiert. Die Glättung der Messreihen erfolgt auf der Basis der kubischen Ausgleichssplines, bei der der „Filterfaktor“ zwischen 0 und 1 frei eingestellt werden kann. Bei einem Faktor von 0 erfolgt keine Glättung, d.h. die Daten werden 1:1 übernommen. Bei einem Faktor von 1 erfolgt eine Glättung, die so stark ist, dass eine Gerade wie bei einer linearen Regression erzeugt wird. Der Filterfaktor zwischen diesen Grenzen sollte so gewählt werden, dass eine Glättung der Daten nur so weit erfolgt, dass das Messrauschen gefiltert und der charakteristische Verlauf der Signale erhalten bleibt. In Abbildung 10.1 ist dies für das Giermoment wiedergegeben.

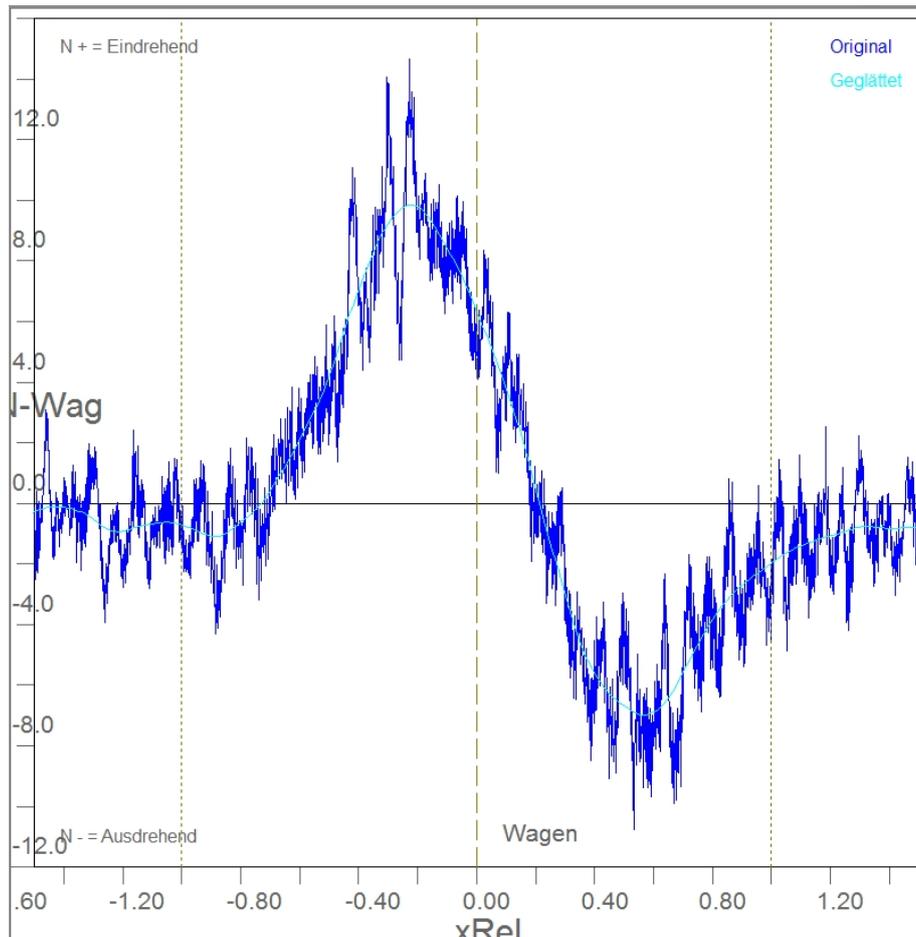


Abb. 10.1.: Beispiel für die Glättung der Messwerte.

Nach diesem Arbeitsschritt erfolgt die Umrechnung von vorderer und hinterer Seitenkraft in eine Gesamtseitenkraft und das entsprechende Giermoment über den Bereich $-1,5 < t_r < +1,5$. Um die Daten weiter verarbeiten zu können, werden die Werte auf 61 Punkte reduziert. Die Auswertung einer Vielzahl von Messdatensätzen hat gezeigt, dass diese Anzahl ausreichend ist, um die Charakteristik der Kraft- und Momentenverläufe wiederzugeben. Die Reduzierung der Messdaten ermöglicht eine zeitnahe Auswertung der Versuchsergebnisse durch die Analysesoftware der Datenbank. In Abbildung 10.2 sind die aus den geglätteten Signalen interpolierten 61 Punkte als Symbole wiedergegeben. Bei den dargestellten Kurven handelt es sich um standardmäßig erzeugte gedämpfte harmonische Ersatzfunktionen, wie sie in der konservativen Modellierung (siehe Kapitel 11.1) verwendet werden.

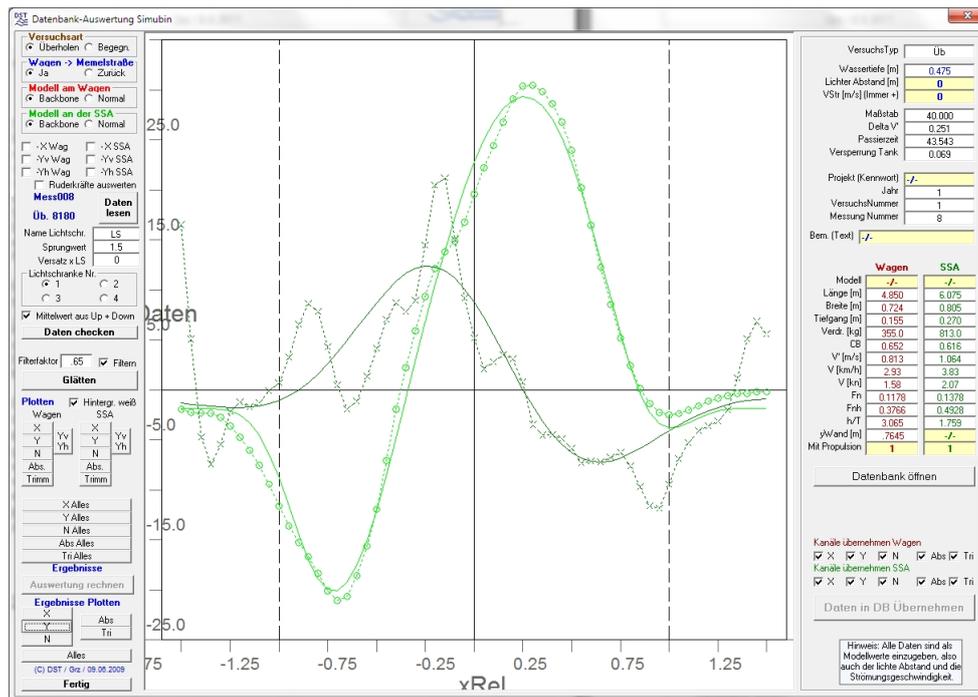


Abb. 10.2.: Auswertung SimuBin.

Die Ergebnisse der Auswerteprozedur und die den Versuch beschreibenden Parameter werden durch das Auswerteprogramm in die Datenbank importiert und für weitere Analysen bereitgestellt (siehe Abbildung 10.2 rechte Seite).

10.3. Erstellung einer Datenbank

In bereits abgeschlossenen Forschungsprojekten (SicherBin und SimuBin) wurde eine Vielzahl von experimentellen Untersuchungen mit dem Schwerpunkt Begegnen und Überholen durchgeführt [6, 7]. Diese experimentellen Daten wurden auf unterschiedliche Weise archiviert. Erste Versuche der Datenarchivierung erfolgten mit einer MS-Excel-Applikation. Es zeigte sich jedoch schnell, dass die stetig wachsenden Datenmengen, die durch die Modellversuche gesammelt wurden, mit dieser Software nicht mehr effizient und komfortabel ausgewertet werden konnten. Eine Weiterentwicklung der Datenauswertung und Speicherung wurde notwendig und ist mit einer SQL-Datenbank auf der Basis MS-Access realisiert worden. Um die Daten in dieser Datenbank abzulegen wurde ein MS-Visual-Basic-Programm „UebBegMultiDB“ erstellt, welches den Zugriff auf das Versuchsarchiv herstellt und Auswertungen und Ausgaben in vielfältiger Weise ermöglicht. Im Projekt SIPAS wurde auf diese Vorarbeiten zurückgegriffen und

das Programm „UebBegMultiDB“ für die neuen Anwendungsgebiete weiterentwickelt und zum Einsatz gebracht.

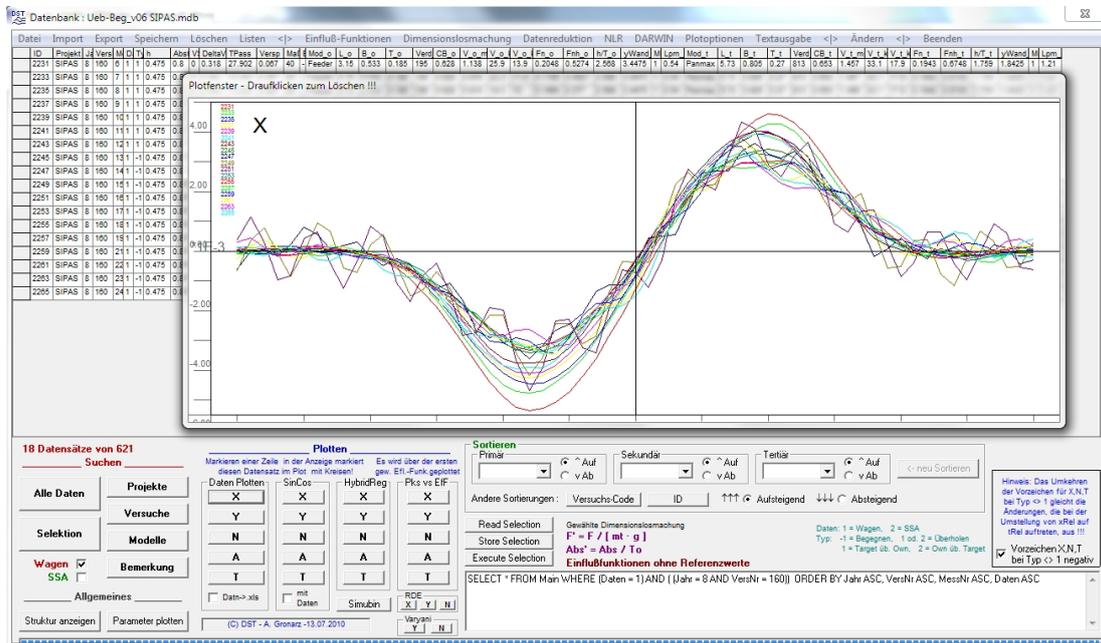


Abb. 10.3.: Datenbankprogramm UebBegMultiDB.

Die Abbildung 10.3 zeigt die grafische Benutzeroberfläche (GUI) des Datenbankprogramms.

In den folgenden Tabellen 10.3 bis 10.4 werden die Grundfunktionen der grafischen Benutzeroberfläche, Funktionen der Datenmanipulation und Selektionsfunktionen kurz beschrieben. Die Auswahl der Menüfunktion erhebt nicht den Anspruch einer vollständigen Dokumentation. Im Schlussbericht „SimuBin“ ([7], Kapitel 5.1) wird das Programmpaket in dem damaligen Entwicklungsstand vollständig beschrieben.

Tab. 10.3.: Grundfunktionen der Datenbank

Befehl	Funktion
Datei	Öffnen einer neuen Datenbank bzw. Programmende
Import	Einlesen eines Datensatzes Einlesen multipler Datensätze
Export	Exportieren eines Datensatzes Exportieren ausgewählter Datensätze Exportieren aller Datensätze
Speichern	Speichern ausgewählter Daten als Modellwerte, dimensionslos oder Full Scale mit der Möglichkeit alle Kanäle oder nur ausgewählte Kanäle wie z.B. X, Y oder N sowie alternativ deren Peaks zu speichern
Löschen	Löschen eines Datensatzes Löschen ausgewählter Datensätze Löschen aller Datensätze
Listen	Versuchsliste erzeugen Fahrtenliste erzeugen Messungsliste erzeugen
Plotoptionen	Einstellung verschiedener Möglichkeiten zur Plotdarstellung und -ausgabe.
Textausgabe	Umleitung der Ausgabe auf Bildschirm, Drucker oder Datei.

Tab. 10.4.: Funktionen der Datenauswahl

Befehl	Funktion
Suchen	Selektion aller Daten Selektion nach frei definierbaren Kriterien Selektion nach Datenquelle (Schleppwagen oder Schnellschleppanlage) Selektion nach Projektnamen Selektion nach Versuchsnummern Selektion nach verwendeten Modellen Selektion nach Bemerkung im Datensatz
Plotten	Plotten verschiedener Kanäle (X , Y , N , Trimm und Absenkung) Ausgabe reiner Daten, Ersatzfunktionen, Ergebnisse der Hybridregression, Peaks über Einflussfunktionen sowie Einstellungsfunktionen.
Sortieren	Sortieren der Datensätze nach Primär-, Sekundär- und Tertiärkriterien Sortieren auf- oder abwärts Sortieren nach ID oder Versuchscode
Manuelle Selektion	Editieren von SQL-Befehlen Lesen, Abspeichern und Ausführen von frei programmierbaren SQL-Anweisungen

Tab. 10.5.: Funktionen der Datenauswertung

Befehl	Funktion
Einflussfunktionen	Auswählen einer oder mehrerer Einflussfunktionen für weitere Analysen, z.B.: T_m/h , $B_m/(y + Bm)$, C_{Bo}/C_{Bt} , Fr_t , L_t/L_o und vieles mehr
Dimensionslosmachung	Auswählen der Art der Dimensionslosmachung für weitere Analysen, z.B.: Modellwerte, Full Scale, $F' = F/(m_t * g)$ o.ä.
Datenreduktion	Reduzieren der Anzahl der zu verarbeitenden Daten von 61 auf 31, 21, 16 etc.
NLR	Untermenü zur Anwendung der „Nichtlinearen Regression“ auf ausgewählte Daten.
DARWIN	Aufruf des integrierten Programms DARWIN zur Interpolation multidimensionaler Daten.
Ändern	Verschiedene nachträgliche Korrekturen an den Daten. Umschalten der Geschwindigkeiten auf Modellwerte oder Full Scale.

11. Modellierungsansätze

Das Ziel der in diesem Projekt durchgeführten Modellierung ist es, ein mathematisches Kräftemodell zu entwickeln, welches die physikalische Problemstellung des Bewegungsverhaltens von Fahrzeugen, insbesondere das Verhalten der Schiffe bei Interaktionen wie zum Beispiel Begegnen und Überholen möglichst realitätsnah beschreibt. Neben der Hauptforderung der möglichst realen Beschreibung der Physik ergeben sich weitere Anforderungen an einen zu entwickelnden Algorithmus:

- Berücksichtigung aller relevanten Parameter, die die Interaktion beschreiben
- Zeitnahe Ergebnisse (kurze Rechenzeit)
- Stabile Algorithmen für Implementierung in Simulator
- Bei Interpolation bzw. Extrapolation der Daten plausible Beschreibung des Fahrverhaltens

Am DST wurden 4 Lösungsansätze betrachtet und auf ihre Anwendbarkeit für die mathematische Beschreibung des Bewegungsverhaltens der Schiffsinteraktion untersucht. Diese Ansätze werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

11.1. Konservative Modellierung

Sowohl für die lineare als auch die nichtlineare Regression müssen mathematische Formeln gewählt werden, die durch die richtige Wahl der Koeffizienten das physikalische Problem beschreiben. Die einzelnen Koeffizienten werden durch geeignete mathematische Verfahren, wie zum Beispiel das Gauss- bzw. Levenberg-Marquardt-Verfahren [4], ermittelt. Bei linearen Systemen setzt sich das Feld der Koeffizienten aus Faktoren der Einzelterme zusammen, die additiv verknüpft sind. Bei nichtlinearen Ansätzen können die Koeffizienten auch Exponenten von Potenzfunktionen oder in trigonometrischen Funktionen eingebettet sein.

Die Überprüfung der Anwendbarkeit solcher Ansätze hat gezeigt, dass für Einzelfälle, bei denen sich gleichartige Schiffe überholen bzw. begegnen, Formeln aufgestellt werden können, die die Kraftwirkungen auf die Schiffe ausreichend beschreiben. Für Interaktionen von Schiffen unterschiedlicher Geometrie (Länge, Breite und Tiefgang) ist es jedoch nicht gelungen, mit Regressionsverfahren geeignete allgemeingültige mathematische Formulierungen zu finden, die das physikalische Problem ausreichend beschreiben.

