

493 | Dezember 1988

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Dr.rer.nat. Y. Zhao

Weiterentwicklung der Simulation von Schiffsmanövern

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

Weiterentwicklung der Simulation von Schiffsmanövern

Y. Zhao, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1988

ISBN: 3-89220-493-4

© Technische Universität Hamburg-Harburg
Schriftenreihe Schiffbau
Schwarzenbergstraße 95c
D-21073 Hamburg

<http://www.tuhh.de/vss>

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 493

WEITERENTWICKLUNG DER SIMULATION
VON SCHIFFSMANÖVERN

Bearbeiterin: Dr.rer.nat. Y. ZHAO

Dezember 1988

ISBN 3 - 89220 - 493 - 4

Copyright Institut für Schiffbau
 Universität Hamburg
 Lammerssieth 90
 D-2000 Hamburg 60

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Symbolverzeichnis	
Zusammenfassung	
Summary	
1. Einleitung	1
2. Flachwasser-Einfluß auf Quer- und Drehbewegung des Schiffes	5
2.1 Grundlage der Theorie	5
2.2 Die Integro-Differentialgleichung	6
2.3 Versperrungskoeffizient	7
2.4 Quergeschwindigkeitsverteilung $U(x)$ in flachem Wasser	9
2.5 Berechnung der hydrodynamischen Masse und des Massenträgheitsmoments	10
2.6 Der Flachwasser-Einfluß auf Querkraft und Giermoment infolge Driftwinkels und Gier- geschwindigkeit	11
2.7 Der Einfluß des Flachwassers auf Ruderkraft und Steuermoment	13
3. Berücksichtigung der Rollbewegung auf das Manövrierverhalten	16
3.1 Das Rollmoment	16
3.2 Die Abhängigkeit der Längs- und der Querkraft sowie des Giermoments von der Rollbewegung	17
3.2.1 Lewis-Spanten für gekrängte Schiffe	17
3.2.2 Die Versperrungskoeffizienten für unsymmetrische Querschnitte	19
3.2.3 Querwiderstand bei Krängung	20
4. Erweiterung für geringe Vorwärts- und Rückwärts- geschwindigkeit	
4.1 Querkraft und Giermoment infolge Driftwinkels und "Gierwinkels" in vier Quadranten	22
4.2 Berechnung der Kräfte in vier Quadranten auf flachem Wasser	26
5. Erfassung der Drehzahländerung bei Manövern und Einbeziehung des Propellermanovers	27

	Seite
5.1 Propellerschub und -drehmoment in vier Quadranten	27
5.2 Steuerwirkung von Propellern	30
5.3 Bestimmung der Drehzahländerung	31
5.3.1 Drehmoment der Schiffsantriebsmaschine	31
5.3.2 Propellerdrehungsgleichung	32
5.3.3 Bestimmung der möglichen bzw. technisch zulässigen Drehzahl	33
6. Einbeziehung des Querstrahlers	36
7. Berechnung der Manövrierbewegung (Simulationsberechnung)	38
7.1 Bewegungsgleichungen des manövrierenden Schiffes	38
7.1.1 Rumpfkräfte	39
7.1.2 Ruderkräfte	41
7.1.3 Propellerkräfte	43
7.1.4 Weitere Kräfte	44
7.2 Simulationsberechnung der Manövrierfähigkeit	45
7.3 Vergleich mit Versuchsergebnissen	46
7.3.1 Der Einfluß des Flachwassers	46
7.3.2 Stoppmanöver	48
7.3.3 Manövrieren mit Querstrahler	49
7.3.4 Manövrierbewegung in Wind	50
7.3.5 Manövrierbewegung bei Beschleunigung oder Verzögerung	51
8. Schlußfolgerung	52
Literaturverzeichnis	54
Tabellen	56
Abbildungen	60

Symbolverzeichnis

A_E / A_0	: Propellerflächenverhältnis
a_R	: Faktor für die Erhöhung der Ruderkraft infolge vorderem Schiffsrumpf
$B_{k j}$: Matrix für Berechnung des Versperrungskoeffizienten
C	: Versperrungskoeffizient
\bar{C}_D	: Querwiderstandsbeiwert des Spants abhängig von x
$\bar{C}_{D \text{ flach}}$: Mittlerer Querwiderstandsbeiwert in flachem Wasser
$\bar{C}_{D \text{ tief}}$: Mittlerer Querwiderstandsbeiwert in tiefem Wasser
$C^*_{Q 1}, C^*_{Q 2}$: Propellerdrehmomentsbeiwert in vier Quadranten
$C^*_{T 1}, C^*_{T 2}$: Propellerschubbeiwert in vier Quadranten
D	: Tiefgang des Schiffes
$D(x)$: Tiefgang des Spants abhängig von x
D_L	: Quertunneldurchmesser
D_P	: Propellerdurchmesser
$G(y, z, y_j, z_j)$: Greenfunktion
GM	: Metazentrische Höhe des Schiffes
H	: Wassertiefe
I_z	: Trägheitsmoment des Schiffes um die z -Achse
I_{EP}	: Summe der Massenträgheitsmomente aller rotierenden Teile des Antriebssystems einschließlich des hydrodynamischen Massenträgheitsmoments

J	: Propellerfortschrittsziffer
J_z	: Hydrodynamisches Trägheitsmoment um die z-Achse
K	: Rollmoment
k	: Verhältnis der Windgeschwindigkeit zur Schiffsgeschwindigkeit
KG	: Schwerpunktshöhe der Schiffsmasse
K_Q	: Üblicher Propellerdrehmomentsbeiwert
K_T	: Üblicher Propellerschubbeiwert
k_{1Q}, k_{2Q}	: Konstanten der Fourier-Reihe für Propellerdrehmomentsbeiwert
k_{1T}, k_{2T}	: Konstanten der Fourier-Reihe für Propellerschubbeiwert
L	: Länge des Schiffes zwischen den Loten
l'_r, l'_v	: s. Definition in Abschnitt 7.3.1
m	: Schiffsmasse
m_x	: Hydrodynamische Masse für Längsbewegung
m_y	: Hydrodynamische Masse für Querbewegung
N	: Giermoment um die z-Achse
n	: Propellerdrehzahl
\dot{n}	: Propellerdrehzahländerung
n_0	: Nenndrehzahl am Propeller
n_1	: Propellerdrehzahl zum Zeitintervallbeginn
n_2	: Propellerdrehzahl zum Zeitintervallende
n_{2k}	: Korrigierter Wert von n_2
n_{min}, n_{max}	: Grenzwert der Propellerdrehzahl
n_{gmin}, n_{gmax}	: Überlastgrenzwerte der Propellerdrehzahl
n_w	: Gewünschte Propellerdrehzahl
P	: Propellersteigung
Q_E	: Antriebsmoment
Q_{Emax}	: Maximales Antriebsmoment
Q_P	: Propellerdrehmoment

Q_J	: Quellergiebigkeit
R, R_1, R_2	: Ruderkraft, s. Definition in Abschnitt 2.7 und 7.1.2
R_t, R_y, R_n	: Widerstand für Bewegung in x-, y-Richtung bzw. Drehung um die z-Achse
r	: Giergeschwindigkeit des Schiffes um die z-Achse
$s(x)$: Spantfläche
T_k	: Matrix für Berechnung des Versperrungskoeffizienten
T_0	: Standschub eines Querstrahlers
T_P	: Propellerschub
t	: Zeit
Δt	: Zeitintervall
t_P	: Sogziffer
U	: Quer-Anströmgeschwindigkeit des Schiffsquerschnitts bei endlicher Wassertiefe
U_v, U_r	: U infolge v bzw. r
u	: Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung
$u_0(z)$: Anströmgeschwindigkeit des Ruders abhängig von z
V	: Geschwindigkeitsbetrag
V_0, V_s	: Anfangswert bzw. stationärer Wert von V
v	: Geschwindigkeitskomponente in y-Richtung
$v(x)$: Quergeschwindigkeit der Spanten in Abhängigkeit von x
v_A	: Anströmgeschwindigkeit des Propellers
W_{d1f}	: Faktor für die vertikale Nachstromverteilung
w_P	: Nachstromziffer
X	: Längskraft
x_G	: x-Koordinate des Schiffsschwerpunktes
x_L	: Abstand des Querkraftsangriffspunkt eines Querstrahlers

X_{mv}, X_{mr}	: s. Definition in Abschnitt 2.6
X_P	: x-Koordinate des Propellers
X_R	: x-Koordinate der Ruderachse
X_y	: x-Koordinate des Schwerpunktes von m_y
ΔX_L	: Verschiebung des Ruderkraftangriffspunktes
$X_{yL}(\sigma)$: Abstand des Querkraftangriffspunkt eines Querstrahlers vom Hauptspant abhängig von σ
X_{vv}, X_{vr}, X_{rr}	: Koeffizienten zur Widerstandskorrektur abhängig von v und r
x, y, z	: Kartesische Koordinaten eines Schiffsfesten Systems mit Ursprung im Hauptspant auf der Symmetrieebene in Höhe der Wasserlinie, s. Abb. 7.1
x_0, y_0, z_0	: Kartesische Koordinaten eines erdfesten Systems
x_1, x_2, y_1, y_2	: s. Definition in Abschnitt 7.3.1
X_H, Y_H, N_H, K_H	: Rumpfkraften und -momente in Längs- bzw. Querrichtung und um die z- bzw. x-Achse
X_L, Y_L, N_L	: Querstrahlerkräfte in Längs- bzw. Querrichtung und um die z-Achse
X_P, Y_P, N_P	: Propellerkräfte in Längs- bzw. Querrichtung und um die z-Achse
X_R, Y_R, N_R	: Ruderkräfte in Längs- bzw. Querrichtung und um die z-Achse
X_W, Y_W, N_W	: Windkräfte in Längs- bzw. Querrichtung und um die z-Achse
Y	: Querkraft
$Y_b(x)$: Breitenkoordinate des Punktes auf der Spantkontur, der bei etwa 10 Grad Krängung der tiefste Punkt wird, abhängig von x
$Y'_L(\gamma)$: Dimensionslose Querkraft eines Querstrahlers abhängig von σ

Y_v, Y_r, N_v, N_r	: Querkräfte und Giermoment, vgl. Definition in Abschnitt 2.6
$Y_\beta, N_\beta, Y_\gamma, N_\gamma$: Querkräfte und Giermomente, vgl. Definition in Abschnitt 4.1
$Y(\beta), N(\beta), Y(\gamma), N(\gamma)$: Querkräfte und Giermomente infolge Driftwinkel bzw. "Gierwinkel" in vier Quadranten
Y'_P, N'_P	: Dimensionslose Wert von Y_P bzw. N_P
Z_k, Z_l	: Komplexe Variable. Index k für Kreis, Index l für Lewis-Spannten
Z_P	: Propellerflügelzahl
α	: Mittlere Strömrichtung, relativ zur x -Achse am Ruder
α_1	: Effektive Ruderwinkel
α_P	: Neigung der Nachstromebenen
β	: Driftwinkel
γ	: "Gierwinkel"
σ	: Verhältnis der Querstrahlergeschwindigkeit zur Schiffsgeschwindigkeit
	: Verdrängung des Schiffes
$\varepsilon, \varepsilon_1, \varepsilon_2$: Propellerfortschrittswinkel
\wedge	: (Ruderhöhe) / Ruderfläche
ϕ	: Krängungswinkel
ϕ_0	: Der wert ϕ , der den tiefsten Punkt des Spants ergibt
γ	: Gierwinkel
ρ	: Flüssigkeitsdichte
ξ	: Variable der Integro-Differentialgleichung
δ	: Ruderwinkel

Zusammenfassung

Die Aufgabenstellung des vorliegenden Vorhabens besteht darin, die Simulationsmethode von Schiffsmanövern weiter zu entwickeln. Zu berücksichtigen sind folgende besondere Teilaspekte: Flachwassereinfluß, die beim Manövrieren auftretende Krängung des Schiffes, automatisch und beabsichtigte Drehzahländerungen des Propellers, Querkraft und Giermoment bei geringer Vorwärts- und Rückwärtsgeschwindigkeit sowie die Steuerwirkung von Querstrahlern.

In der vorliegenden Arbeit wurden die einzelnen Teilprobleme mit den am besten geeigneten theoretischen oder empirischen Methoden behandelt. Z.B. wurde der Flachwassereinfluß mit der Theorie schlanker Körper erfaßt und nach neu entwickelten numerischen Verfahren ausgewertet; die Berechnung der Rollbewegung des Schiffes und der Ruderwirkung wurden von tiefem auf flaches Wasser erweitert; die rechnerische Formel für die Propellerkräfte bei Rückwärtsdrehung und die Steuerwirkung von Querstrahlern wurden aus Versuchsergebnissen durch Regressionsanalyse hergeleitet. Um Manövriereigenschaften bei großem Driftwinkel oder bei großer Giergeschwindigkeit zu untersuchen, wurden die Koeffizienten der Berechnungsansätze durch Analyse von Modellversuchen bestimmt. Dabei wurde der Typ dieser Ansätze teilweise in Anlehnung an theoretische Überlegungen gewählt. Die genannten Einflüsse wurden in ein Simulationsmodell zur Nachbildung der Manövrierbewegung eingeführt.

Mit diesem Modell kann man das Manövrierverhalten eines Schiffes unter diversen Einflüssen simulieren. Z.B. das Verhalten beim Stoppmanöver und bei Rückwärtsfahrt des Schiffes, die Manövrierbewegungen mit Querstrahlern oder in Wind, beschleunigte oder verzögerte Drehkreisbewegung des Schiffes und so weiter können durch dieses Modell wirklichkeitsgetreu nachgebildet werden. Durch Vergleich mit Versuchsergebnissen wurde bestätigt, daß dieses Modell ein praktisch brauchbares Vorhersageverfahren für die Manövriereigenschaften von Schiffen ist. Das Modell kann auch zum Vergleich verschiedener Schiffe miteinander und zur Abschätzung der Wirkung von Maßnahmen zur Verbesserung des Manövrierverhaltens verwendet werden.

Summary

Intention of the present research was the further development of a simulation method for ship maneuvering. The following aspects were considered: shallow water effects, heeling due to maneuvering, automatical and intended changes of the rate of revolution of the propeller, lateral force and yawing moment for small forward or backward velocity, and the steering effect of lateral thrusters.

In the present work the individual problems were treated with the most appropriate theoretical or empirical methods. E.g. shallow water effects were modeled by slender body theory and evaluated in a newly developed numerical scheme. Calculation of rolling motion and rudder forces were changed from deep to shallow water. The formulas for the propeller force in case of reverse propeller revolution and the steering effect of lateral thrusters were deduced by means of regression analysis from experimental results. For the investigation of maneuvering qualities for large drift angles or large yawing velocities the coefficients of the mathematical model were determined by analysing experimental results while the model type was chosen with reference to theoretical considerations. The aforementioned effects were incorporated into a program for simulating maneuvering motions.