11.1.1. Lineare Regression

Ein bekanntes Beispiel für die Anwendung der linearen Regression im Schiffbau ist die mathematische Beschreibung der Propellerfreifahrtkurven für die Wageningen Propellerfamilie. Durch eine Polynomregression nach Gleichung 11.1 lassen sich die Koeffizienten des Polynoms identifizieren [13].

$$Y = \sum_i^{0..60} \sum_j^{0..60} \sum_k^{0..60} C_{ijk} \cdot (P/D)^i \cdot (A_e/A_0)^j \cdot Z^k \quad i,j,k \notin [4,5] \quad (11.1)$$

Die Implementierung dieser Polynomfunktionen für bekannte Propeller ermöglicht einen schnellen Zugriff auf die Propellerdaten für den gesuchten Betriebspunkt. Die Modellierung der Charakteristik der Freifahrtkurven liefert die Beiwerte K_T und K_Q über J für den am Schiff installierten Propeller.

Ein derartiger polynominaler Ansatz ist aber für das Verhalten der Kräfte und Momente beim Begegnen und Überholen, wie beispielsweise in Abbildung 10.3 dargestellt, nicht geeignet.

11.1.2. Nichtlineare Regression

Die Komplexität des Überholvorganges von Schiffen, wo beide Schiffe eine gegenseitige Wirkung verursachen, zeigt, dass die dabei am Schiff wirkenden Kräfte und das Bewegungsverhalten der Schiffe mit einfachen linearen Ansätzen nicht modellierbar ist. Die Schwierigkeiten bei der Modellierung der physikalischen Vorgänge während des Überholvorganges ergeben sich aus folgenden Fakten:

- Viele Parameter beeinflussen die Transaktion zwischen den Schiffen.

- Die parametrische Beschreibung der Kurvenverläufe für Kräfte und Momente ist sehr aufwändig.
- Modellierungen sind nur mit nichtlinearen Funktionen zu erreichen.
- Einflussfunktionen müssen Anwendung finden, da Verwendung der reinen Versuchsparameter nicht geeignet scheint.

In der Formel 11.2 ist als Beispiel eine Teilmodellierung der Kräfte und Momente beim Überholen wiedergegeben. Sie setzt sich zusammen aus einer harmonischen Grundfunktion, die durch Frequenz und Phasenverschiebung eingestellt wird. Die Exponentialfunktion dient als Dämpfung, um außerhalb der Abszissen $-1,5 < t_r < +1,5$ die Funktionswerte zu Null werden zu lassen. Die Amplitude A der harmonischen Grundfunktion wird durch multiplikative Korrekturen verändert. Die Potenzen sowie die Exponential- und Winkelfunktionen verursachen die Nichtlinearität der Formel. Durch die Argumente der Potenzen, die Einflussfunktionen (siehe auch Kapitel 11.4.1), wird die Physik besser modelliert als durch die eigentlichen Parameter. Dies wird z.B. an der Verwendung der dimensionslosen Wassertiefe T/h anstelle der tatsächlichen Größe h deutlich.

$$\begin{aligned}
 F' = & \left(\frac{(B_O + B_T)/2}{y + (B_O + B_T)/2} \right)^{Ay} \cdot (1 + 0,5 \cdot Typ)^{ATyp} \cdot \left(0,5 + \frac{(T_O + T_T)/2}{h} \right)^{Ah} \\
 & \cdot \left(0,5 + \frac{|V_O - V_T|}{V_O + V_T} \right)^{AdV} \cdot \left(\frac{V_T}{V_{\max}} \right)^{AVt} \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m_O + m_T}}{1,3(B_O + B_T)/2} \right)^{AmB} \cdot \left(\frac{V_O + V_T}{V_{\max}} \right)^{AVmx} \\
 & \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{m_O}{m_T}} \right)^{Amot} \cdot A \cdot e^{(-1,5 \cdot |t_r|^{Ee})} \cdot \sin \left(\pi \left[\omega \left(\frac{(B_O + B_T)/2}{y + (B_O + B_T)/2} \right)^{Wy} \cdot t_r \right. \right. \\
 & \left. \left. - \phi \left(\frac{(B_O + B_T)/2}{y + (B_O + B_T)/2} \right)^{Py} \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m_O + m_T}}{1,3(B_O + B_T)/2} \right)^{PmB} \cdot \left(\frac{V_O + V_T}{V_{\max}} \right)^{PVmx} \right. \right. \\
 & \left. \left. \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{m_O}{m_T}} \right)^{Pmot} - Typ \cdot FT \right] \right) \quad (11.2)
 \end{aligned}$$

Die Überprüfung der Anwendbarkeit dieser komplexen Formel hat gezeigt, dass dieser Ansatz für einige Modellversuche eingesetzt werden kann. Es zeigte sich aber auch,

dass eine Allgemeingültigkeit über einen weiten Bereich nicht realisierbar ist. Einige im Modellversuch beobachtete, vom Standard abweichende Kurvenverläufe konnten nicht wiedergegeben werden. Daraus ergab sich die Erkenntnis, dass die Entwicklung einer Formulierung, die alle durchgeführten Modellversuche wiedergibt, auf der Basis einer Kombination einer harmonischen gedämpften Funktion und multiplikativen Korrekturen praktisch nicht durchführbar scheint. Als erschwerend zeigte sich auch, dass diese Formel und deren Variablen nur für einen festen Datenbestand gilt. Jede Änderung des Datenbestandes erfordert jeweils die Bildung einer neuen Formel bzw. die Ermittlung neuer Koeffizienten durch Regression.

11.2. DARWIN

Eine vollkommen andere Strategie verfolgen Suchverfahren, die sich auf einen vorhandenen Datenbestand stützen und in diesem abhängig von der Konfiguration der Zielparame-ter mit einer gewichteten Interpolation Ergebnisse liefern. Ein derartiges Verfahren wurde für eine andere Anwendung am DST entwickelt (DAtenReduktions- und Wich-tungs-INterpolation). Der Datenbestand wird bei diesem Verfahren durch eine Punkte-wolke im Raum beschrieben. Die Dimension i des Raumes ist durch die Anzahl der vorhandenen Parameter definiert. Jeder Raumpunkt beschreibt einen Datensatz, der durch die Parameter P_i definiert ist.

Um Informationen über einen definierten Zustand zu erhalten, der durch einen Parame-teratz P_0 beschrieben wird, muss nun zur Ermittlung des Zieles in der Punktwolke nach ähnlichen Ereignissen gesucht werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass das Ziel als Punkt in der Wolke mit einem Punkt des Datenbestandes zusammenfällt, ist äußerst gering. Aus diesem Grund wurde ein Algorithmus entwickelt, der die Punktwolke nach Datensätzen durchsucht, die „nahe“ am Ziel liegen und zu einer Interpolation heran-gezogen werden können. Die gefilterten Datensätze werden unterschiedlich gewichtet. Datensätze die in der Punktwolke nahe am Ziel liegen werden höher bewertet, als weiter entfernte aber trotzdem noch relevante Datensätze. Dadurch wird die Qualität der Ergebnisse deutlich verbessert. Hat man Vergleichsdatsätze mit den zugehöri-gen Abständen ermittelt, können die dazu gehörigen Kurven unter Berücksichtigung der Wichtungen interpoliert und die gesuchten Verläufe der physikalischen Größen für den Zielzustand berechnet werden. In Abbildung 11.1 ist beispielhaft eine Interpolation dargestellt. Es handelt sich um die Nachrechnung der Messung mit der ID 83 aus der Datenbank (rote Linie mit bester Annäherung und höchster Wichtung).

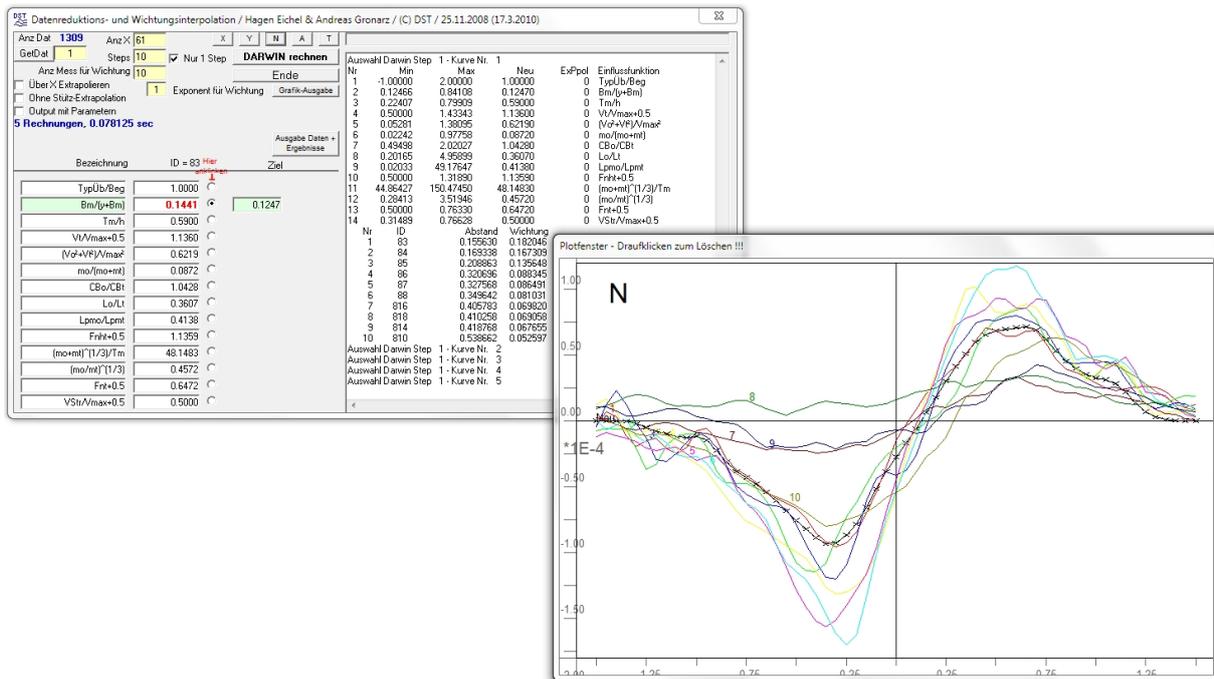


Abb. 11.1.: Interpolation des Giermomentes mit DARWIN.

Die Problematik dieser Technik liegt jedoch in der sehr ungleichmäßigen Abdeckung des multidimensionalen Parameterraumes mit Daten. So ist es möglich, dass zwar plausible, aber doch falsche Ergebnisse geliefert werden. Eine weitere Schwierigkeit besteht in der Extrapolation, wenn Ziel-Parameter über den durch Daten gesicherten Bereich hinausgehen. Es kann auch vorkommen, dass bestimmte Einflüsse, wie z.B. die Wassertiefe, zwar in dem Datenbestand gut dargestellt werden, diese Daten aber bei der Interpolation keine Berücksichtigung finden, da die anderen Parameter zu weit entfernt sind.

DARWIN wurde in der Datenbank-Applikation integriert und kann zur Berechnung von Kraft- und Momentenverläufen über t_r auf der Basis der Modellversuchsergebnisse verwendet werden. Nachrechnungen von Parameterkonfigurationen P0 ausgeführter Modellversuche haben jedoch gezeigt, dass aus den oben genannten Gründen dieses Verfahren nicht zielführend ist.

11.3. ANN (Artificial Neural Networks)

Ein weiterer Lösungsansatz sind neuronale Netze – eine in der Theorie schon länger bekannte Nachbildung der Funktionsweise des menschlichen Gehirns (Lernfähigkeit),

die allerdings erst nach der massiven Verfügbarkeit von Rechnerleistung sinnvoll zum Einsatz kommen konnte.

Eine Studie dieses Verfahrens zeigt die generelle Verwendbarkeit, es ist jedoch ein nicht zu unterschätzender Aufwand erforderlich, um zu brauchbaren Ergebnissen zu kommen. Für das Beispiel der „Längenvariation“ wurden Untersuchungen über die Anwendbarkeit von neuronalen Netzen in diesem Projekt durchgeführt.

Das Netz besteht aus (nur) einem Input-Neuron, welches den Wert L_o/L_t (Länge des OS zu Länge des TS) als Eingabe erhält. Die *hidden Layer* bestehen aus 3 Schichten (10, 20 und 50 Neuronen) und der Output-Layer setzt sich aus 61 Neuronen zusammen, die identisch sind mit den 61 „Zeitschritten“ bzw. Abszissenpunkten der Kurven der Datensätze für die Längskraft X . Mit der Software Matlab [14] wurden 22 Messungen mit verschiedenen Parameterwerten für L_o/L_t trainiert (Abbildung 11.2) und die Ausgaben für diese Werte grafisch dargestellt (Abbildung 11.3).

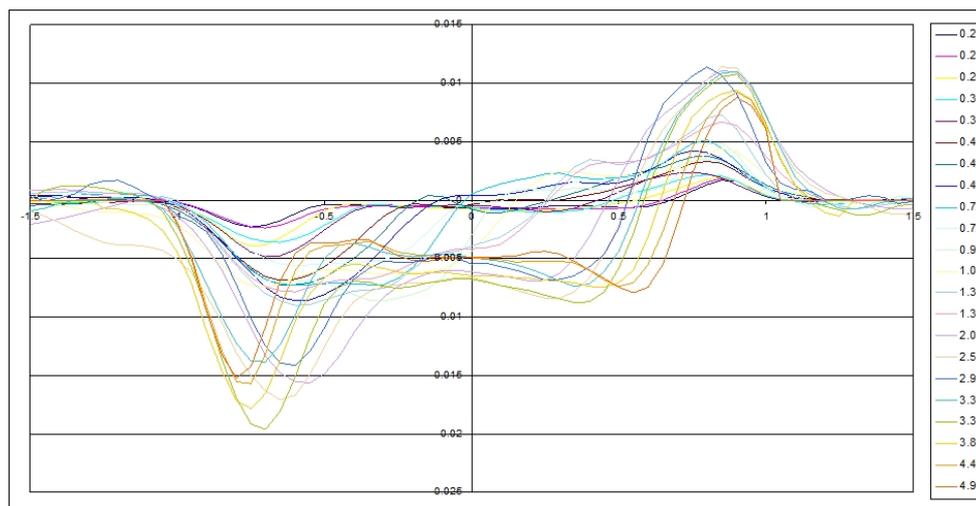


Abb. 11.2.: Ausgangsdaten für das Training des neuronalen Netzes.

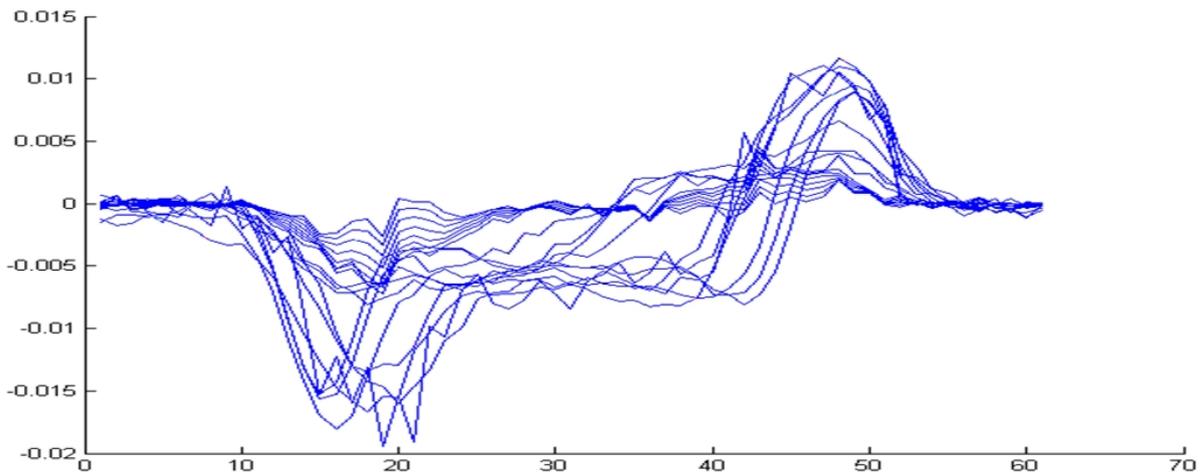


Abb. 11.3.: Ergebnis mit den Eingangsdaten für das Training.