The mathematical model allows to simulate the maneuvering behaviour of the ship under various influences. Among the results presented are stopping maneuvers and astern motion of the ship, maneuvering motions with lateral thrusters or in wind, acceleration and deceleration in turning circles etc. Comparison with experiments confirms that this model is a practical tool for predicting maneuvering qualities of ships. It can be used also for comparing different ships and for estimating the influence of measures for improving maneuvering qualities.

1. Einleitung

Um die Manöviereigenschaften beim Entwurf von Schiffen günstig beeinflussen zu können, benötigt man ein Vorhersageverfahren. Die gegenwärtig in der Praxis verwendeten Verfahren beruhen entweder auf Modellversuchen oder auf theoretischen Berechnungen.

Versuche mit verkleinerten Modellen ermöglichen Vorhersagen der Manövierbewegung von Schiffen, häufig mit zufriedenstellenden Ergebnissen. Messungen an wirklichen manövrierenden Schiffen liefern ebenfalls praktisch brauchbare Daten für Voraussagen von Schiffseigenschaften und werden auch zur Überprüfung theoretischer Berechnungen und der Übertragbarkeit von Modellversuchsergebnissen benutzt. Allerdings sind Experimente mit Modellen und Großausführungen auch problematisch. Für den Versuch mit Großausführungen bestehen z.B. Schwierigkeiten in einer genügend genauen Ortsbestimmung des Schiffes während des Manövers; für Modellversuche kann z.B. bisher der Einfluß der unähnlichen Strömungsablösung noch nicht wirklichkeitsgetreu ermittelt werden. Außerdem sind Modellversuche sehr aufwendig.

Die theoretischen Berechnungen ermöglichen die Bestimmung der hydrodynamischen Kräfte und Momente, die auf das Schiff wirken, in Abhängigkeit von der Längs-, Quer- und Drehgeschwindigkeit des Schiffes, den zugehörigen Beschleunigungen, dem Ruderwinkel, der Propellerdrehzahl und der Krängung (seitliche Neigung). Wenn der Zusammenhang zwischen hydrodynamischen Kräften und Schiffsbewegungen bekannt ist, kann das Manövierverhalten leicht durch Simulation des Testmanövers auf einem Rechner nachgebildet werden; dabei können dann auch weitere Kräfte z.B. durch Wind oder Stömung berücksichtigt werden.

Die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit besteht darin, ein Simulationsmodell zu entwickeln. Dieses Modell soll eine wirklichkeitsgetreue Vorhersage der Manöviereigenschaften eines Schiffes ermöglichen. Dabei

sollen alle Größen, die die Manövrierbewegung eines Schiffes wesentlich beeinflussen können, ermittelt werden. Dafür sind einige besondere Teilaspekte zu berücksichtigen:

- Beim Manövrieren treten Krängungen des Schiffes auf, die ihrerseits wieder Rückwirkungen auf die Manövrierbewegungen haben. Eine Berücksichtigung der Rollbewegung ist deshalb notwendig.
- Wichtig ist das Manövrierverhalten vor allem in Häfen, Flüssen, Kanälen und Schelfmeeren, d.h. in Wassertiefen, die im Vergleich zum Tiefgang großer Schiffe und zur Länge der Fahrtwellen nicht als groß angesehen werden können. Die Wassertiefe beeinflußt dann die Manövrierfähigkeit.
- Für gewöhnliche Rudermanöver reicht es aus, einen relativ kleinen Bereich des Schiebewinkels und der Giergeschwindigkeit zu untersuchen. Wenn dagegen radikales Maschinenmanöver simuliert werden soll, zumal unter Berücksichtigung größerer Steuer- oder Störkräfte in seitlicher Richtung, muß man dann auch die Manövrierbewegung des Schiffes mit relativ großen Quer- und Giergeschwindigkeit untersuchen.
- Die Steuerwirkung des Propellers ist bei Einschraubern in Fahrt voraus praktisch unbedeutend. Dagegen ist vom Standpunkt der Manöviereigenschaften die Steuerwirkung der rückwärtsdrehenden Schrauben - z.B. beim Stoppmanöver - von eminenter Bedeutung.
- Außer Stoppmanövern sind der Beschleunigungs- und Verzögerungsprozeß des Schiffes bei der Manövrierbewegung von Bedeutung. Bei Ein- und Ausfahrt in ein Hafengebiet oder bei Fahrt durch einen schmalen Kanal beeinflussen die Drehzahländerungen des Propellers und die systematischen Kombinationen der Geschwindigkeit und Propellerdrehzahl die Manövrierbewegung wesentlich.

Einige der oben genannten Teilaspekte wurden bereits weitgehend untersucht. Z.B. die Kopplung der Manövrierbewegung mit der Rollbewegung von SÖDING (1984); Manövierversuche im flachen Wasser von FUJINO (1968); die Schrägschlepp- und Drehversuche für verschiedene Kombinationen der Schiffslängs-, Quer- und Drehgeschwindigkeit von SHARMA (1982); Stoppmanöver von NOMOTO et al. (1978) und KOBAYASHI (1987); der Manöviereinfluß des Querstrahlers von BRIX (1978); und so weiter.

Praktische Vorhersagemethoden für die Schiffsmanövrierbewegung unter allen genannten Einflüssen liegen noch nicht vor. Besonders sind praktisch brauchbare Berechnungsverfahren noch zu entwickeln.

In der vorliegenden Arbeit wird versucht, zur Lösung der einzelnen Teilprobleme - sofern kein geeigneter Ansatz vorhanden ist - neue theoretische oder empirische Ansätze zu entwickeln und diese in das Berechnungsmodell einzuführen. Diese Ansätze sind zum Teil durch Regressionsanalyse abzuleiten. Zur Ermittlung der Manöviereigenschaften eines Schiffes auf flachem Wasser werden mathematische Formeln entwickelt. Die Lösung erfolgt durch Anwendung von neu entwickelten numerischen Verfahren (ZHAO, 1984). Ein Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit vorhandenen experimentellen Resultaten ist erforderlich, um ein praktisch brauchbares Vorhersageverfahren für die Manöviereigenschaften eines Schiffes unter verschiedenen äußeren Einflüssen zu entwickeln.

Weitere Einflüsse, z.B. die Drehbeschleunigung des Ruders oder die Vorgeschichte der Schiffsbewegung, spielen bei den praktisch interessierenden niedrigen Bewegungsfrequenzen kaum eine Rolle. Sie wurden daher bei der Modellbildung nicht berücksichtigt.

Die Einflüsse der Zähigkeit und der Verformung der Wasseroberfläche auf das Manövierverhalten eines Schiffes sind mit empirischen Korrekturen zu berücksichtigen.

Zur Bestimmung des Einflusses der Rollbewegung wird die von SÖDING (1984) aufgestellte Methode angewendet. Sie gilt nur für tiefes Wasser. Der Einfluß flachen Wassers wird durch die theoretischen Ansätze von ZHAO (1984) bzw. durch im Rahmen der vorliegenden Arbeit neu entwickelte Ansätze ermittelt.

Querkraft und Giermoment auf das Schiff infolge von Giergeschwindigkeit und Driftwinkel werden für verschiedene Wassertiefe durch trigonometrische Polynome in vier Quadranten angenähert. Der Verlauf der Polynome wird durch wenige grundlegende Parameter festgelegt. Die Ableitungen (Steigungen) der Polynome bei 0 und 180 Grad Driftwinkel bzw. "Gierwinkel" ergeben sich aus theoretischen Berechnungen, der Maximalwert nach Versuchen.