Die grundlegende Charakteristik der Längenvariation wird mit diesem einfachen Beispiel wiedergegeben. Jedoch zeigen sich, obwohl hier nur die für das Training verwendeten Lösungen abgefragt wurden, bereits deutliche Abweichungen von den Ausgangsdaten.

In diesem Beispiel lagen für die Variation eines Parameters, also für einen 1-dimensionalen Lösungsraum, 22 Datensätze vor. Das zumodellierende Problem der Interaktion bei Passiervorgängen erfordert jedoch die Berücksichtigung von etwa 13 Parametern. Damit würde ein gleichwertig besetztes Lösungsgebiet 22^{13} Einzellösungen als Datensätze für das Training benötigen, was experimentell und numerisch nicht darstellbar ist. Das neuronale Netz müsste also für einen hochkomplexen Lösungsraum mit einer verhältnismäßig geringen Anzahl von Datensätzen trainiert werden. Auch wenn das Layout des Netzes noch viel Spielraum für Verbesserungen bietet, ist das Verhalten bei der Interpolation in dünn besetzten Gebieten oder im Falle einer Extrapolation basierend auf den derzeit vorliegenden Erfahrungen mit neuronalen Netzen nicht vorhersagbar. Eine systematische Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse ist aufgrund der Komplexität nicht möglich. Daher wurde die Modellierung der Passiereffekte mit künstlichen neuronalen Netzen hier nicht weiter verfolgt.

11.4. Hybrid-Regression

Während bei der konservativen nichtlinearen Regression (siehe Kapitel 11.1.2) für die gesamte Formel, also sowohl für die Grundkurve (bestehend aus der gedämpften har-

monischen Funktion) als auch für die multiplikativen Korrekturterme sämtliche Koeffizienten durch Regressionsverfahren ermittelt werden, ist bei der so genannten „Hybrid-Regression“ die Modellierung aus einer empirischen Grundkurve sowie multiplikativen durch Regression ermittelten Korrekturfunktionen zusammengesetzt. Es handelt sich dabei sozusagen um ein *Hybrid* aus „Empirie“ und „Regression“.

11.4.1. Einflussfunktionen

Um von den tatsächlichen dimensionsbehafteten Parametern der Modellversuche unabhängig zu werden, wurden Einflussfunktionen definiert, die die einzelnen Datensätze anstelle der eigentlichen Versuchsparameter beschreiben. Wichtig hierbei ist, dass es sich um eine dimensionslose Darstellung handelt, um die Maßstabsunabhängigkeit sicherzustellen. Des Weiteren zeichnen sich Einflussfunktionen dadurch aus, dass sie durch ihre Formulierung Nichtlinearitäten kompensieren können oder gewolltes nichtlineares Verhalten herbeiführen können. Außerdem ist es möglich sie so zu gestalten, dass sie in Extremwerten zu null oder unendlich werden oder aber im Default-Fall zu eins oder null werden.

Mögliche Faktoren, die die Schiffsinteraktion beeinflussen können, sind im Folgenden beispielhaft zusammengefasst:

- Fahrtrichtung und Überholtyp
- Abstand
- Wassertiefe
- Target-Geschwindigkeit
- Geschwindigkeitssumme
- Geschwindigkeitsdifferenz
- Verdrängung
- Völligkeit
- Längenverhältnis
- Froude-Tiefenzahl
- Froude-Zahl
- Hauptspantfläche

Im Laufe der Arbeiten zur Bildung eines mathematischen Modells für die Beschreibung der Kräfte und Momente beim Begegnen und Überholen wurde eine Reihe von potenziellen Einflussfunktionen untersucht. Nur wenige erschienen für die Modellierung der physikalischen Problemstellung als geeignet. In der folgenden Aufzählung sind die Einflussfunktionen nach Gruppen angeordnet wiedergegeben. Die Summation von 0,5 oder 1 hat den Zweck, eine Einflussfunktion in einen anderen Wertebereich zu transformieren. Dadurch wird erreicht, dass die Einflussfunktionen als Faktoren mit einem Mittelwert um 1 gebildet werden, was sich als besonders geeignet erwiesen hat. Des Weiteren wird verhindert, dass sich Werte nahe Null für die Einflussfunktionen ergeben, die mit Problemen bei der Regression verbunden sind.

Die Größe V_{\max} ist eine theoretische Maximalgeschwindigkeit, die wassertiefenabhängig ist. Basierend auf der Stauwellengeschwindigkeit ist sie folgendermaßen definiert:

$$V_{\max} = \begin{cases} \sqrt{gh} & \text{für } \frac{h}{T_m} < 3 \\ \sqrt{g \cdot 3T_m} & \text{für } \frac{h}{T_m} \geq 3 \end{cases} \quad (11.3)$$

Überholtyp

$Typ [-1 \text{ oder } 1]$

$0,5 \cdot Typ + 1$

Abstand

$(y + B_m) / B_m$

$B_m / (y + B_m)$

$B_m / (y + B_m) + 0,5$

$(y + L_m) / L_m$

$L_m / (y + L_m)$

$L_m / (y + L_m) + 0,5$

Wassertiefe

$T_m / h + 0,5$

T_m / h

$$h/T_m$$

$$T_m/(h - T_m)$$

$$h/(h - T_m)$$

$$(h - T_m)/h$$

$$(h - T_m)/T_m$$

Geschwindigkeit

$$|V_o - V_t|/(V_o + V_t)$$

$$|V_o - V_t|/(V_o + V_t) + 0,5$$

$$V_t/V_{\max}$$

$$V_t/V_{\max} + 0,5$$

$$V_t/V_{\max} + 1$$

$$V_t^2/V_{\max}^2$$

$$V_t^2/V_{\max}^2 + 0,5$$

$$(V_o \cdot T_{yp})/V_{\max} + 1$$

$$(V_o + V_t)/V_{\max}$$

$$(V_o^2 + V_t^2)/V_{\max}^2$$

Verdrängung

$$(m_o + m_t)/L_m^3$$

$$m_o/(m_o + m_t)$$

$$\sqrt[3]{m_o + m_t}/L_m$$

$$\sqrt[3]{m_o + m_t}/B_m$$

$$\sqrt[3]{m_o + m_t}/T_m$$

$$\sqrt[3]{m_o/m_t}$$

$$\sqrt[3]{m_t/m_o}$$

Völligkeit

$$C_{Bo}$$

$$C_{Bt}$$

$$C_{Bo}/C_{Bt}$$

$$C_{Bt}/C_{Bo}$$

Längenverhältnis

$$L_o/L_t$$

$$L_t/L_o$$

$$\log(1 + L_t/L_o)$$

$$|L_o - L_t|/(L_o + L_t) + 0,5$$

Froude-Tiefenzahl

$$Fr_{ho}$$

$$Fr_{ht}$$

$$Fr_{ho} + 0,5$$

$$Fr_{ht} + 0,5$$

$$Fr_{ho} + Fr_{ht}$$

$$|Fr_{ho} - Fr_{ht}|/(Fr_{ho} + Fr_{ht})$$

$$|Fr_{ho} - Fr_{ht}|/(Fr_{ho} + Fr_{ht}) + 0,5$$

Hauptspantverhältnis

$$(B_o \cdot T_o)/(B_t \cdot T_t)$$

$$(B_t \cdot T_t)/(B_o \cdot T_o)$$

Die Analyse der Ergebnisse der Korrelationsuntersuchungen hat unter Berücksichtigung einer günstigen numerischen Verteilung der Werte der Einflussfunktionen zu einer Auswahl von Funktionen geführt, die als Korrekturfunktionen Anwendung finden können. Vergleichende Betrachtungen mit Modellversuchen haben gezeigt, dass durch die ausgewählten Funktionen eine Vielzahl von physikalischen Abhängigkeiten abgedeckt

werden konnte. In der Tabelle 11.1 sind die signifikanten Einflussfunktionen tabellarisch zusammengefasst.

Tab. 11.1.: Ausgewählte Einflussfunktionen

Einflussfunktionstyp	Funktion
Abstandseinfluss	$B_m / (y + B_m) + 0,5$
Wassertiefeneinfluss	$T_m / h + 0,5$
Einfluss der Geschwindigkeit beider Schiffe	$(V_o^2 + V_t^2) / V_{\max}^2$
Wassertiefenabhängige Geschwindigkeit des Target Ships	$Fr_{ht} + 0,5$
Einfluss der Hauptspantflächen	$(B_o \cdot T_o) / (B_t \cdot T_t)$
Einfluss der unterschiedlichen Längen	L_t / L_o

11.4.2. Grundkurven

Für die strukturierte Durchführung der Modellversuche zur Bildung einer Datenbasis für die mathematische Modellierung wurden Variationsmatrizen aufgestellt. Innerhalb dieser Systematik wurden die Wassertiefe, die seitlichen Abstände der Schiffe, die Schiffstypen sowie die Geschwindigkeiten des Own bzw. Target Ships variiert.

Tab. 11.2.: Anzahl der Variationen der einzelnen Parameter

Variationsparameter	Anzahl der Variationen
Wassertiefe	3
Seitenabstand	3
Geschwindigkeiten Own Ship	3
Geschwindigkeiten Target Ship	2
Schiffstypen	Post-Panmax Panmax Fähre Feeder

Die Tabelle 11.2 gibt die Anzahl der Variationen der Einzelparameter wieder. Die Anzahl der Versuche ergibt sich aus der Kombination aller Einzelparameter.

Die Liste der variablen Parameter umfasst entsprechend der Variationsmatrix:

$$h, y, V_o, V_t, L_o, L_t, B_o, B_t, T_o, T_t, C_{Bo}, C_{Bt}$$

Eine Betrachtung der Ergebniskurven zeigte, dass bei praktisch allen Ergebnissen sehr ähnliche Kurvenverläufe zu finden waren, wie sie auch mit einer gedämpften harmonischen Funktion (wie bei der nichtlinearen Regression dargestellt) nachzubilden wären. Bei einer Versuchsserie jedoch, die zusätzlich zur Versuchsmatrix durchgeführt wurde, wiesen die Kurven einen deutlich davon abweichenden Verlauf auf. Diese Serie hatte zum Ziel, den Einfluss der Geschwindigkeit des Eigenschiffes bei konstanter Geschwindigkeit des Targetschiffs genauer zu untersuchen.

Ausgehend vom Fall

- „TS überholt OS mit sehr geringer Differenz“
über den Fall
- „TS fährt an stillliegendem OS vorbei“
bis hin zum Fall
- „TS begegnet OS mit gleicher Geschwindigkeit“

wurden Messungen mit abnehmender Geschwindigkeit des OS durchgeführt. Beim Fall des stillliegenden OS wurde dieses in beiden Fahrtrichtungen untersucht und daraufhin die Geschwindigkeit erhöht. Um diese bei realen Manövrieren oft auftretende „Geschwindigkeitsvariation“ korrekt zu erfassen, wurden für die Kräfte und Momente spezielle Kurven modelliert. Diese empirische Modellierung, die im Folgenden beschrieben wird, ist der empirische Anteil - die Grundkurve - der Hybrid-Regression.

11.4.2.1. Vorgehensweise für die Erzeugung der Grundkurve am Beispiel des Giermomentes N'

In Abbildung 11.4 sind die Messungen des Giermomentes des OS der oben beschriebenen „Geschwindigkeitsvariation“ über der relativen Passierzeit t_r aufgetragen. Der Parameter der einzelnen Kurven ist die Geschwindigkeit des OS, hier angegeben in km/h. Positive Werte bezeichnen Überholen, negative Werte Begegnen. Die zwei fett dargestellten Kurven sind die Fälle des stillliegenden Schiffes, einmal in Fahrtrichtung des TS und einmal entgegen.

Bei der Analyse der Kurven zeigt sich ein relativ homogener Übergang vom Überholen mit hoher Geschwindigkeit des OS bis hin zum Stillliegen. Die Abnahme der Amplituden (Maxima und Minima) geht einher mit einer Verschiebung dieser Werte und des Nulldurchgangs. Während im negativen Bereich vom t_r beim Begegnen das Maximum anwächst, geht die Wirkung im positiven Bereich fast vollkommen verloren.

Es ist zu beachten, dass die echte Passierzeit über die Änderung des Parameters stetig abnimmt. Während ein Überholvorgang mit geringer Differenzgeschwindigkeit relativ lange dauert, ist das Begegnen mit hohen Geschwindigkeiten in sehr kurzer Zeit beendet. Das „Zappeln“ der Begegnungskurven ist höchstwahrscheinlich auf die Wechselwirkung der sekundären Wellensysteme zurückzuführen, die beim Begegnen etwa ab $t_r = -0,2$ miteinander interagieren. Dies wird aber in dieser Analyse vernachlässigt (weggeglättet).

Folgende Statements führen aus den Messdaten zu einer „Grundkurve“:

- Außerhalb von $t_r = \pm 1,25$ ist die Wirkung klein und vernachlässigbar.
- Es gibt sowohl im positiven als auch im negativen Bereich von t_r Maxima und Minima.
- Die Peaks und deren Positionen verändern sich gleichmäßig mit dem Parameter ΔV .

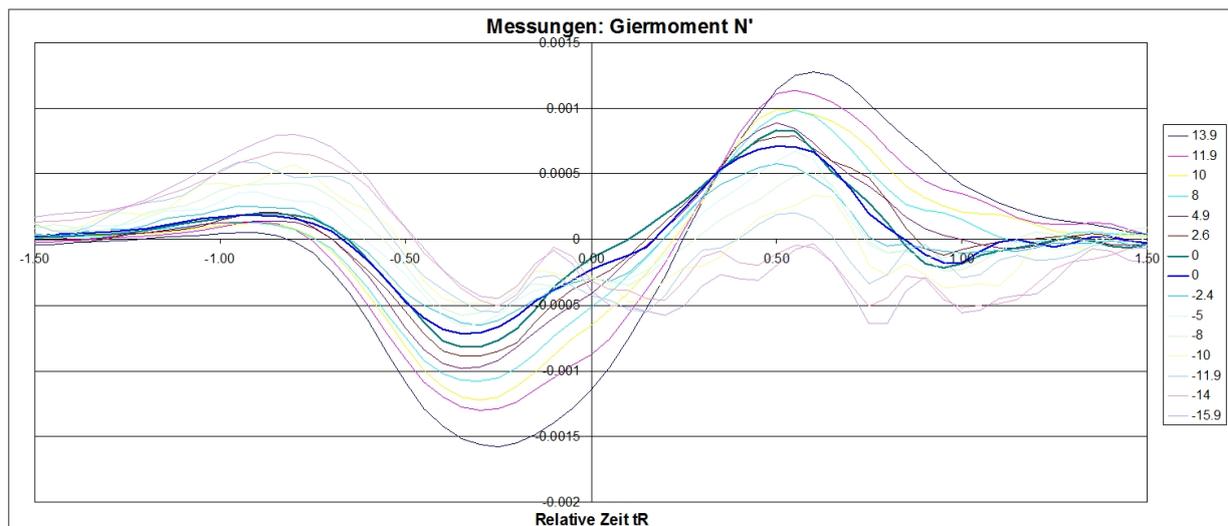


Abb. 11.4.: Ausgangsdaten für die Generierung der Grundkurve.