Zur Einbeziehung des Propellermanövers werden hauptsächlich Versuchsergebnisse benutzt. der Propellerschub und das Propellerdrehmoment in vier Quadranten werden durch Polygonzüge nach den Versuchsergebnissen von van LAMMEREN et al. (1969) für verschiedene Propellerparameter angenähert. Zur Erfassung der Drehzahländerungen wird die mögliche und technisch zulässige Drehzahl theoretisch gerechnet. Dabei werden die Querkraft und das Giermoment infolge der Propellerwirkung mit aus Versuchen abgeleiteten Regressionsformeln berechnet.

Für die Berücksichtigung von Querstrahlern werden die Kräfte nach Versuchsergebnissen von BRIX (1978) und CHISLETT et al. (1966) ermittelt.

Wesentliche Ergebnisse der vorliegenden Arbeit werden durch Abbildungen und Tabellen dargestellt. Darüber hinaus wird eine ausführliche Beschreibung des Simulationsprogramms und des Programmtexts im zweiten Teil des Berichtes vorgelegt.

2. Flachwasser-Einfluss auf Quer- und Drehbewegung des Schiffs

In diesem Kapitel wird versucht, die Kräfte und Momente, die am Schiffsrumpf bei schräger und drehender Bewegung durch das umgebende Wasser bei beschränkter Wassertiefe entstehen, nach der Theorie schlanker Körper zu berechnen. Zur Bestimmung der Kräfte auf das Ruder und die Wechselwirkung zwischen Propeller, Ruder und Rumpf werden vorhandene Verfahren, die sich auf tiefem Wasser bewährt haben, für flaches Wasser erweitert. Reibungseinflüsse werden durch empirische Koeffizienten erfaßt. Die so erhaltenen Kräfte am Schiffsrumpf werden mit Modellversuchsergebnissen anderer Autoren verglichen. Die hydrodynamischen Berechnungsverfahren werden im Simulationsmodell angewendet. Dabei zeigt sich, daß das Verfahren die Unterschiede zwischen den Manövrierbewegungen auf tiefem und flachem Wasser gut erfaßt.

2.1 Grundlage der Theorie

Untersucht wird zunächst die Störung der Parallelströmung, die ein Schiffskörper bei stationärer seitlicher oder schräger Anströmung hervorruft. Wenn das Wasser tief und der Schiffsrumpf schlank ist, verläuft die Störströmung nahe zu zweidimensional in den Querschnittsebenen senkrecht zur Schiffslängsachse. Auf flachem Wasser bildet der Schiffskörper dagegen eine Versperrung, so daß das Wasser nicht nur unter dem Schiff hindurch ausweicht, sondern zum Teil auch seitlich um den Schiffskörper herumfließt. Die Umströmung eines Schiffsquerschnitts hängt dann auch von den Nachbarquerschnitten ab. Die Störströmung ist damit dreidimensional. In größerem Abstand von Schiff nähert sie sich einer zweidimensionalen Strömung in horizontalen Ebenen an, dagegen verläuft sie dicht beim Schiff nahezu zweidimensional in den Spantebenen.

Dementsprechend untersucht man zuerst getrennt eine Fernfeldströmung in der Horizontalebene und Nahfeldströmungen in allen Querschnittsebenen des Schiffes. Durch Verknüpfen der Ansätze für beide Bereiche erhält man Randbedingungen, mit denen die Lösung in beiden Bereichen ermittelt werden kann.

Statt eines an der Wasseroberfläche schwimmenden Körpers behandeln wir die Umströmung eines Körpers, der aus dem Unterwasserschiff und seinem Spiegelbild oberhalb der Wasseroberfläche besteht. Der Wasserboden wird gleichfalls gespiegelt, so daß wir die Umströmung des sogenannten Doppelkörpers zwischen zwei parallelen Wänden untersuchen (Abb. 2.1). Das ist gleichbedeutend mit der Behandlung des schwimmenden Körpers, weil durch die Symmetrie dieser Strömung die Randbedingung an der Wasseroberfläche erfüllt ist. Praktisch geht man noch einen Schritt weiter und spiegelt den Körper unendlich oft an den beiden Wänden. Man braucht dann die Randbedingung an den Wänden nicht explizit zu erfüllen.

2.2 Die Integro-Differentialgleichung

Auf der Grundlage der Theorie schlanker Körper findet man mit der Methode der angepaßten asymptotischen Entwicklung eine Integro-Differentialgleichung

für die zunächst unbekannte Anströmgeschwindigkeit $U(x)$ im Nahfeld.

$$U(x) = \frac{1}{\pi} \int_{L/2}^{L/2} \frac{\frac{d}{d\xi} [U(\xi) * C(\xi)]}{\xi - x} d\xi + v(x) \quad (2.1)$$

Diese Gleichung ist die zentrale Gleichung der Theorie von NEWMAN (1969). Sie entsteht durch Verknüpfen der Lösung im Nahfeld mit der Fernfeldlösung.

$v(x)$ ist der Inhomogenteil der Gleichung, nämlich die relative Quergeschwindigkeit des Schiffskörpers an der Längskoordinate x in bezug auf das ungestörte und weit vom Schiff entfernte Wasser. $U(x)$ ist die von der Längskoordinate x abhängige Anströmgeschwindigkeit der Schiffsquerschnitte in Querschiffsrichtung. Genau genommen ist sie der Grenzwert dieser Geschwindigkeit für größere Breitenkoordinaten y im Strömungsnahfeld und gleichzeitig der Grenzwert für $y = 0$, also an der Mittellinie des Schiffes, im Strömungsfernfeld. Für die Strömung im Fernfeld, d.h. in Abständen vom Schiff, die im Vergleich zur Schiffsbreite in erheblichem Maße größer sind, kann man sich die Strömung statt durch den Schiffskörper durch eine poröse Platte erzeugt vorstellen. Die Größe der Porösität hängt von der Leichtigkeit ab, mit der das Wasser zwischen Schiffsboden und Wasserboden hindurchströmen kann. U ist dann die Geschwindigkeit in Querschiffsrichtung, mit der das Wasser durch die poröse Platte hindurchströmt. Aus U und der Porösität kann man die Kräfte infolge der Umströmung auf einen Schiffsquerschnitt berechnen. In der Bestimmungsgleichung für U wird die Porösität durch den sogenannten Versperrungskoeffizienten C ausgedrückt, der ebenfalls über die Schiffslänge variiert.

2.3 Versperrungskoeffizient

Die genaue Bedeutung des Versperrungskoeffizienten ist in der Abb. 2.1 dargestellt. Der Schiffsquerschnitt und sein Spiegelbild an der Wasseroberfläche befinden sich zwischen zwei parallelen Wänden im Abstand gleich der doppelten Wassertiefe. Sie werden mit der Geschwindigkeit U angeströmt. Das Strömungspotential hat dann über den Breitenkoordinate y den unten gezeichneten Verlauf. Für sehr kleine und sehr große y nähert sich die Strömung einer Parallelströmung. Das Strömungspotential nähert sich dann einer Geraden mit der Steigung U . Diese Asymptoten sind jedoch für positive und für negative Breitenkoordinaten verschieden. Ihr Abstand beträgt $2*U*C$.