11.4.2.2. Empirische Beschreibung der Grundkurve

Aus diesen drei Charakteristika wird die Grundkurve in Abhängigkeit vom Parameter entwickelt. Statt der tatsächlichen Geschwindigkeit wird die dimensionslose Einflussgröße „Froude-Tiefenzahl“ des Own Ships verwendet. Im Fall des Überholens ist sie positiv, im Fall des Begegnens negativ definiert.

$$Fr_{ho} = \frac{V_o}{\sqrt{g \cdot L_o}} \quad (11.4)$$

Auch wenn im Fall des Giermomentes kein signifikantes Minimum im positiven Bereich zu finden ist, wurden für alle Komponenten X, Y und N folgende Charakteristika erfasst:

- Betrag des Minimums im negativen Bereich MinM
- Position des Minimums im negativen Bereich xMinM
- Betrag des Maximums im negativen Bereich MaxM
- Position des Maximums im negativen Bereich xMaxM
- Betrag des Minimums im positiven Bereich MinP
- Position des Minimums im positiven Bereich xMinP
- Betrag des Maximums im positiven Bereich MaxP
- Position des Maximums im positiven Bereich xMaxP

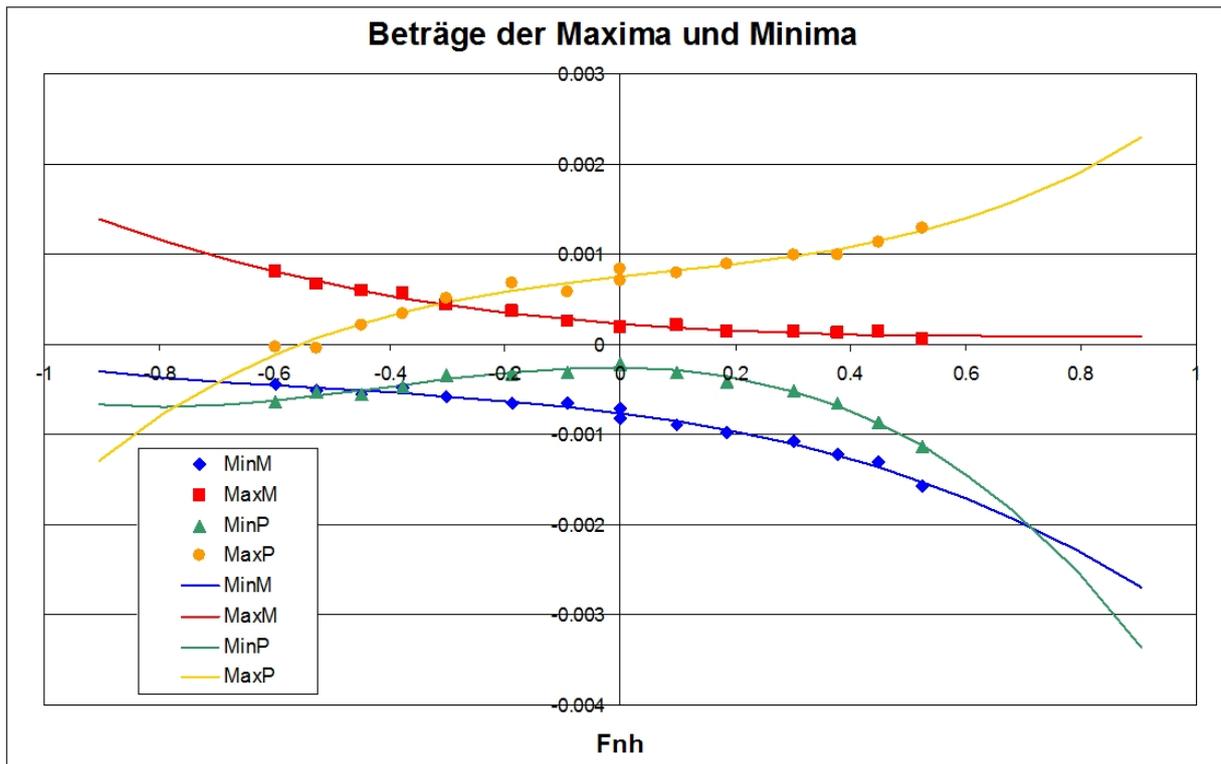


Abb. 11.5.: Charakteristika der Giermomente bei der Geschwindigkeitsvariation: Beträge.

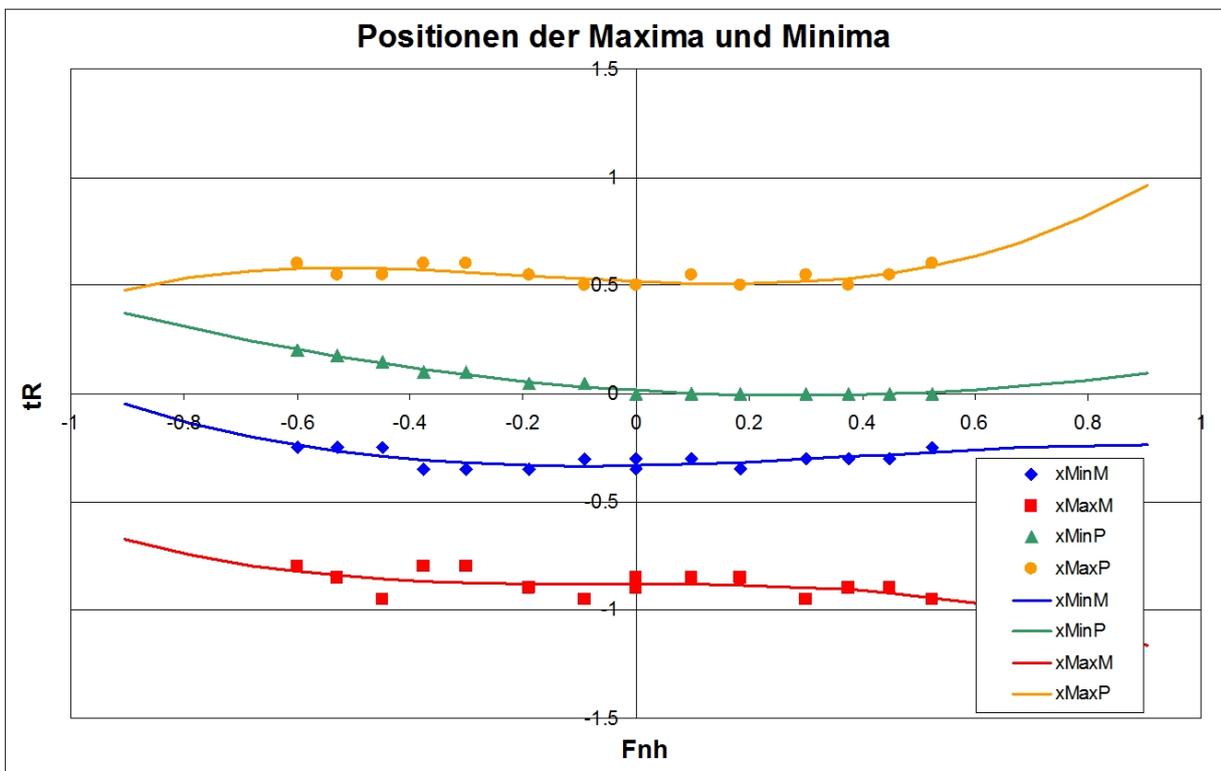


Abb. 11.6.: Charakteristika der Giermomente bei der Geschwindigkeitsvariation: Positionen.

Mit der Tabellenkalkulationssoftware MS-Excel wurden aus den Daten die Beträge und die Positionen der Minima und Maxima sowohl im positiven als auch im negativen Bereich bestimmt. Die Auftragungen der Ergebnisse sind in Abbildung 11.5 und Abbildung 11.6 wiedergegeben. Durch eine in VBA geschriebene Routine wurden die Koeffizienten der kubischen Approximationsfunktionen berechnet und gleich als Visual Basic-Statement angezeigt. Die Polynome sind in den Abbildungen als Kurven zu den Datenpunkten dargestellt, die Formulierung ist unten wiedergegeben.

Listing 11.1: Auszug aus dem VBA-Quellcode: Kubische Polynome für die Stützpunkte des Giermomentenverlaufs

```

MinM=-0,0006178*Frho^3+-0,0008989*Frho^2+-0,0008216*Frho+-0,0007626
MaxM=-0,0002721*Frho^3+0,0006177*Frho^2+-0,0004969*Frho+0,0002235
MinP=-0,0017470*Frho^3+-0,0021433*Frho^2+-0,0000550*Frho+-0,0002627
MaxP=0,0015598*Frho^3+-0,0003002*Frho^2+0,0006993*Frho+0,0007443
xMinM=-0,1852311*Frho^3+0,2331850*Frho^2+0,0486178*Frho+-0,3331092
xMinP=0,0042412*Frho^3+0,2687708*Frho^2+-0,1580784*Frho+0,0152978
xMaxM=-0,3189107*Frho^3+-0,0449874*Frho^2+-0,0092488*Frho+-0,8794135
xMaxP=0,4730224*Frho^3+0,2495195*Frho^2+-0,1208743*Frho+0,5176714

```

Mit diesen Kontrollpunkten in Abhängigkeit vom Parameter Frho kann der Verlauf des Giermomentes stückweise durch Funktionen zwischen den Punkten aufgebaut werden. Dabei handelt es sich um kubische Polynome mit horizontalen Tangenten an den Kontrollpunkten, welche durch die Funktion „IntKub12“ berechnet werden.

Es sind auch andere Interpolationsfunktionen möglich:

- **IntLin:** durch eine Gerade
- **IntQuad1:** durch ein quadratisches Polynom mit horizontaler Tangente rechts
- **IntQuad2:** durch ein quadratisches Polynom mit horizontaler Tangente links
- **IntKub12:** durch ein kubisches Polynom mit zwei horizontalen Tangenten

In Abbildung 11.7 sind die Verläufe dieser 4 verschiedenen Interpolationsformen für die Punkte P1=(0|0) und P2=(10|10) wiedergegeben.

Für das Giermoment werden die Funktionen zwischen den Kontrollpunkten mit den durch die Polynome berechneten Werten durch das unten wiedergegebene Programmfragment berechnet.

Listing 11.2: Auszug aus dem VBA-Quellcode: Abschnittsweise Definition des Giermomentenverlaufs

```

If X < -1,3 Then Erg = 0
If X >= -1,3 And X < xMaxM Then Erg = IntKub12(-1,3, 0, xMaxM, MaxM, X)
If X >= xMaxM And X < xMinM Then Erg = IntKub12(xMaxM, MaxM, xMinM, MinM, X)
If X >= xMinM And X < xMaxP Then Erg = IntKub12(xMinM, MinM, xMaxP, MaxP, X)

```

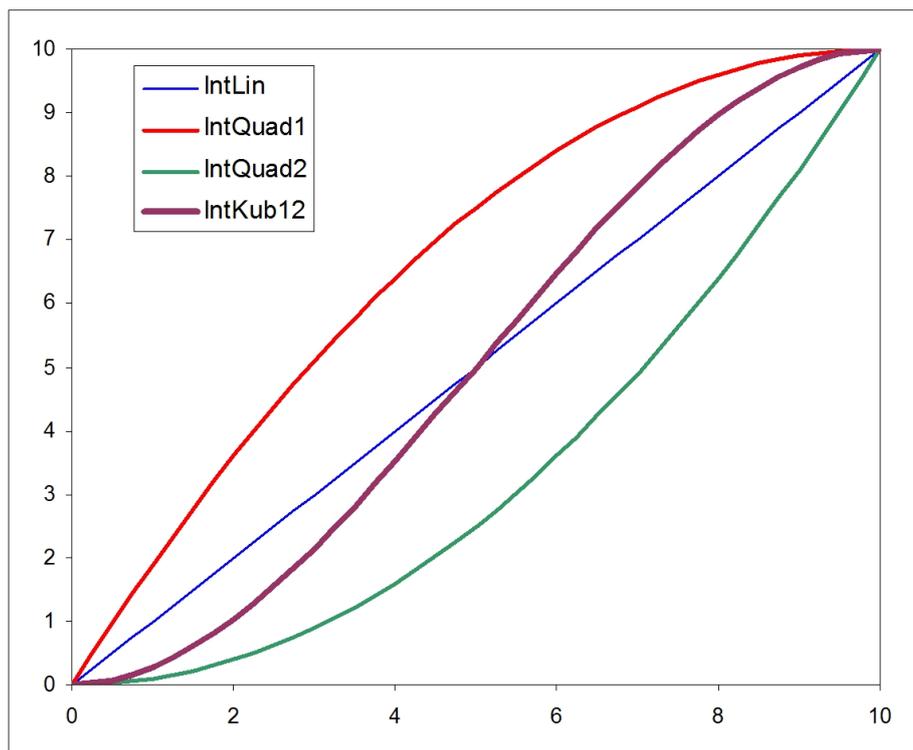


Abb. 11.7.: Interpolation bei den Segmenten der Grundkurve.

```

If X >= xMaxP And X < 1,3 Then Erg = IntKub12(xMaxP, MaxP, 1,3, 0, X)
If X >= 1,3 Then Erg = 0

```

Die Resultate für die Grundfunktion sind in Abbildung 11.8 dargestellt. Für die anderen Kurventypen X, Y und N wurde prinzipiell gleich vorgegangen. Entsprechend der Charakteristika der Kurven jedoch wurden die Teilstücke bzw. die Anfangs- und Endpunkte individuell formuliert.

Da die Versuche zur Geschwindigkeitsvariation alle bei konstanten Werten für Wassertiefe, Seitenabstand, Länge, Breite, Tiefgang und Blockkoeffizient durchgeführt wurden, wurden die Einflussfunktionen referenziert. Das bedeutet, dass sie auf den Wert der jeweiligen Einflussfunktion bezogen werden, der für die Geschwindigkeitsvariation gültig war. Dies geschieht durch Division durch diesen Wert, damit alle Einflussfunktionen, die nicht den Parameter V_o (Geschwindigkeit des Own Ships) enthalten, für die Geschwindigkeitsvariation zu 1 werden.

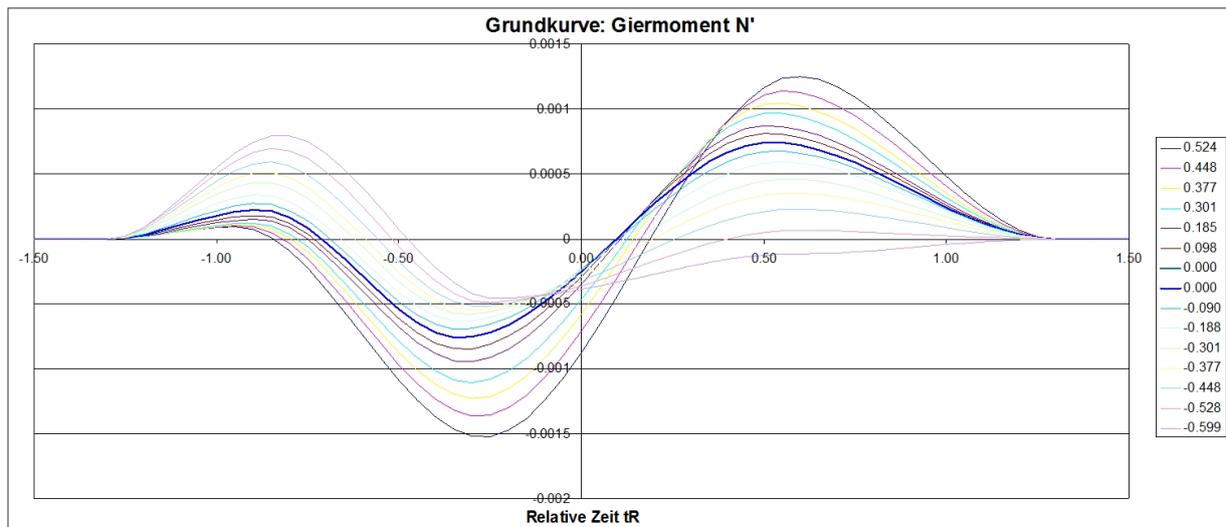


Abb. 11.8.: Modellierung der Grundkurve (Giermoment N).

11.4.3. Korrekturen

Für die Berechnung der Korrekturfunktionen wurde das Verfahren der nichtlinearen Regression (NLR) herangezogen. Für jeden zu berücksichtigenden Einfluss wurde aus der Liste der durchgeführten Modellversuche eine Serie von Experimenten ausgewählt, bei der genau dieser Einfluss variiert wurde. Dies gilt vorrangig für zwei Einflüsse: Die Wassertiefe h und den Seitenabstand y .

Für alle 3 Komponenten X, Y und N wurde mit einer allgemeinen Formel, die die generelle Charakteristik der Kurven der 3 Komponenten erfassen kann, eine Regression durchgeführt, um den Exponenten der betreffenden Einflussfunktion zu bestimmen. Die allgemeine Formel lautet:

$$F = A \cdot \text{Einflussfunktion}^{\text{Exponent}} \cdot \sin(\omega \cdot t_r + \phi) \cdot e^{-1,5 \cdot |t_r|^3}$$

11.4.3.1. Abhängigkeit vom Seitenabstand

Je größer der Abstand, umso geringer die Wirkung – ab einem bestimmten Abstand ist sie vernachlässigbar.

Eine sinnvolle Einflussfunktion ist $B_m / (y + B_m)$, der Referenzwert dazu beträgt 0,4487. Es handelt sich dabei um den lichten Abstand zwischen den Bordwänden und nicht um den Abstand der Spuren beider Schiffe.