Um C zu berechnen, kann man die Spantumströmung z.B. durch Anordnung von Punktquellen innerhalb des Querschnitts und seiner unendlich vielen Spiegelbilder darstellen. Durch Berechnung des Potentials erhält man schließlich:

$$C = \frac{1}{U \cdot H} \sum_{j=1}^M q_j \cdot y_j \quad (2. 2)$$

Hier ist H die Wassertiefe, $q_j \cdot y_j$ das Quellmoment. Um die Quellergiebigkeit q_j im Punkt (y_j, z_j) zu ermitteln, ist folgende Gleichungssystem aufzulösen:

$$\sum_{j=1}^M q_j \cdot B_{kj} = T_k \quad (2. 3)$$

mit

$$B_{kj} = \frac{\partial G}{\partial n} \Big|_{\substack{y=y_k \\ z=z_k}} = \left[n_y \cdot \frac{\partial G}{\partial y} + n_z \cdot \frac{\partial G}{\partial z} \right] \Big|_{\substack{y=y_k \\ z=z_k}} \quad (2. 4)$$

$$T_k = U \cdot \frac{\partial y}{\partial n} \Big|_{y=y_k} = U \cdot n_{yk} \quad (2. 5)$$

$$G(y, z, y_j, z_j) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \operatorname{logsinh} \frac{\pi}{2 \cdot H} [(y+iz) - (y_j+iz_j)] \right\} \quad (2. 6)$$

Hier ist $G(y, z, y_j, z_j)$ die Greenfunktion für die Wirkung einer Quelle im Punkt (y_j, z_j) und aller Spiegelbilder dieser Quelle auf den "Feldpunkt" (y, z) .

(y_k, z_k) ist der Punkt auf der Kontur des Querschnitts. (n_y, n_z) ist hier der Normalenvektor auf der Querschnittskontur.

Die so berechneten Versperrungskoeffizienten stimmen für elliptische Querschnittsform sehr gut mit bekannten theoretischen Werten überein. Außerdem wurden die Versperrungskoeffizienten für ein Frachtschiff und für ein Tanker, für die Modellversuchsergebnisse vorliegen, bei verschiedenen Wassertiefen berechnet.

In abb. 2.2a und Abb. 2.3a sind die Versperrungskoeffizienten der Schiffe über der Schiffslänge für verschiedene Verhältnisse $D/H = \text{Schiffstiefgang zu Wassertiefe}$ aufgetragen. Der C-Wert ist im Mittelschiff am größten und wird an beiden Schiffsenden klein. Je größer die Wassertiefe ist, desto kleiner ist die Versperrung. Im Vergleich zum Frachtschiff sind die C-Kurven für das Tanker im Mittelschiff relativ flach und fallen am Bug und am Heck schnell ab. Das entspricht dem längeren parallelen Mittelschiff des dicken Tanker-Modells.

2.4 Quergeschwindigkeitsverteilung $U(x)$ in flachem Wasser

Wenn der Versperrungskoeffizient C bekannt ist, läßt sich aus der Integro-Differentialgleichung die Geschwindigkeit U , mit der die einzelnen Schiffsquerschnitte angeströmt werden, berechnen. Hierzu kann man für die Funktion $U \cdot C$, wie es bei Finite-Elemente-Rechnungen üblich ist, einen stückweise linearen Verlauf ansetzen. Als Randbedingung setzt man bei reiner Quer- und Drehbewegung an, daß an den Schiffsenden $U \cdot C = 0$ ist. Für den Fall, daß das Schiff auch eine Längsbewegung macht, wird an der Vorderkante des Körpers mit $U \cdot C = 0$, aber an der Hinterkante mit der Bedingung gerechnet, daß die Ableitung von $U \cdot C$ nach der Längskoordinate gleich 0 ist. Dies entspricht der Kutta-Bedingung eines glatten Abflusses bei Tragflügeln. Die Details der numerischen Methode zur Berechnung der Geschwindigkeit $U(x)$ werden hier übergangen.

Die Ergebnisse dieser Berechnung ist in der Abb. 2.2b und 2.3b dargestellt. Während U auf tiefem Wasser gleich

der Quergeschwindigkeit v ist, wird U im Mittelschiffsbereich auf flachem Wasser kleiner als v , weil das Wasser seitlich um das Schiff herum ausweicht. Nur an den Schiffsenden ergibt sich U größer als v .

Abb. 2.4 und Abb. 2.5 zeigen die dimensionslose Funktion $U \cdot C$ in verschiedenen Wassertiefen für das Frachtschiff, entsprechend bei schräger Bewegung und bei reiner Drehung ohne Längsgeschwindigkeit.

2.5 Berechnung der hydrodynamischen Masse und des Massenträgheitsmoments

Der Einfluß des flachen Wassers auf die hydrodynamische Masse und Massenträgheitsmoment bei beschleunigten Schiffsbewegungen läßt sich aus U und dem Verlauf des Versperrungskoeffizienten C über der Schiffslänge berechnen.

Durch Berechnung des Strömungspotentials für die Querbewegung des Schiffes mit der Quergeschwindigkeit v wird die Verteilung der hydrodynamischen Querschnittsmasse formuliert und durch Integration über die Schiffslänge die gesamte hydrodynamische Masse bestimmt:

$$m_y = \rho \int_{-L/2}^{L/2} [2 \cdot H \cdot C(x) \frac{U(x)}{v} - s(x)] dx \quad (2.7)$$

Hier ist $s(x)$ die Fläche des Querschnitts. Aus dieser Gleichung können die zuvor berechneten Funktionen $C(x)$ und $U(x)$ die Masse m_y und ihre Verteilung über die Schiffslänge ermittelt werden. Bei der Ermittlung des Massenträgheitsmoments ist für $v(x)$ die lokale Geschwindigkeit rx infolge der Drehung des Körpers mit der Winkelgeschwindigkeit r einzusetzen. Entsprechend ist die Geschwindigkeit U für das drehende Schiff zu berechnen. Schließlich ergibt sich das hydrodynamische Massenträgheitsmoment:

$$J_z = - \rho \int_{-L/2}^{L/2} s(x) * x^2 dx + 2 * \rho * H \int_{-L/2}^{L/2} x * C(x) \frac{U(x)}{r} dx \quad (2. 8)$$

In Abb. 2.6 ist für die hydrodynamische Masse bei Querbeschleunigung des Schiffes und die hydrodynamischen Trägheitsmomente bei Drehbeschleunigung das Verhältnis zwischen dem Wert bei flachem Wasser zu dem in unendlich tiefem Wasser für das Mariner-Schiff aufgetragen. die Abszisse gibt das Verhältnis zwischen Schiffstiefgang und Wassertiefe an. Außer den berechneten Werten sind noch die in Modellversuchen für dasselbe Schiff gemessenen Kurven von FUJINO (1968) eingezeichnet. Die hydrodynamische Masse wächst also auf flachem Wasser ganz erheblich über ihren Wert in tiefem Wasser an. Der Flachwassereinfluß auf das hydrodynamische Massenträgheitsmoment ist dagegen viel kleiner.

2.6 Der Flachwasser-Einfluss auf Querkraft und Giermoment infolge Driftwinkel und Giergeschwindigkeit

Die Querkraftverteilung an einem schlanken Körper läßt sich auf einfache Weise aus der Impulsänderung der Flüssigkeit in Querrichtung ableiten. Bei stationärer Schräg- und Drehbewegung des Schiffes ist der Querimpuls in jeder Spantebene durch die Quergeschwindigkeit des Spantes und seine hydrodynamische Masse bestimmt. Die Substantielle zeitliche Ableitung dieses Querimpulses ergibt die hydrodynamischen Kräfte und Momente auf den Querschnitt.

Um den Einfluß der Zähigkeit qualitativ zu erfassen, wird vorausgesetzt, daß sich die Strömung etwa im Bereich der Schiffsmittle vom Schiffsrumpf ablöst.

Die hydrodynamischen Derivative in flachem Wasser ergeben sich zu:

$$Y_v = - V \left[-\rho * s(x) + 2 * \rho * H \frac{U_v(x)}{v} C(x) \right]_{x=x_{mv}} \quad (2.9)$$

$$N_v = - V \left\{ x \left[-\rho * s(x) + 2 * \rho * H \frac{U_v(x)}{v} C(x) \right]_{x=x_{mv}} + \int_{x_{mv}}^{L/2} \left[-\rho * s(x) + 2 * \rho * H \frac{U_v(x)}{v} C(x) \right] dx \right\} \quad (2.10)$$

$$Y_r = V * L \left\{ \left[-\frac{x}{L} \rho * s(x) + 2 * \rho * H \frac{U_r(x)}{r * L} C(x) \right]_{x=x_{mr}} - \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{x_{mr}} \left[-\rho * s(x) + 2 * \rho * H \frac{U_r(x)}{r * L} \frac{L}{x} C(x) \right] dx \right\} - m_x * V \quad (2.11)$$

$$N_r = - V * L \left\{ -x_{mr} \left[-\frac{x}{L} \rho * s(x) + 2 * \rho * H \frac{U_r(x)}{r * L} C(x) \right]_{x=x_{mr}} + \int_{-L/2}^{x_{mr}} \left[-\frac{x}{L} \rho * s(x) + 2 * \rho * H \frac{U_r(x)}{r * L} C(x) \right] dx - \int_{x_{mr}}^{L/2} \left[-\frac{x}{L} \rho * s(x) + 2 * \rho * H \frac{U_r(x)}{r * L} C(x) \right] dx \right\} \quad (2.12)$$

Mit den Definitionen:

$$\begin{aligned}
 Y_v &= \frac{\partial Y}{\partial v} \Big|_{u=V_0, v=0, \dot{v}=0, r=0, \dot{r}=0, \delta=0, \dot{\delta}=0} & Y_r &= \frac{\partial Y}{\partial r} \Big|_{u=V_0, v=0, \dot{v}=0, r=0, \dot{r}=0, \delta=0, \dot{\delta}=0} \\
 N_v &= \frac{\partial N}{\partial v} \Big|_{u=V_0, v=0, \dot{v}=0, r=0, \dot{r}=0, \delta=0, \dot{\delta}=0} & N_r &= \frac{\partial N}{\partial r} \Big|_{u=V_0, v=0, \dot{v}=0, r=0, \dot{r}=0, \delta=0, \dot{\delta}=0}
 \end{aligned}$$

(2.13)

Dabei ist $s(x)$ die Querschnittsfläche, $C(x)$ der Ver-sperrungskoeffizient. $U_v(x)$ und $U_r(x)$ sind - in Abhän-gigkeit von der Art der Bewegung - die modifizierte Quergeschwindigkeit in flachem Wasser. x_{mv} bzw. x_{mr} sind die x -Koordinaten, an denen die hydrodynamische Masse maximal wird. Hier bedeutet Y_v beispielweise die Querkraft auf das Schiff, dividiert durch die Querge-schwindigkeit bei Schrägbewegung des Schiffes. Entspre-chend bedeutet Y_r die Querkraft, dividiert durch die Drehgeschwindigkeit. Die Größen N bezeichnet die entsprechenden Drehmomente um die vertikale Achse. Tabelle 2.1 zeigt die nach diesem Verfahren berechneten dimensionslosen Kraft- und Momentenbeiwerte für das Mariner-Schiff. Zum Vergleich sind wieder die im Modell-versuch gemessenen Daten hinzugefügt. Alle Werte werden wesentlich von der Wassertiefe beeinflusst, sie ver-größern sich in flachem Wasser.

2.7 Der Einfluß des Flachwassers auf Ruderkraft und Steuermoment

Bei stationäre Anströmung eines Ruders kann man die Kräfte nach der Methode der tragenden Linie berechnen, indem man als den vertikalen sogenannten gebundenen Wirbel etwa $1/4$ der Profillänge hinter der Rudervorder-kante annimmt.

Die Stärke des Wirbels hängt von der Höhenkoordinaten ab. Waagerecht gehen die s.g. freien Wirbel von dem

gebundenen Wirbel nach hinten bis ins Unendliche ab. Durch diese Wirbel wird die Störung der Anströmung durch das Ruder dargestellt. Vorausgesetzt wird ein kleiner Anstellwinkel zwischen Ruder und Strömung, so daß die Strömung bezüglich des Anstellwinkels linearisiert werden kann. Für endliche Wassertiefe müssen die Wirbel unendlich oft zwischen den beiden Wänden gespiegelt werden. Als Randbedingung wird gefordert, daß an den Stellen $3/4$ der Profillänge hinter der Rudervorderkante die Strömung parallel zum Ruderblatt sein muß. Daraus läßt sich in Verbindung mit den Helmholtzschen Wirbel-sätzen die Verteilung der Wirbelstärke berechnen.

Da das Ruder meistens hinter dem Propeller angeordnet ist, befindet es sich in einem ungleichmäßigen Strömungsfeld, das als Parallelströmung mit einer nur von der Höhenkoordinate abhängigen Geschwindigkeit angenähert wird.

Die Ruderkraft ist dann:

$$R_1 = \rho \int_{z_1}^{z_2} u_0(z) * \Gamma(z) dz \quad (2.14)$$

Die so berechnete Zirkulationsverteilung über die Ruderhöhe und damit auch die Ruderkraft vergrößert sich in flachem Wasser nur geringfügig.

Die für das Ruder allein berechneten Kräfte müssen aber korrigiert werden, weil der Schiffsrumpf von dem Ruder die Ruderumströmung und damit die Kräfte am Gesamtsystem Schiff und Ruder wesentlich verändert. Wir erfassen diese Strömung näherungsweise, indem wir Ruder und Schiff als zwei rechteckige, gegeneinander verdrehte Platten ansehen. Sie liegen in einer konstanten Anströmung parallel zur vorderen Platte. Wegen des sehr klei-

nen Seitenverhältnisses der vorderen Platte, die den Schiffsrumpf annähert, können wir hier nicht mit einem einzelnen gebundenen senkrechten Wirbel rechnen, sondern müssen eine über die Schiffslänge kontinuierlich veränderliche Stärke der gebundenen Wirbel ansetzen. Dafür setzen wir in Höhenrichtung die Wirbelstärkenverteilung als bekannt voraus, die der Breite einer Ellipse entspricht. Dadurch wird die Randbedingung nur in der Symmetrieebenen der Rechteckplatten erfüllt, die der Wasseroberfläche entspricht. Aus der Berechnung der Stärke der gebundenen Wirbel im Bereich des Ruders und des Schiffsrumpfes ist auch die Querkraftverteilung an Ruder und Rumpf bekannt, so daß sich die an Ruder und Rumpf zusammen wirkende Querkraft und das wesentlich wichtigere Steuermoment ergeben.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen (Tabelle 2.1) zeigen, daß der Rumpf vor dem Ruder die Querkraft und das Steuermoment vergrößert:

$$R_2 = R_1 (1 + a_H), \quad a_H > 0 \quad (2.15)$$

Dieser Effekt wird durch einen Faktor $(1+a_H)$ dargestellt; er verstärkt sich in flachem Wasser.