Die Regression mit der allgemeinen Form der Korrekturfunktion und der gewählten Einflussfunktion, basierend auf einer speziellen Versuchsserie, bei der der Seitenabstand in sieben Schritten variiert wurde, ergab für die Exponenten:

	$[B_m/(y+B_m)] / 0,4487$
X	1,000317
Y	0,8410476
N	1,181053

11.4.3.2. Wassertiefenabhängigkeit

Mit zunehmender Wassertiefe verringert sich der Einfluss des Überholers, verschwindet aber auch bei tiefem Wasser nicht.

Für dieses Statement könnte die Einflussfunktion

$$T_m/h + 0,5$$

verwendet werden. Allerdings macht die Definition eines Wertes für sehr große Wassertiefen, der nicht zu null wird, Probleme bei der Regression eines Exponenten für diese Funktion. Aus diesem Grund wird eine ganz andere Form der Modellierung vorgezogen.

Aus einer Versuchsserie, bei der für eine Modellpaarung vier Wassertiefen untersucht worden sind, wurden die Fahrten ausgewählt, bei denen das TS eine gleiche Geschwindigkeit fuhr. Für diese 13 Versuchsfahrten wurden die Peaks der Größen X, Y und N über dem Parameter T_m/h aufgetragen. Das Ergebnis für die Kräfte und Momente ist in Abbildung 11.9 wiedergegeben. Dabei sind die Kurven durch Regression mit der Formel

$$F = C_o + C_n \cdot (T_m/h)^n$$

entstanden, wobei sich als bester Exponent der Wert $n=3$ herausstellte. Auf diese Weise ist eine Extrapolation zu unendlicher Wassertiefe möglich.

Eine Normierung auf die Wassertiefe T_m/h der Versuche zur Grundkurve ergab die Darstellung in Abbildung 11.10. Hier sind durch Bezug auf die jeweiligen Daten der Referenzwassertiefe auch die negativen Peaks positiv geworden.

Die Koeffizienten dieser Kurve sind:

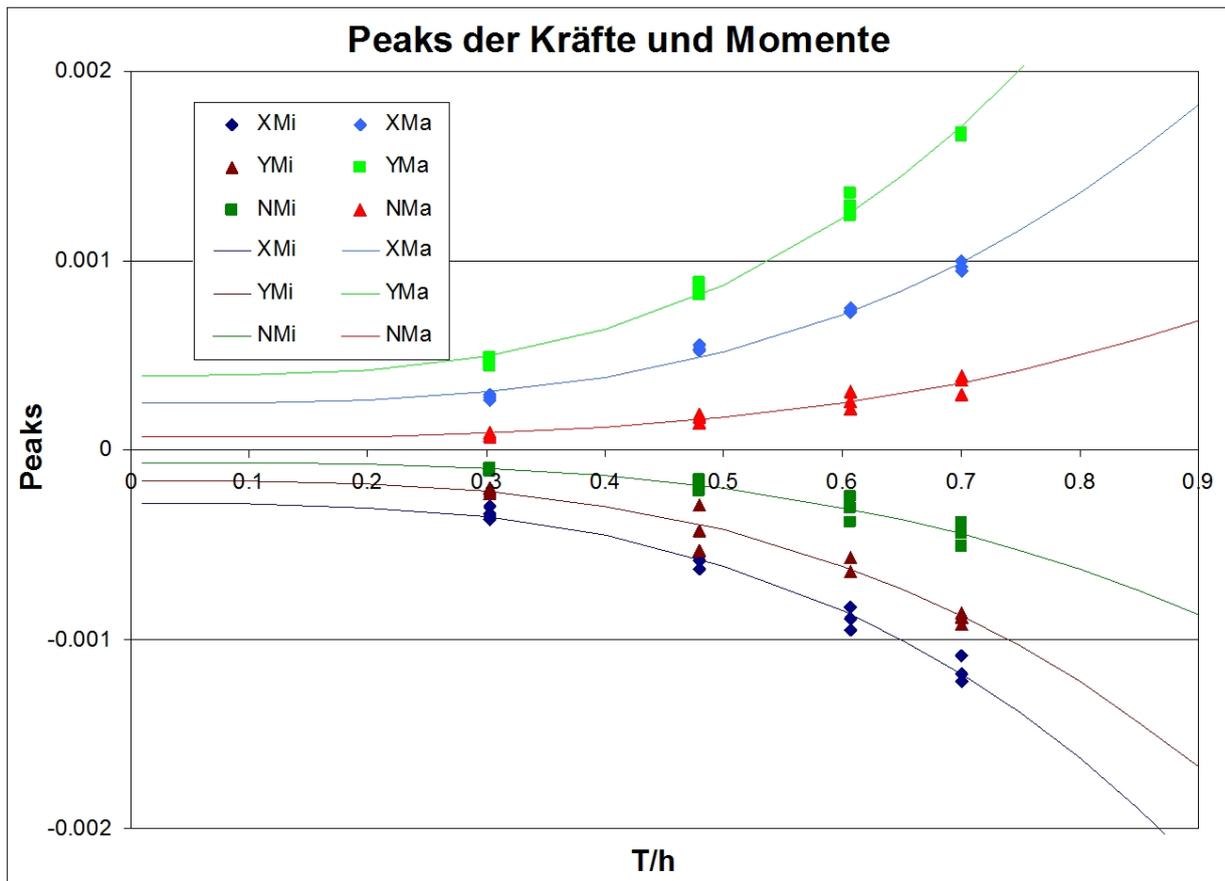


Abb. 11.9.: Wassertiefenabhängigkeit der Amplituden von X, Y und N.

$$C_0 \quad 0,407829$$

$$C_n \quad 4,786445$$

Damit wird die Wassertiefenkorrektur zu $F = 0,407829 + 4,786445 \cdot (T_m/h)^3$.

Es ist zu beachten, dass es sich hier nicht um die referenzierte Einflussgröße handelt (die ja bei der Grundkurve den Wert 1 aufweist), sondern um den tatsächlichen Wert, also das Verhältnis mittlerer Tiefgang zu Wassertiefe. Da aber schon vorher auf den Wert T_m/h der Grundkurve normiert wurde, liefert diese Funktion erwartungsgemäß für das Wassertiefen-Tiefgangs-Verhältnis der Grundkurve den Wert 1.

11.4.3.3. Weitere Einflüsse

Im Gegensatz zu den bisher bestimmten Einflüssen sind alle weiteren Korrekturen eher als „diffus“ zu bezeichnen. Damit ist gemeint, dass wegen der relativ starren Anordnung des Versuchsprogramms in Form einer Matrix für bestimmte Einflüsse keine spezielle Versuchsserie identifiziert werden kann. Dies ist aber auch rein technisch nicht möglich,

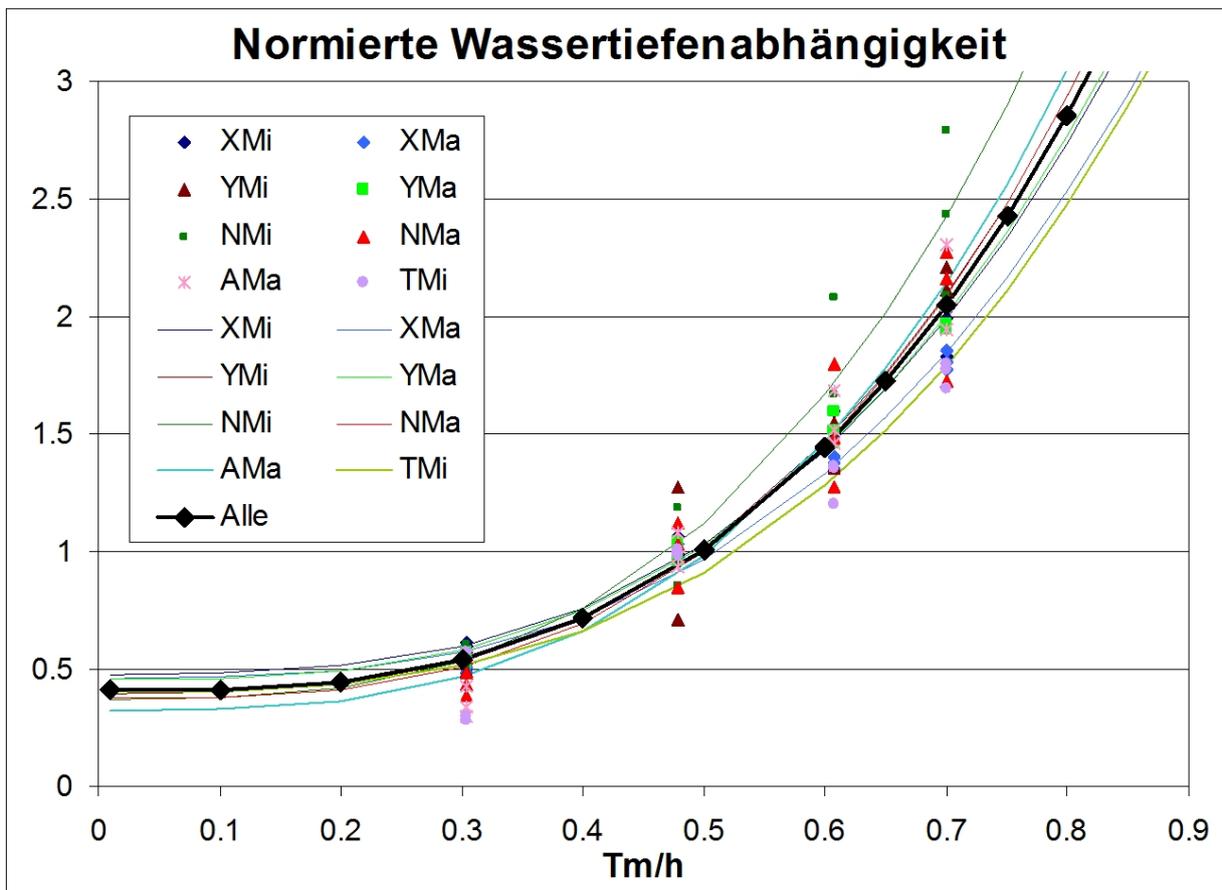


Abb. 11.10.: Normierte Wassertiefenabhängigkeit der Amplituden.

denn z.B. für eine Untersuchung der Abhängigkeit von der Länge der Schiffe müssten relativ viele gleiche Modelle mit unterschiedlichen Längen untersucht werden.

Die noch verbleibenden Einflüsse sind:

Einfluss der Geschwindigkeit beider Schiffe $(V_o^2 + V_t^2) / V_{\max}^2$

Wassertiefenabhängige Geschwindigkeit des Target Ships $Fr_{h_t} + 0,5$

Einfluss der Hauptspantflächen $(B_o \cdot T_o) / (B_t \cdot T_t)$

Einfluss der unterschiedlichen Längen L_t / L_o

Für die Regression wurden alle Daten verwendet, die beiden Einflüsse „Abstand“ und „Wassertiefe“ als bekannt gesetzt und auch die bisher vorgegebenen Werte

- ω = Frequenz der Schwingung
- ϕ = Phasenverschiebung
- e = Exponent der Dämpfungsfunktion

in die Regression einbezogen, um die Genauigkeit zu erhöhen.

Das Ergebnis aller Korrekturen sind Faktoren, die in Abhängigkeit der jeweiligen Einflüsse die Grundkurve zusätzlich zu den schon identifizierten Einflüssen modifizieren. Die folgende Tabelle gibt die Exponenten der Korrekturfunktionen wieder.

	X	Y	N
$\frac{V_o^2 + V_t^2}{V_{max}^2} \cdot \frac{V_o^2 + 1,456^2}{2,159^2}$	1,015291	1,015669	1,014322
$\frac{Fr_{ht} + 0,5}{1,1745}$	1,005203	1,004766	1,006463
$\frac{B_o \cdot T_o}{B_t \cdot T_t} \cdot \frac{1}{0,4537}$	1,001776	1,002211	1,002362
$\frac{L_t}{L_o} \cdot \frac{1}{1,8190}$	1,010886	1,011716	1,011882

Die erste Korrektur stellt bezüglich der Referenzierung eine Besonderheit dar. In der Formel tauchen zwei Größen auf, die bei der Bestimmung der Grundkurve konstant waren: die Geschwindigkeit des Target Ships sowie die Wassertiefe, die für die Berechnung von V_{max} ausschlaggebend ist. Die in der Grundkurve variable Größe taucht jedoch auch auf. Aus diesem Grund ist hier nicht von einem Referenzwert, sondern einer Referenzfunktion zu sprechen.

Bei der Prüfung der Anwendbarkeit hat sich gezeigt, dass eine Skalierung auf die Großausführung wegen der Verwendung von Modellwerten bei der Referenzierung zu Problemen führte. Dies betrifft die Funktion $(V_o^2 + V_t^2) / V_{max}^2$, bei der sowohl die Geschwindigkeit des TS als auch die Stauwellengeschwindigkeit explizit angegeben sind.

Aus diesem Grund wurde statt dessen die Froudezahl verwendet, die maßstabsunabhängig die Geschwindigkeit repräsentiert. Für die Geschwindigkeit V_t wurde Fr_t und für V_{max} wurde Fr_{max} verwendet. Dies ist die Froudezahl der Geschwindigkeit V_{max} , wobei als Länge die mittlere Länge L_m von OS und TS benutzt wird.

Zusätzlich wurde eine Einflussfunktion für das Massenverhältnis eingeführt. Damit werden folgende Funktionen benutzt:

- Einfluss des lichten Abstandes $B_m / (y + B_m)$
- Einfluss der Geschwindigkeit beider Schiffe $(Fr_o^2 + Fr_t^2) / Fr_{max}^2$
- Einfluss der Massen $\sqrt[3]{m_o + m_t} / L_m$

- Wassertiefenabhängige Geschwindigkeit des Target Ships $Fr_{ht} + 0,5$
- Einfluss der Hauptspantflächen $(B_o \cdot T_o)/(B_t \cdot T_t)$
- Einfluss der unterschiedlichen Längen L_t/L_o

12. Testprogramm für das Kräftemodell

Laut Projektantrag SIPAS-MAP war in Arbeitspaket 240 vorgesehen, dass das DST eine eigene Software zur Bewegungssimulation programmiert. Diese sollte zum Testen der erstellten Modellierung der Passierkräfte verwendet werden. In Absprache mit den Partnern wurde darauf jedoch verzichtet, da es nicht sinnvoll erschien, zur existierenden Simulationssoftware ANS5000 des Projektpartners RDE eine Konkurrenzsoftware zu entwickeln. Statt dessen lieferte das DST wertvolle Unterstützung bei der Implementierung des neuen Passiermoduls in das Programm ANS5000 und entwickelte ein Testprogramm für die detaillierte Analyse von Passiersituationen. Dieses berechnet die Grundkurve sowie die angegebenen Korrekturen unter Berücksichtigung der verschiedenen Situationsparameter.

12.1. Berücksichtigung des Begegnungswinkels

Beim Einsatz in der Software des Simulators ist der Fall des Parallel-Passierens ein Sonderfall - im Allgemeinen ist davon auszugehen, dass zwei Schiffe nie exakt den gleichen Kurs haben. Im Fall des Überholens bzw. Begegnens, der in den Modellversuchen eingehend untersucht wurde, haben die Schiffe immer den gleichen oder einen um fast 180° verschiedenen Kurs und die bisher erstellte Modellierung kann ohne große Fehler korrekt eingesetzt werden. In der Praxis des Schiffsverkehrs ist jedoch auch mit sich kreuzenden Kursen zu rechnen und es ist darum vorzusehen, dass auch für diese Situationen plausible Interaktionskräfte und Momente berechnet werden können. Um den Anspruch des „Schrägpassierens“ zu erfüllen, wurde gemäß folgender Überlegung der Kursunterschied berücksichtigt.

Für den Fall von zwei Schiffen mit beliebigen Kursen wird zunächst der Kraftvektor berechnet. Dies geschieht durch Rückschluss auf eine parallele Passiersituation, bei der das OS die gleiche Peilung und den gleichen Abstand vom TS hat wie in der zu

untersuchenden Schrägpassiersituation. Dann wird das OS aus der parallelen Position auf seine tatsächliche Kurslinie gedreht, ohne den Kraftvektor zu verändern. Dies ist gleichbedeutend mit einer entgegengesetzten Drehung des Kraftvektors aus Sicht des OS und damit der Wirkungen von X und Y auf das OS. Bei einer Kursdifferenz von 90° führt dies dazu, dass die Anteile X und Y vertauscht werden.

Dies erfolgt immer aus der Betrachtungsweise des OS, indem das OS um den Winkel ψ_{OS} parallel zum TS gedreht wird um die Passiereffekte zu berechnen - nicht umgekehrt, da das Primärwellensystem des TS das OS beeinflusst und dieses in seiner Lage nicht durch eine virtuelle Drehung des TS verändert werden darf. Dann wird das parallel fahrende OS um $-\psi_{OS}$ zurückgedreht bzw. der berechnete Kraftvektor im System des OS um $+\psi_{OS}$ hingedreht.

Beim Wechsel der Betrachtungsweise (Tausch OS / TS) ändert sich der in der Berechnung verwendete lichte Abstand, denn er wird in dieser Modellierung immer lotrecht zur Achse des TS gemessen. Es handelt sich bei dieser Vertauschung jedoch bezüglich der Kraftwirkungen um ganz verschiedene Passiersituationen. Dieser etwas komplizierte Gedankengang wird in der folgenden Abbildung 12.1 dargestellt, bei der auch der in den Berechnungen verwendete „lichte Abstand“ angezeigt wird.

Eine zusätzliche Korrektur des Betrags des Kraftvektors wird aus der Betrachtung der projizierten Flächen (Lateralfäche und Hauptspantfläche) abgeleitet. Sie beruht auf der Annahme, dass die Intensität der Kraftwirkung proportional zur projizierten Fläche des OS auf den Kurs des TS ist. Die Drehung des OS bewirkt (nach einem geringen Anstieg, der abhängig ist vom Verhältnis L/B) einen Abfall vom Maximalwert des Betrags des Vektors bei der Parallelfahrt auf einen Minimalwert in Höhe von B/L des Maximalwertes. So ist bei einer Kursdifferenz von 90° die Interaktionswirkung am geringsten.

Das Giermoment N wird ebenfalls so modifiziert, dass es für Parallelfahrt maximal und für 90° Kursdifferenz entsprechend des Verhältnisses B/L minimal wird. Je nach Position des TS zum OS (TS an Steuerbord oder Backbord) wird die Passierseite durch ein Vorzeichen bei der Seitenkraft Y und beim Giermoment N berücksichtigt.

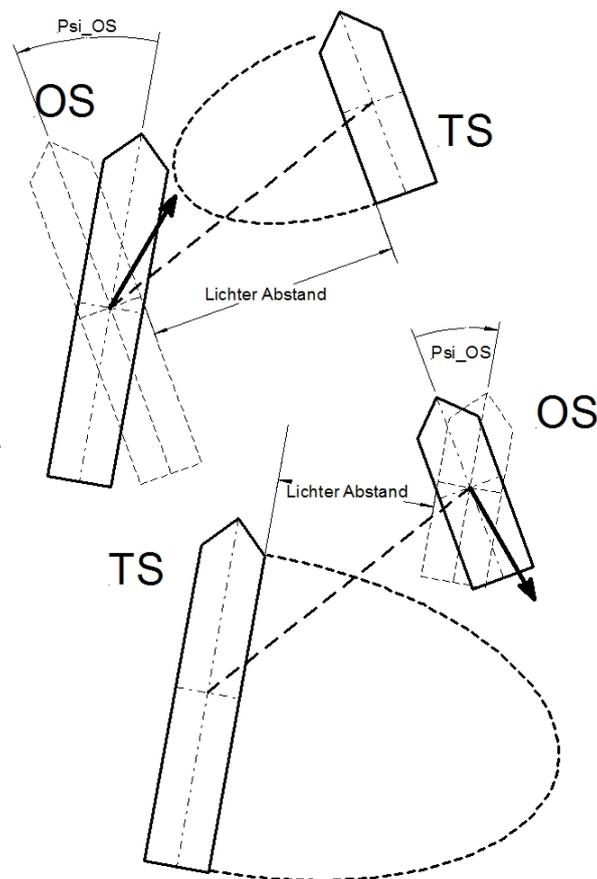


Abb. 12.1.: OS-Drehung beim Schrägpassieren.

12.2. Dynamische Programmierung

Ein großer Nachteil bei der Implementierung des Passing-Ship-Einflusses mit Grundkurven und Korrekturen auf der Basis von Einflussfunktionen ist die starre Fixierung auf fertige Formeln mit fest in der Software verankerten Koeffizienten. Dies ist vor allem für spätere Weiterentwicklungen hinderlich.

Aus diesem Grund wurde die Software so geschrieben, dass alle Informationen für die Grundkurve und die korrigierenden Einflussfunktionen beim Start des Programms eingelesen werden und ein Softwaregerüst damit die Berechnungen durchführen kann. Eine Änderung der Modellierung kann dann vollständig von außen durch Modifikation der im Startdatensatz beschriebenen Grundfunktion und der Einflussfunktionen durchgeführt werden. Hierzu sind verschiedene Schritte erforderlich.

12.2.1. Allgemeine Formulierung der Grundkurve

Die Grundkurve wird aus einem Anfang, einem Ende und je nach Bedarf aus positiven und negativen Maxima und Minima gestaltet. Diese maximal vier Punkte werden bezüglich ihrer Abszisse und ihrer Ordinate durch kubische Polynome über eine Laufvariable (hier $Fr_o \cdot Typ$) berechnet. Die folgende Aufzählung beschreibt die für die Berechnung der Grundkurve erforderlichen Informationen.

- Eine Grundkurve besteht aus N Segmenten. Diese werden durch N+1 Punkte definiert. Maximal 9 Segmente sind möglich.
- Alle Punkte der Grundkurve werden durch kubische Polynome über die Laufvariable definiert. Der Anfangspunkt bei $t_r = -1,3$ hat z.B. die Polynomkoeffizienten für die Abszisse $a_0 = -1,3$, $a_1 = 0$, $a_2 = 0$ und $a_3 = 0$ und für die Ordinate $b_0 = 0$, $b_1 = 0$, $b_2 = 0$ und $b_3 = 0$.
- Für jedes Segment wird festgelegt, wie die zwei Endpunkte miteinander verbunden werden sollen: Gerade, quadratisches Polynom mit horizontaler Tangente rechts bzw. links oder kubisches Polynom (siehe Kapitel 11.4.2.2, Abbildung 11.7)

Die Informationen für die drei Grundkurven werden in einem sequentiellen Datensatz (im Testprogramm mit der Extension „HyGK“) abgelegt, die bei Programmstart eingelesen werden. Die in Tabelle 12.1 blau geschriebenen Zellen beinhalten die Informationen für die Grundkurve.

Tab. 12.1.: Koeffizienten der Grundkurve

Kurve	Punkt	0	1	2	3
X		XAnzSeg			
	0	X0xKoeff0	X0xKoeff1	X0xKoeff2	X0xKoeff3
	0	X0yKoeff0	X0yKoeff1	X0yKoeff2	X0yKoeff3
	1	X1xKoeff0	X1xKoeff1	X1xKoeff2	X1xKoeff3
	1	X1yKoeff0	X1yKoeff1	X1yKoeff2	X1yKoeff3
		mTyp1			
	2	X2xKoeff0	X2xKoeff1	X2xKoeff2	X2xKoeff3
	2	X2yKoeff0	X2yKoeff1	X2yKoeff2	X2yKoeff3
		mTyp2			

	n	XnxKoeff0	XnxKoeff1	XnxKoeff2	XnxKoeff3
	n	XnyKoeff0	XnyKoeff1	XnyKoeff2	XnyKoeff3
		mTypn			

Es gelten folgende Regeln für den Datensatz:

- 3 Datenpakete für die 3 Grundkurven
- Jedes Datenpaket beginnt mit der Anzahl N der Segmente
- Jeder Punkt (0 bis N) wird durch 2 Zeilen beschrieben:
Zeile 1 enthält die Polynomkoeffizienten für die Abszisse.
Zeile 2 enthält die Polynomkoeffizienten für die Ordinate.
- Die Polynomkoeffizienten bestehen aus den 4 Anteilen
konstant, linear, quadratisch und kubisch
- Nach jedem Punkt (außer dem ersten mit dem Index 0) wird die Nummer der Interpolationsformel (s.o.) eingelesen

Vor den 3 Datenpaketen für die Beschreibung der Grundkurven wird noch die Formel für die Laufvariable der Grundkurve eingelesen. Dazu mehr im nächsten Abschnitt (Kapitel 12.2.2, Beispiel 1).

Zusätzlich sind nach dem Datenpaket für die Formel (Laufvariable der Grundkurve) zwei Zahlen einzulesen, die den Minimalwert und den Maximalwert für die mit der Formel berechnete Laufvariable angeben. Dies ist erforderlich, um bei extremen Parameterwerten eine sinnvolle Grenze anzugeben, denn kubische Polynome haben die Tendenz, außerhalb des durch Daten gestützten Bereiches extreme Werte anzunehmen. Diese Limitierung musste eingeführt werden, um die Stabilität der Berechnung und die Plausibilität der Ergebnisse zu gewährleisten.

12.2.2. Grundlagen zum Formelparser

Es ist generell ein Problem, einem Programm eine mathematische Formel zur Verarbeitung einzugeben - nicht als codierte Berechnungsanweisung im Source-Code, sondern flexibel als variable Berechnungsanweisung. Die Software muss dazu über einen so genannten Formelparser verfügen, der die als Textzeile geschriebene Formel analysiert und dann das Ergebnis berechnet.

Im Datenbankprogramm zur Durchführung der nichtlinearen Regressionen für die Überhol- und Begegnungsformeln ist ein derartiger Formelparser implementiert. Er besteht aus drei Elementen:

Testparser Er ersetzt alle als Buchstabenfolgen angegebenen Variablen in der Formel durch „1“, zerlegt die Formel schrittweise von innen nach außen und berechnet das Ergebnis. Damit wird die Syntax der Formel geprüft.

Teachparser Er analysiert die Formel von innen nach außen ohne zu rechnen und speichert die Rechenschritte als Tabelle mit Arbeitsanweisungen ab. Er ist Voraussetzung für den Rechenparser.

Rechenparser Dieser arbeitet die vom Teachparser gespeicherten Rechenschritte ab und setzt dabei die Variablen, Konstanten und Zwischenspeicher ein.

12.2.3. Formelparser für die Einflussfunktionen und den Parameter der Grundkurve

Im Fall der Berechnung der Kräfte und Momente beim Passieren ist nur der Rechenparser erforderlich. Die für ihn benötigten Informationen werden für das Testprogramm aus einer Datei mit der Extension „HyFP“ gelesen. Die Struktur einer Formel für den Rechenparser ist wie folgt festgelegt:

AnzOp		
Op1(1)	Op2(1)	Operation(1)
Op1(2)	Op2(2)	Operation(2)
...
Op1(AnzOp)	Op2(AnzOp)	Operation(AnzOp)

In der ersten Zeile steht die Anzahl M der Operationen für die Formel. In den folgenden M Zeilen stehen der erste Operator, der zweite Operator und die Operation.

Bei den Operationen wird unterschieden zwischen:

- Mathematische Operationen:
Der dritte Wert in der Zeile ist **positiv**.
Beide Operatoren müssen angegeben werden.
- Mathematische Funktionen:
Der dritte Wert in der Zeile ist **negativ**.
Der zweite Operator ist ein Dummy (z.B. 0).

Folgende Liste gibt die möglichen Operationen und Funktionen an:

positiv	Operation aus <u>zwei</u> Operatoren	
1	+	Addition
2	-	Subtraktion
3	*	Multiplikation
4	/	Division
5	^	Potenzierung
negativ	Funktion mit <u>einem</u> Operator	
-1	Exp()	Exponentialfunktion
-2	Sin()	Sinus
-3	Cos()	Cosinus
-4	Sqr()	Quadratwurzel
-5	Abs()	Absolutwert
-6	Log10()	10-er-Logarithmus

Nach jeder Operation oder Funktion wird das Ergebnis in einem Stack (Ergebnisfeld, so groß wie die Anzahl der Rechenschritte) abgelegt, der wiederum als Operator verwendet werden kann. Der letzte Stackplatz mit der Nummer „AnzOp“ (M) enthält das Ergebnis der Formel.

Als Operatoren können verwendet werden:

- Variablen, die dem Programm zur Verfügung stehen
Op1(i) oder Op2(i) geben den Index des um 1000 erhöhten Platzes im Datenfeld (s.u.) an.
- Konstanten
Die Zahlen stehen so, wie sie sind, im Datensatz.
Grenzen: -1000 <Konstante <+1000
- Stackplätze
Sie werden kodiert wie Variablen, tragen nur ein negatives Vorzeichen.

Beispiel 1 : Laufvariable der Grundkurve

Formel = $Fr_o \cdot Typ$

1			
1019	1009	3	Fr · Typ = Ergebnis

Beispiel 2 : Wassertiefenfunktion

FunkWaTf = $0,407829 + 4,786445 \cdot (T_m/h)^3$

4			
1006	1002	4	Tm / h = Stack(1)
-1001	2,81	5	Stack(1) ^2,81 = Stack(2)
-1002	4,0964	3	4,0964 · Stack(2) = Stack(3)
0,48241	-1004	1	0,48241 · Stack(4) = Ergebnis

Beispiel 3 : Geschwindigkeit zu Maximalgeschwindigkeit mit Referenzierung

$$\text{FunkVmax} = (Fr_o^2 + Fr_t^2 / Fr_{max}^2) / (Fr_o^2 + 0,1942^2 / Fr_{max}^2)$$

10			
1018	2	5	Fro ^2 = Stack(1)
1028	2	5	Frt ^2 = Stack(2)
-1001	-1002	1	Stack(1) + Stack(2) = Stack(3)
1008	2	5	FrMax ^2 = Stack(4)
-1003	-1004	4	Stack(3) / Stack(4) = Stack(5)
1018	2	5	Fro ^2 = Stack(6)
0,1942	2	5	0,1942 ^2 = Stack(7)
-1006	-1007	1	Stack(6) + Stack(7) = Stack(8)
-1008	-1004	4	Stack(8) / Stack(4) = Stack(9)
-1005	-1009	4	Stack(5) / Stack(9) = Ergebnis

12.2.4. Datenfeld für den Formelparser

Um auf bestimmte Daten in der Software zugreifen zu können, müssen diese in einem Array abgelegt werden. Durch Angabe der Nummer in diesem Array (um 1000 erhöht) kann eine bestimmte Variable in einer Formel vom Rechenparser verwendet werden. Folgende Variablen stehen zu Verfügung:

- 1 bis 10 Allgemeine Größen
- 11 bis 20 Daten des OS
- 21 bis 30 Daten des TS

Index	Inhalt	Einheit		Beschreibung
1	y	m		Lichter Abstand (Schiffsmitten minus halbe mittlere Breite)
2	h	m		Wassertiefe
3	Stb_Bb	-		Vorzeichen für die Seite, an der das TS ist: 1 = Stb, -1 = Bb
4	L_m	m		mittlere Länge
5	B_m	m		mittlere Breite
6	T_m	m		mittlerer Tiefgang
7	V_{max}	m/s		maximale Geschwindigkeit
8	Fr_{max}	-		maximale Froudezahl
9	Typ	-		1 = Überholen, -1 = Begegnen
...				
11	L_o	m	OS	Länge
12	B_o	m	OS	Breite
13	T_o	m	OS	Tiefgang
14	C_{Bo}	-	OS	Blockkoeffizient
15	M_o	kg	OS	Masse
16	ψ_o	°	OS	Kurswinkel
17	V_o	m/s	OS	Geschwindigkeit
18	Fr_o	-	OS	Froudezahl
19	Fr_{ho}	-	OS	Froude-Tiefenzahl
...				
21	L_t	m	TS	Länge
22	B_t	m	TS	Breite
23	T_t	m	TS	Tiefgang
24	C_{Bt}	-	TS	Blockkoeffizient
25	M_t	kg	TS	Masse
26	ψ_t	°	TS	Kurswinkel
27	V_t	m/s	TS	Geschwindigkeit
28	Fr_t	-	TS	Froudezahl
29	Fr_{ht}	-	TS	Froude-Tiefenzahl

12.3. Kontrolle der modellierten Kräfte

Mit dem Testrogramm „HybRegSIPAS“, das in Visual Basic unter MS-Windows geschrieben wurde, können die Formulierungen der Kräfte und Momente beim Passieren getestet werden. Es besteht aus 3 unterschiedlichen Teilen:

- Einzelkurven zu manuell eingegebenen Datensätzen
- Parametervariationen mit eingelesenen Datensätzen

- Situationsgrafik beim Passieren mit Kraftvektoren am OS

Für alle drei Anwendungen gilt:

1. Die Eingabe einer Geschwindigkeit (V_o und V_t) kann in m/s, km/h oder kn erfolgen. Dies wird durch die entsprechend bezeichneten Optionsknöpfe links oben festgelegt (siehe Abbildung 12.2).
2. Es werden keine Plausibilitätsprüfungen vom Programm ausgeführt, da davon ausgegangen wird, dass in einer realen Simulation keine unrealistischen Daten vorliegen werden. Dies ist im Demoprogramm natürlich denkbar. Wenn also bei einer Variationsrechnung unsinnige Ergebnisse erscheinen sollten, ist zu prüfen, ob nicht eine Situation definiert wurde, die unrealistisch ist, wie z.B. $T > h$, $Fr_h > 1$, $C_B < 0,3$ oder $C_B > 1$ oder die Hauptabmessungen fallen ganz aus dem Rahmen des Üblichen.