Auch das Steuermoment $R_2 (x_R + \Delta x_L)$ vergrößert sich auf flachem Wasser wesentlich, obwohl sich der Angriffspunkt der Querkraft auf flachem Wasser um Δx_L nach vorn verschiebt. Dies bestätigen auch die Modellversuchsergebnisse. Allerdings gilt dies nur in dem Fall, daß zwischen Schiffsrumpf und Ruder ein ausreichend großer Zwischenraum ist.

Die Details über die Berechnung der Ruderkraft und des Steuermoments sind in IFS-Bericht Nr.466 (ZHAO,1986) erläutert.

3. Berücksichtigung der Rollbewegung auf das Manövrierverhalten

Beim Manövrieren treten Krängungen des Schiffes auf, die ihrerseits wieder Rückwirkungen auf die Manövrierbewegungen haben. Für eine Berücksichtigung dieses Zusammenhangs müßte man die Bewegungsgleichungen in 4 oder 5 Freiheitsgraden lösen (Längs-, Quer-, Roll- und Gierbewegung und möglicherweise die Propellerdrehung) und dabei folgende Kraftwirkungen berücksichtigen:

- Das Rollmoment (um die Schiffslängsachse in Höhe des Gewichtsschwerpunktes) infolge hydrostatischen Auftriebs, hydrodynamischen Drücken auf dem Schiffsrumpf, aerodynamischen Drücken auf das Überwasserschiff, Gewicht und Massenkräften.
- Die Abhängigkeit der Längs- und Querkraft und des Giermoment von der Rollbewegung, wobei die oben genannten Kraftanteile zu unterscheiden sind.

Beim Manövrieren in glatten Wasser verursacht die Krängung des Schiffes aber in aller Regel nur kleine Korrekturen der Quer- und Gierbewegungen. Deshalb wird dieser Zusammenhang hier vereinfacht: Sämtliche von Rollbeschleunigung und der Rollgeschwindigkeit verursachten Kräfte und Momente werden vernachlässigt. Dann braucht der Rollwinkel nicht aus der Rollbeschleunigung integriert zu werden, sondern folgt unmittelbar aus dem Momentengleichgewicht.

3.1 Das Rollmoment

Wie oben schon genannt, besteht das Rollmoment im Grunde genommen aus hydrostatischem Auftrieb, hydrodynamischen Kräften am Rumpf, Windkraft, Gewicht und auch Massenkräften.

Für die Berechnungssimulation werden die Rollmomentanteile wie folgend ermittelt:

Die Wirkung des hydrostatischen Auftriebs wird bezüglich des Rollwinkels linearisiert, d.h. die Krängung wird statt aus der Hebelarmkurve - aus der metazentrischen Höhe abgeschätzt.

Das durch hydrodynamische Kräfte am Rumpf verursachte Rollmoment wird aus der Höhe des hydrodynamischen Massenschwerpunktes der Spanten nach der Theorie schlanker Körper berechnet. Die mit der Spantumströmung in Querschiffsrichtung verbundenen Widerstandskräfte auf das Schiff müssen in einer empirischen Höhe angesetzt werden; nach Schrägschleppversuchen von SON et al. (1981) wird hierfür 65 Prozent des Tiefgangs über den Kiel angenommen.

Das Rollmoment durch Wind wird aus Windkanalergebnissen abgeschätzt.

Wegen der gewählten Lage der Bezugsachse sind die Momente aus dem Gewicht exakt und aus Massenkräften näherungsweise Null.

3.2 Die Abhängigkeit der Längs- und Querkraft sowie des Giermoments von der Rollbewegung

Die hydrodynamischen Massen der Schiffsquerschnitte für horizontale Bewegung werden unter Beachtung der beim Manövrieren entstehenden Krängung berechnet.

Diese Berechnung führt nach der Theorie schlanker Körper zu Querkräften und Giermomenten.

3.2.1 Lewis-Spanten für gekrängte Schiffe

Für die Berechnung werden zuerst die Querschnitte des gekrängten Schiffes durch eine unsymmetrische Verallgemeinerung der bekannten Lewis-Spanten so angenähert, daß die Wasserlinienbreite, die Spantfläche und die Lage des tiefsten Punktes unter der Wasserlinie für den wirklichen Querschnitt und für die benutzte komforme Abbildung des Kreises übereinstimmen. Diese Berechnung entspricht der Methode von SÖDING (1984).

Das dazu benutzte x-y-Koordinatensystem habe seinen Ursprung im Mittelpunkt der Wasserlinie des Querschnitts. x-Achse zeigt nach Steuerbord, y-Achse nach unten. Gerechnet wird mit der komplexen Variablen $z = x + iy$. Der Querschnitt wird angenähert durch konforme Abbildung des Einheitskreises (Index k für Kreis):

$$z_k = e^{i\varphi} \quad (3.1)$$

mit der analytischen Funktion (Index l für Lewis-Spanten):

$$z_l(z_k) = A_0 * z_k + B_0 * z_k^{-1} + C_0 * z_k^{-2} + D_0 * z_k^{-3} - C_0 \quad (3.2)$$

Die Konstanten A_0 bis D_0 werden so bestimmt, daß die konforme Abbildung des Halbkreises und die anzunähernde Spantkontur einander ähnlich werden. Dies führt auf ein System von fünf teils nichtlinearen Gleichungen für die Konstanten A_0 bis D_0 und φ_0 . Dabei ist φ_0 der Wert φ , der mit (3.1) und (3.2) den tiefsten Punkt des Spants ergibt:

$$\frac{dy(\varphi_0)}{d\varphi} = 0, \quad \text{folglich}$$

$$(A_0 - B_0) \cos \varphi_0 - 2 C_0 \cos(2 \varphi_0) - 3 D_0 \cos(3 \varphi_0) = 0 \quad (3.3)$$

$$\text{Wasserlinienbreite} = 2 (A_0 + B_0 + D_0)$$

$$\text{Spantfläche} = \frac{\pi}{2} (A_0^2 - B_0^2 - 2 C_0^2 - 3 D_0^2)$$

$$\begin{aligned} \text{Tiefgang} &= (A_0 - B_0) \sin \varphi_0 - C_0 \sin(2 \varphi_0) \\ &\quad - D_0 \sin(3 \varphi_0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Breitenkoordinate} \\ \text{am tiefsten Punkt} &= (A_0 + B_0) \cos \varphi_0 + C_0 \cos(2 \varphi_0) \\ &\quad + D_0 \cos(3 \varphi_0) \end{aligned}$$

Das System ist für vernünftige Werte der Spantvölligkeit (etwa zwischen 0.5 und 1.0) mit einem aus dem Newton-Algorithmus abgeleiteten Iterationsverfahren zuverlässig und schnell lösbar.

Aus den so bestimmten Kennwerten A_0 bis D_0 wird die unsymmetrische Spantform unter verschiedenen Krängungswinkeln ermittelt.

Abb. 3.1 zeigt 11 Querschnitte eines Schiffes unter 5 , 10 sowie 15 Grad Krängung.

3.2.2 Die Versperrungskoeffizienten für unsymmetrische Querschnitte

Aus den so ermittelten unsymmetrischen Querschnitten folgen dann wie in Kapitel 2 die Versperrungskoeffizienten der Schiffe auf flachem Wasser.