12.3.1. Einzelkurven

Auf der rechten Seite des Programmfensters in Abbildung 12.2 sind Textfelder mit Schiffsdaten für OS und TS angeordnet. Sie enthalten als Vorgabe die Parameterwerte, aus denen die Grundkurve gewonnen wurde.

Durch Eingabe der Anzahl Schritte t_r zwischen -1,5 und +1,5 kann die Tabelle für Full Scale oder in dimensionsloser Form verfeinert werden.

Die Plot-Knöpfe auf der linken Seite erlauben das Darstellen einer einzelnen Kurve. Die Knöpfe für das Plotten der Peaks sind deaktiviert.

Durch die farbigen Knöpfe unten rechts (rot / grün) kann zwischen Passieren des TS an Backbord- und an Steuerbordseite des OS umgeschaltet werden.

12.3.2. Parametervariationen

Das Programm liest bei Klicken des Knopfes „Parameter lesen“ (links oben) Zeilen mit Situationsparametern aus einer Datei „###.par“ ein, die alle für die Berechnung der Passiersituation relevanten Daten enthält (Beispiel siehe 12.2). In Zeilen werden die verschiedenen Situationen durch Angabe der für das Passieren relevanten Parameter beschrieben.

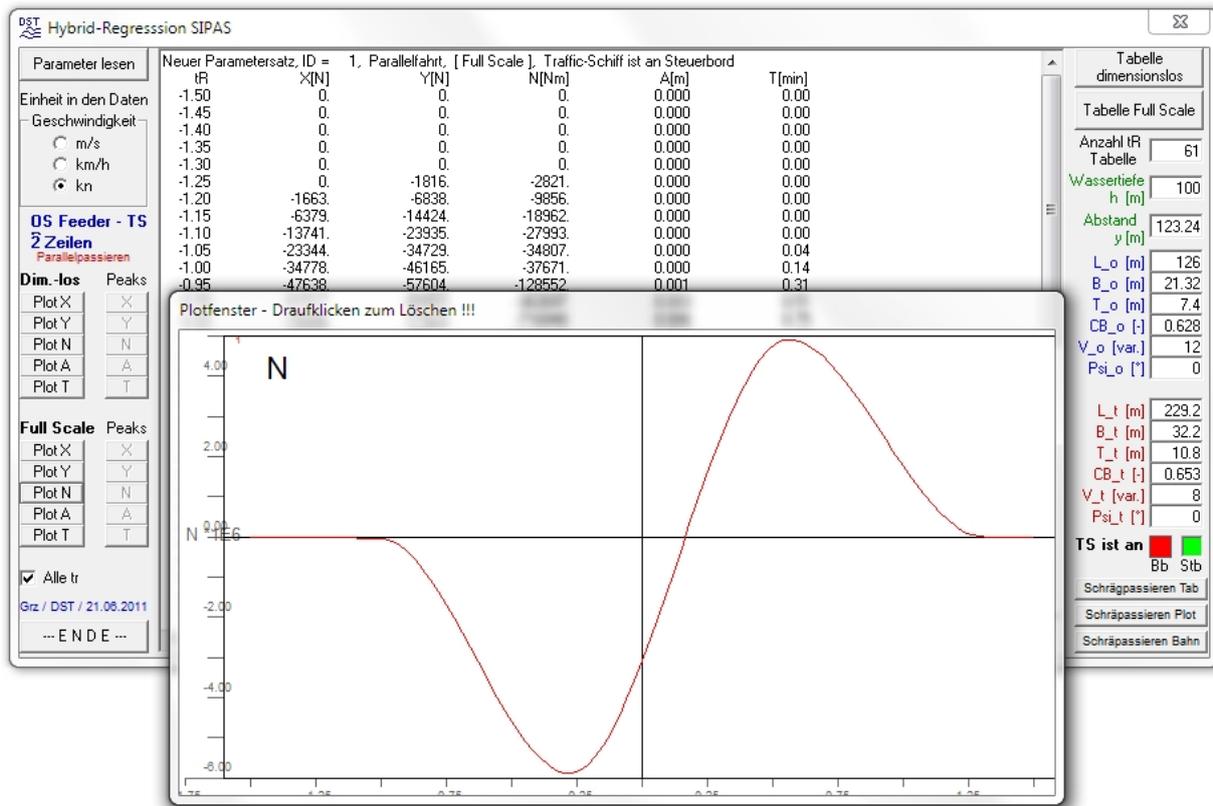


Abb. 12.2.: Demoprogramm mit Tabelle und Kurve in Full Scale.

Tab. 12.2.: Parameterdatei Abstandsvariation

ID	h	$Abst$	L_o	B_o	T_o	C_{B_o}	V_o	ψ_o	L_t	B_t	T_t	C_{B_t}	V_t	ψ_t
1	12	5	126	21,32	7,4	,628	12	0	229,2	32,2	10,8	0,653	18	0
1	12	10	126	21,32	7,4	,628	12	0	229,2	32,2	10,8	0,653	18	0
1	12	20	126	21,32	7,4	,628	12	0	229,2	32,2	10,8	0,653	18	0
1	12	25	126	21,32	7,4	,628	12	0	229,2	32,2	10,8	0,653	18	0
1	12	50	126	21,32	7,4	,628	12	0	229,2	32,2	10,8	0,653	18	0
1	12	500	126	21,32	7,4	,628	12	0	229,2	32,2	10,8	0,653	18	0
1	12	1000	126	21,32	7,4	,628	12	0	229,2	32,2	10,8	0,653	18	0

Im Gegensatz zu früheren Versionen wird nur noch intern zwischen Überholen und Begegnen unterschieden. Nach außen dienen hierzu jetzt die Kurswinkel ψ_o und ψ_t . Bei einer Differenz kleiner als -90° bzw. größer $+90^\circ$ handelt es sich um Begegnen, sonst um Überholen.

Sind Parameter eingelesen, können für jede der Kurven (X, Y, N, A und T) die Verläufe während des Passiervorgangs sowohl dimensionslos als auch in Full Scale geplottet werden. Für jede Zeile im Parameter-Datensatz wird eine Kurve im Bereich $-1,5 < t_r < +1,5$ berechnet – die Abszisse ist t_r .

Anmerkung: Das Testprogramm enthält auch Modellierungen für die Absenkung (A) und den Trimm (T). Diese wurden jedoch nicht im Simulator implementiert.

Wenn alternativ die Plotknöpfe für die Peaks angeklickt werden, ist das Ergebnis eine Grafik der Maxima und Minima im positiven und negativen Bereich von t_r . Die Abszisse ist in diesem Fall der Parameter, der variiert wurde. Werden mehr als zwei Parameter gleichzeitig variiert, wird über die ID der Zeilen des Datensatzes geplottet.

Normalerweise ist das Kästchen „Alle t_r “ aktiviert (abgehakt), um über t_r als Abszisse zu plotten. Wird es deaktiviert, dann werden für genau den dann auswählbaren Wert von t_r die Ergebnisse über den variierten Parameter aufgetragen, dargestellt als minimale oder maximale Peaks.

12.3.2.1. Variation der Geschwindigkeit des Own Ships

V_o : [Überholen] 14, 12, 10, 8, 5, 2,5, 0 und [Begegnen] 0, 2,5, 5, 8, 10, 12, 14, 16 kn

Bei Überholen ist $\psi_t = 0^\circ$, bei Begegnen ist $\psi_t = 180^\circ$.

Dies ist die Nachrechnung der Grundkurve.

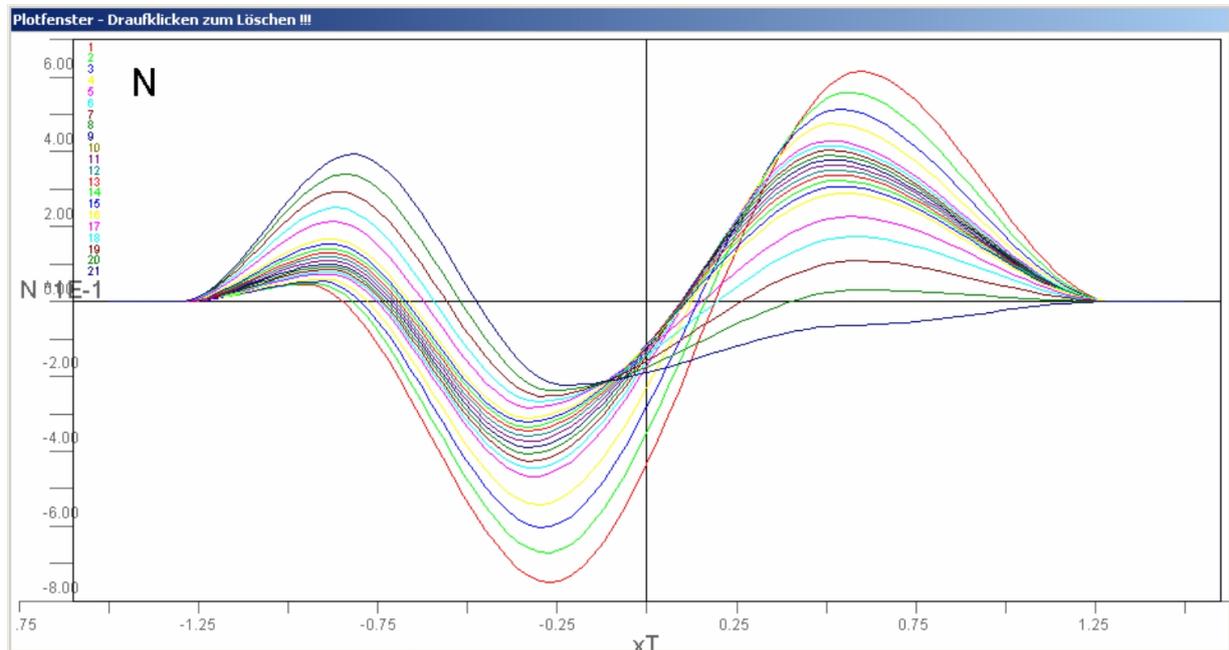


Abb. 12.3.: Grundkurve für das Giermoment N' .

12.3.2.2. Variation des Seitenabstands

Abstände: 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 500, 1000, 10000 m

Die Wirkungen klingen ab und werden bei großem Abstand zu null.

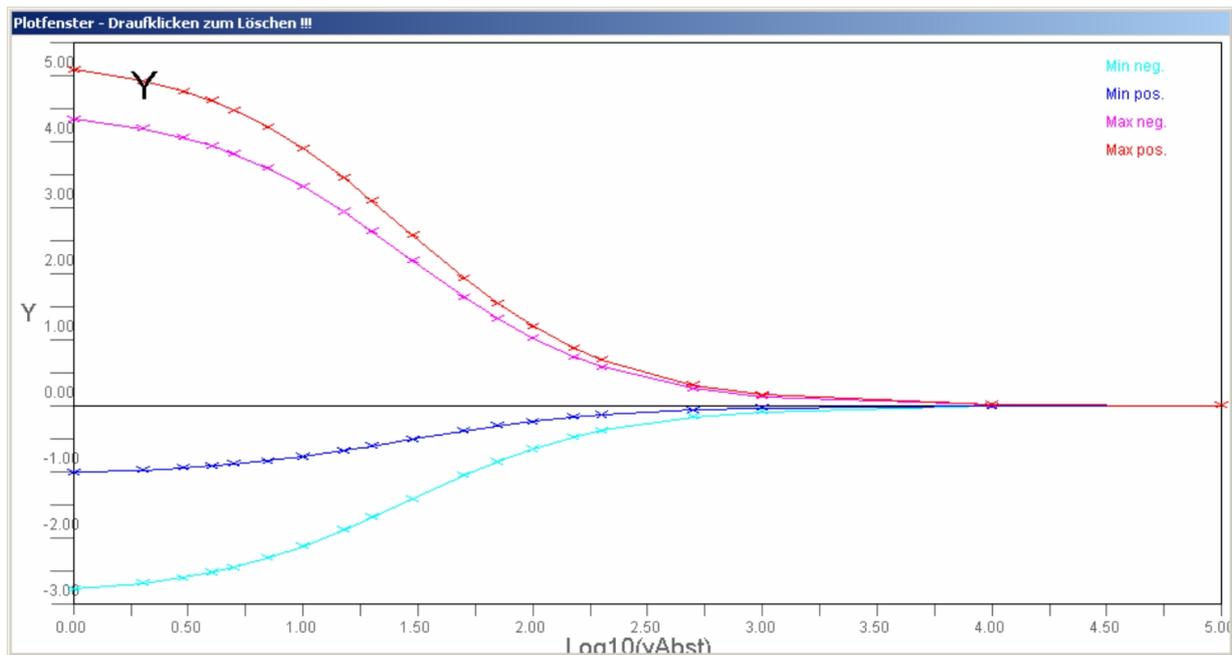


Abb. 12.4.: Abklingen der Wirkung bei wachsendem Seitenabstand.

12.3.2.3. Variation der Wassertiefe

Wassertiefen: 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 17, 20, 25, 30, 50, 100, 200, 500, 1000 m

Die Wirkung nimmt progressiv ab, erreicht aber nie den Wert Null.

12.3.2.4. Variation der Geschwindigkeit des Target Ships

$V_t = 18, 16, 14, 12, 10, 8, 6, 4, 2, 0$ kn, dabei $\psi_t = 0^\circ$ und $\psi_t = 180^\circ$

Beim Passieren eines ruhenden Fremdschiffes ist die Wirkung nahezu 0.

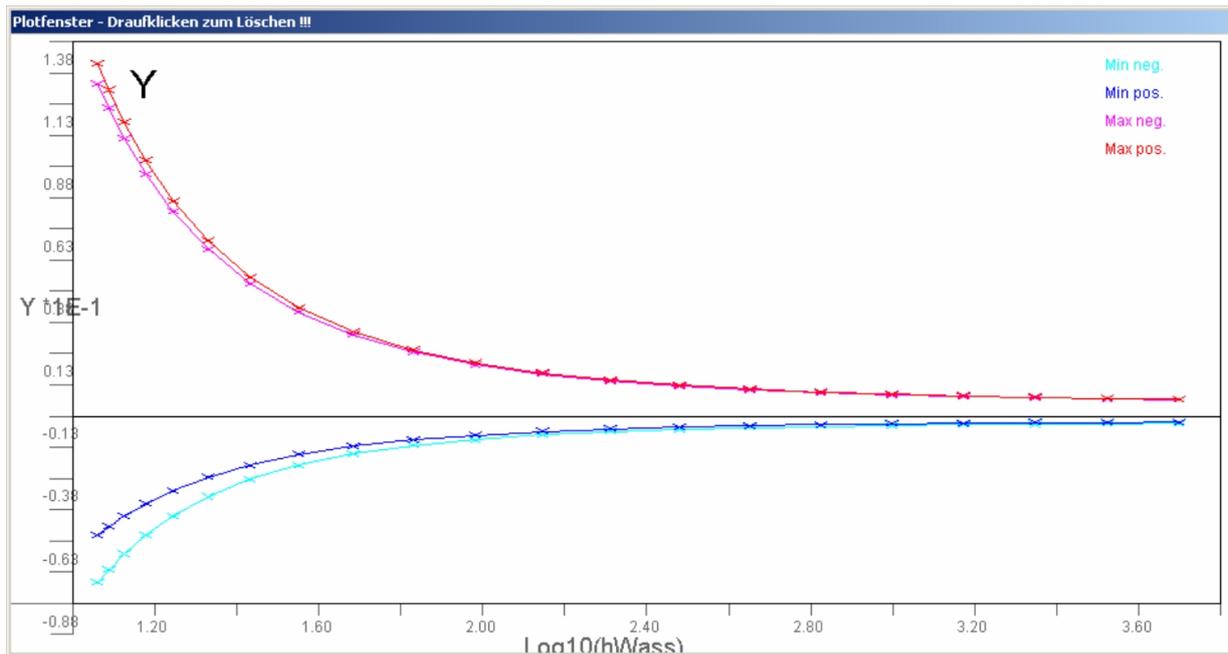


Abb. 12.5.: Abklingen der Wirkung bei zunehmender Wassertiefe.

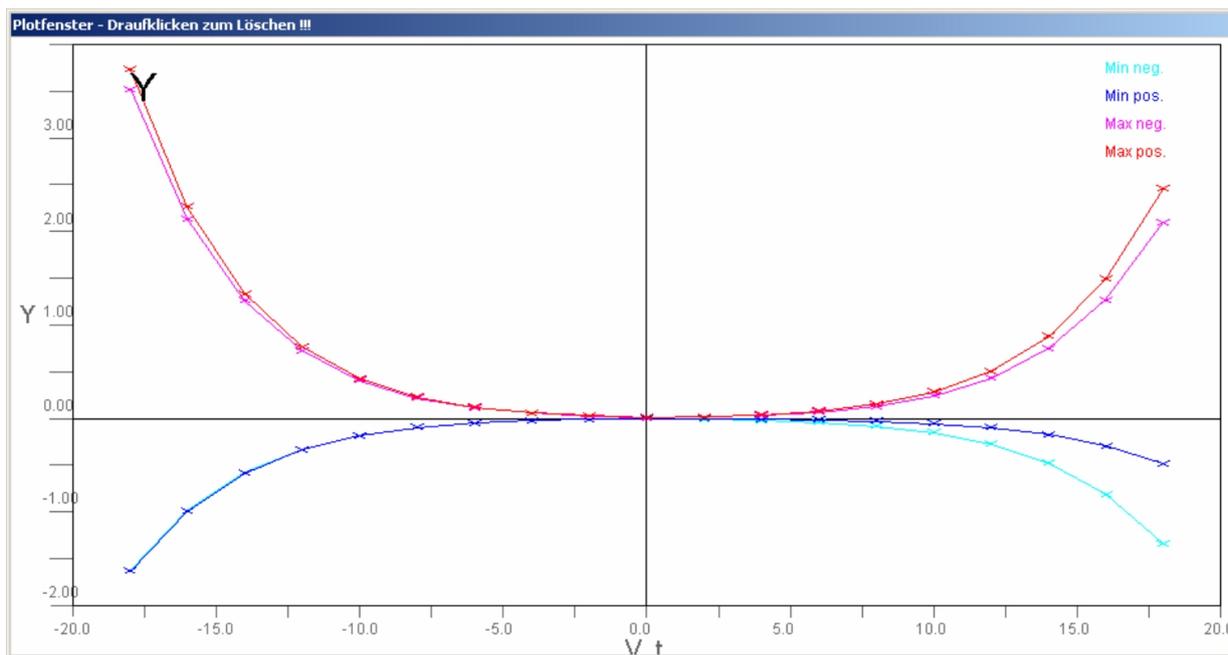


Abb. 12.6.: Variation der Geschwindigkeit des Target Ships.

12.3.3. Situationsgrafiken

Der Knopf rechts unten, der mit „Passieren plotten“ beschriftet ist, bewirkt die Berechnung eines Passiervorganges und grafische Ausgabe der Situation. In Abbildung 12.7 ist das Ergebnis der Situation wiedergegeben, deren Parameter auf der rechten Seite

des Programmfensters dargestellt sind. Zur Verdeutlichung sind 31 Schritte (von maximal 100) für t_r gewählt worden.

Das kleinere OS überholt das größere TS an dessen Backbordseite. Der Abstand, wenn beide mittig nebeneinander liegen ist 100 m, die Kursdifferenz beträgt 10° . In der Grafik sind die Schiffe an der Mittenposition mit „OS“ und „TS“ bezeichnet. Die einzelnen Takte der Berechnung sind durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet. Die Peilungslinie vom OS zum TS ist gepunktet markiert, die auf das OS wirkende Kraft als Pfeil. Die Länge des Pfeils ist proportional zum Betrag des Kraftvektors aus X und Y . Das auf das OS wirkende Giermoment N ist durch einen Kreisbogen dargestellt. Der Winkel und die Richtung des Bogens deuten die Drehrichtung und den Betrag des Momentes an.

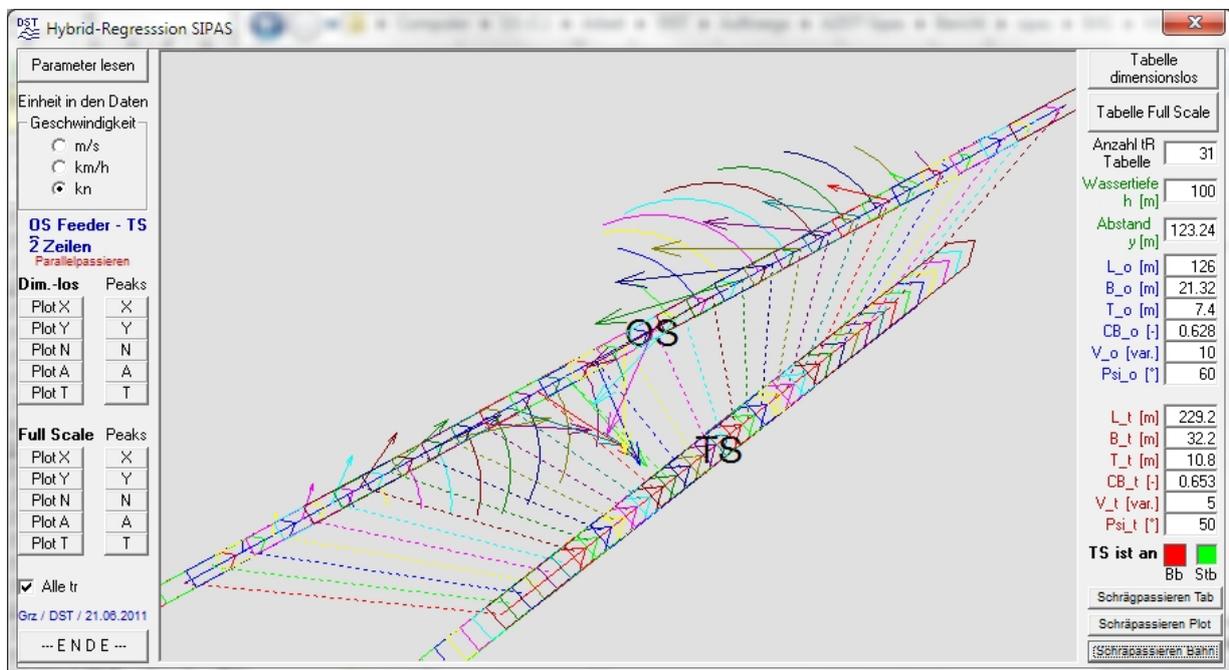


Abb. 12.7.: Kräfte am OS beim Schrägpassieren.

Bei Beginn des Manövers erfährt das OS eine Beschleunigung und eine Abstoßung, dabei bildet sich ein eindrehendes Giermoment aus. In der Mitte wirkt eine Anziehung, während die Beschleunigung sich in eine Verzögerung wandelt. Gegen Ende ist wieder Abstoßung vorhanden und das Giermoment hat auf ausdrehend gewechselt. Durch den geringer werdenden seitlichen Abstand sind die Kräfte und Momente am Ende deutlich größer als am Anfang.

Teil V.

Zusammenfassung und Erfolgsbeurteilung

Zusammenfassung und Erfolgsbeurteilung

Im Projekt SIPAS – Methoden zur Ermittlung und Einhaltung eines sicheren Passierabstandes von Schiffen beim Überholen und Begegnen im begrenzten Fahrwasser – sind im Teilprojekt SIPAS-MAP – Modellierung, Analyse und Parametrisierung hydrodynamischer Wirkungen und Kollisionsursachen beim Passieren von Seeschiffen – vom Partner DST die für die Implementierung im Simulator dringend benötigten Modellierungen von Wechselwirkungskräften, wie sie beim Passieren von Seeschiffen im begrenzten Fahrwasser auftreten, erfolgreich abgeschlossen worden. Damit ist der von den Partnern genutzte Schiffsführungssimulator erheblich verbessert worden. Nicht nur, weil nun komplexe Wechselwirkungen als Novum implementiert wurden, sondern auch, weil im Rahmen dieser Implementierung andere Module des Simulators nach einer kritischen Prüfung ebenfalls verbessert werden konnten.

Mit diesem verbesserten Simulator ist es nun möglich, kritische Situationen, wie sie insbesondere im Zu- und Ablauf von Seehäfen auftreten können, wirklichkeitsgetreu abbilden und untersuchen zu können. Dies dient neben der Analyse und forensischen Untersuchung von Unfällen insbesondere der präventiven Entwicklung von Vermeidungsstrategien, sodass durch dieses Projekt die Schifffahrt ein Stück sicherer geworden ist. Hierzu sind in Einzelfällen Strategien angewendet worden, die so nicht bei der Antragstellung vorgesehen waren. Einzelheiten hierzu finden sich im Erfolgskontrollbericht zu diesem Teilprojekt.

Neben umfangreichen Experimenten (vgl. Teil II) ist für die Entwicklung der mathematischen Modellierung auch auf CFD-Verfahren zurückgegriffen worden, welche hierfür umfangreich erweitert, verbessert oder ertüchtigt wurden. Diese Arbeiten waren nötig, weil sich trotz einmaliger Versuchstechnik nicht alle Situationen im Tank modellieren ließen. Zu nennen ist hier z.B. das Begegnen mit unterschiedlichen Kurswinkeln und kreuzenden Trajektorien, was aus verschiedenen Gründen im Tank von zwei parallel arbeitenden Schleppwagen nicht nachgebildet werden kann.

Bei den CFD Berechnungen (vgl. Teil III) konnte gezeigt werden, dass das am DST eingesetzte und weiterentwickelte Verfahren MOUSE in guter Näherung die komplexen Wechselwirkungen wiedergibt und dass Trends grundsätzlich richtig wiedergegeben werden. Damit erfüllt das Verfahren die wichtigsten Voraussetzungen, um in der Modellbildung für einen Simulator eingesetzt zu werden.

Mit der Fülle der gesammelten und erstellten Daten ist es gelungen, eine Modellierung zu entwickeln, welche alle Voraussetzungen erfüllt, um in einen Simulator implementiert zu werden. Zu nennen sind hier die Echtzeitfähigkeit und die Interpolation physikalisch plausibler Ergebnisse über einen weiten Parameterraum. Diese Modellierung (vgl. Teil IV) wurde nach der Implementierung durch die Partner umfangreich getestet und erfolgreich validiert.

Das Teilprojekt SIPAS-MAP hat damit alle gesteckten Ziele erreicht. Im Erfolgskontrollbericht ist aufgeführt, dass hierbei einige im Antrag beschriebenen Wege nicht erfolgreich waren. So sind potentialtheoretische Verfahren bereits frühzeitig ausgeschieden. Dies ist einvernehmlich mit dem Projektträger und den Projektpartnern geschehen. Dadurch konnten die Projektziele ohne unnötige Risiken und Kosten innerhalb der vorgesehenen zeitlichen und budgetären Rahmenbedingungen erreicht werden.

Literaturverzeichnis

- [1] BENEDICT, K. ; KÖPNICK, W. ; FRIEDHOFF, B. ; GRONARZ, A. ; HEYKEN, T. ; BORNHORST, C. ; MELO PETEY, F. de: SIPAS - Sicherer Passierabstand von Seeschiffen beim Überholen und Begegnen im begrenzten Fahrwasser. In: FIEDLER, R. (Hrsg.): *Statustagung Schifffahrt und Meerestechnik 2010*. Rostock/Germany : Projektträger Jülich im Auftrag des BMWi, Dezember 2010
- [2] BOUWMANN, E. ; FRIEDHOFF, B. ; HENN, R. ; KAISER, R. ; LIST, S. ; GRONARZ, A. ; THILL, C.: SimuBin - Modellierung und Simulation der realitätsnahen Schiffsbewegungen auf Binnenwasserstraßen, Teil A - Zusammenfassung. Duisburg : Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V., 2009 (1939). – Forschungsbericht
- [3] BOUWMANN, E. ; FRIEDHOFF, B. ; HENN, R. ; KAISER, R. ; LIST, S. ; VILSMEIER, R.: SimuBin - Modellierung und Simulation der realitätsnahen Schiffsbewegungen auf Binnenwasserstraßen, Teil C - Numerische Untersuchungen. Duisburg : Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V., 2009 (1939). – Forschungsbericht
- [4] DENNIS, J.E. ; GAY, D.M. ; WELSCH, R.E.: An adaptive nonlinear least-squares algorithm. In: *ACM Transactions on Mathematical Software* 7 (1981), Nr. 3, S. 367–383
- [5] GLOTH, O.: *An object oriented finite volume framework and its application to fluid*, Universität Duisburg, Dissertation, 2003
- [6] GRONARZ, A.: SicherBin - Verbesserung der Verkehrssicherheit auf Binnenwasserstraßen an Engpass- und Gefahrenstellen, Teil B - Experimente und Bewegungssimulation. Duisburg : Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V., 2007 (1818). – Forschungsbericht
- [7] GRONARZ, A. ; BROSS, H. ; MÜLLER-SAMPAIO, C.: SimuBin - Modellierung und Simulation der realitätsnahen Schiffsbewegungen auf Binnenwasserstraßen,

Teil B - Experimentelle Untersuchungen. Duisburg : Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V., 2009 (1939). – Forschungsbericht

- [8] HENN, R. ; KAISER, R. ; LIST, S.: SicherBin - Verbesserung der Verkehrssicherheit auf Binnenwasserstraßen an Engpass- und Gefahrenstellen, Teil C - Numerische Untersuchungen. Duisburg : Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V., 2007 (1818). – Forschungsbericht
- [9] JIANG, T.: SicherBin - Verbesserung der Verkehrssicherheit auf Binnenwasserstraßen an Engpass- und Gefahrenstellen, Teil A - Zusammenfassung. Duisburg : Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V., 2007 (1818). – Forschungsbericht
- [10] JIANG, T. ; LIST, S. ; LOCHTE-HOLTGREVEN, H.: Numerische und experimentelle Untersuchungen der Umströmung flachgehender, getunnelter Binnenschiffe unter Einbeziehung der Propellerwirkung. Duisburg : Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V., 2003 (1686). – Forschungsbericht
- [11] KAUFMANN, J.: *Kollision zwischen CMS COSCO Hamburg und CMS P&O NEDLLOYD FINLAND am 01. März 2004 auf der Untereibe/Höhe Tonne 91 mit Tod eines Seemannes*. 2006. – Untersuchungsbericht Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung 45/05 – Sehr schwerer Seeunfall
- [12] MENTER, F. R.: Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications (MENTER). In: *AIAA Journal* 32(8) (1994), S. 1598–1605
- [13] OOSTERVELD, M.W.C. ; OOSSANEN, P. van: Further Computer - Analyzed Data of the Wageningen B-screw-series. In: *Publication No. 479 of the N.S.M.N, International Shipbuilding Progress* 22 (1975), jul, Nr. 251
- [14] SCHWEIZER, W.: *MATLAB kompakt*. 4th. München : Oldenbourg, 2009
- [15] SHARMA, S.D.: Simulation of Overtaking Manoeuvres. In: BRIX, Joachim (Hrsg.): *Manoeuvring Technical Manual*. Hamburg : Seehafen Verlag, 1992, S. 195–198
- [16] SPAETH, H.: *Algorithmen für elementare Ausgleichsmodelle*. München/ Wien : R. Oldenbourg Verlag, 1973
- [17] STUNTZ, N.: *Numerische Simulation der Schiffsumströmung mit Berücksichtigung des Propellersogs*, Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2006