Die Versperrungskoeffizienten bei der Krängung sind meistens größer als ohne Krängung, siehe Tabelle 3.1 und 3.2. Bei größeren Krängungen sind die Werte größer, besonders für die Spanten mit größerer Völligkeit. Unter Krängung vergrößern sich die Versperrungskoeffizienten bei Wassertiefeverhältnis $D/H = 0.667$ viel stärker als bei $D/H = 0.400$. Die Querschnittformen haben sich unter Krängung verändert und die Wassertiefe unter Krängung ist größer als ohne Krängung. (Die Lage des tiefsten Punkts der Querschnitte unter der Wasserlinie bei Krängungswinkel ϕ : $y_0 = D \cos \phi + Y_0 \sin \phi$ größer ist als Tiefgang D , deshalb gilt es $y_0/H > D/H$). Weiter werden die hydrodynamische Masse für Querbewegung und das Trägheitsmoment bei Drehbewegung um die Hochachse auf flachem Wasser unter Krängung berechnet. Die hydrodynamische Querkraft und das Drehmoment um die z-Achse werden mit der in Kapitel 1 beschriebenen Methode ermittelt. Die Ergebnisse in Tabelle 3.3 zeigen, daß die Krängung diese Werte nur etwas, aber nicht vernachlässigbar wenig verändert. Im flachen Wasser erhöhen sich die Werte mehr als im tiefen Wasser.

3.2.3 Querwiderstand bei Krängung

Für die Abhängigkeit des Querwiderstands vom Krängungswinkel wird es angenommen, daß der Querwiderstandsbeiwert der Schiffsspannten eine lineare Funktion des Krängungswinkels ist. Für den Querwiderstand ist beim ungekrängten Schiff die Geschwindigkeitskomponente des Wassers senkrecht zur Kiellinie massgebend. Dagegen wird bei einem Krängungswinkel 25 Grad die Geschwindigkeit senkrecht zur Kimm auf der eintauchenden Seite (genauer: Verbindungslinie der tiefsten Punkte der gekrängten Spannten) entscheidend. Bei anderen Krängungswinkeln sind die Quergeschwindigkeit linear zu interpolieren. Diese Annahmen gestatten es auch, die Abhängigkeit vom Krängungswinkel der Kräfte und Momente an gierenden Schiffen zu berechnen.

Tabelle 3.4 zeigt den Einfluß der Krängung auf das Manövrierverhalten. Dazu wurden mit den wie beschrieben bestimmten Kräften für ein Modell des Mariner-Schiffes Drehkreisversuche mit 35 Grad Ruderwinkel bei verschiedenen Anfangsgeschwindigkeit mit zwei verschiedenen metazentrischen Höhen simuliert: $GM = 0.6$ m für relativ starke Krängung im Drehkreis (etwa 10 Grad bei 25 Knoten Anfangsgeschwindigkeit), und $GM = 100$ m, was einer Vernachlässigung der Krängung entspricht. Die Ergebnisse zeigen, daß die Krängung vor allem für die Seitenabweichung bei Höherer Schiffsgeschwindigkeit wesentlich ist.

4. Erweiterung für geringe Vorwärts- und Rückwärts- geschwindigkeit

Die größten hydrodynamische Kräfte am manövrierenden Schiff sind die Querkraft und das Giermoment infolge des Driftwinkels und der Gierbewegung des Rumpfes. Um Schiffsmanöver rechnerisch simulieren zu können, müssen vor allem die Querkraft Y und das Giermoment N als Funktionen des Driftwinkels β und der Giergeschwindigkeit r ermittelt werden.

Für gewöhnliche Rudermanöver reicht es dabei aus, einen relativ kleinen Bereich dieser Bewegungsvariablen zu untersuchen, z.B. üblicherweise $\beta = -15$ bis 15 Grad und $r' = r \cdot L/u = -0.3$ bis 0.3 . Wenn dagegen radikale Maschinenmanöver simuliert werden sollen, zumal unter Berücksichtigung größerer Steuer- oder Störkräfte in seitlicher Richtung, wie sie z.B. durch Querstrahler, Schlepper und Wind erzeugt werden können, kann man nicht mehr voraussetzen, daß die Quergeschwindigkeit v und die Giergeschwindigkeit r klein gegen die Längsgeschwindigkeit u seien. Man muß dann die Kombinationen (u,v) und (u,r) jeweils in allen "vier Quadranten" untersuchen, d.h. die Längsgeschwindigkeit u vorwärts und rückwärts in Verbindung mit der Quergeschwindigkeit v bzw. Giergeschwindigkeit r nach Steuerbord und Backbord. Die Manövrierzustände für geringe Vorwärts- und Rückwärtsgeschwindigkeiten, bei denen quadratisch mit den Geschwindigkeiten anwachsende Kräfte und Momente dominieren, werden durch diese Untersuchung ermittelt.

Für die Untersuchung der Kombinationen (u, v) und (u, r) in vier Quadranten ist es hilfreich, analog dem üblichen Driftwinkel

$$\beta = \text{Arctg}\left(-\frac{v}{u}\right) \quad (4. 1)$$

einem "Gierwinkel"

$$\gamma = \text{Arctg}\left(\frac{L \cdot r}{2 \cdot u}\right) \quad (4. 2)$$

einzuführen, der als der örtliche Driftwinkel am Heck infolge einer Drehgeschwindigkeit r und Längsgeschwindigkeit u veranschaulicht werden kann (Abb. 4.1).

4.1 Querkraft und Giermoment infolge Driftwinkel und "Gierwinkel" in vier Quadranten

Für die Querkraft und das Giermoment in vier Quadranten gibt es bisher schon mehrere Untersuchungen, im wesentlichen sind meistens experimentelle Untersuchungen. Z.B. von TUJI et al. (1969) und SHARMA et al. (1981). SHARMA hat Schrägschlepp- und Drehversuche in vier Quadranten gemacht, und die Ergebnisse analysiert. Seiner Meinung nach können die Kräfte am Schiffsrumpf infolge β und γ als die Summe von drei Strömungstheoretisch wesentlich verschiedenen Wirkungen aufgefaßt werden: Potentialtheoretische Wirkung, Tragflügelwirkungen und Querströmungswiderstand.

Um die entsprechenden mathematischen Ausdrücke zur Berechnung der Querkraft und des Giermoments bei größeren Winkeln β oder γ bzw. bei geringer Längsgeschwindigkeit zu ermitteln, muß das physikalische Strömungsphänomen berücksichtigt werden.

Abb. 4.2 zeigt eine allgemeine Darstellung der Querkraft $Y(\beta)$ und $Y(\gamma)$ bzw. des Giermoments $N(\beta)$ und $N(\gamma)$ von Versuchsergebnissen. Bei kleinem Driftwinkel und "Gierwinkel" kann der Schiffsrumpf als eine tragende Fläche betrachtet werden. Die Neigungen der hydrodynamischen Kräfte nach β bzw. γ an Enden der Kurven ($\beta, \gamma = 0$ in Abb. 4.2) stehen in direkter Beziehung zu den hydrodynamischen Derivativen Y_v', N_v', Y_r' und N_r' (für Vorwärtsfahrt):

$$\begin{array}{ll}
Y_{\beta}' \Big|_{\beta=0^{\circ}} = - Y_v' \frac{L}{D} & Y_{\gamma}' \Big|_{\gamma=0^{\circ}} = 2 * Y_r' \frac{L}{D} \\
N_{\beta}' \Big|_{\beta=0^{\circ}} = - N_v' \frac{L}{D} & N_{\gamma}' \Big|_{\gamma=0^{\circ}} = 2 * N_r' \frac{L}{D}
\end{array}
\tag{4. 3}$$

mit

L = Schiffslänge

D = Schiffstiefgang

Für Rückwärtsfahrt stehen die Werte Y_{β}' , N_{β}' , Y_{γ}' und N_{γ}' bei $\beta, \gamma = 180$ Grad in genau der gleichen Beziehung zu den hydrodynamischen Derivativen, die für Rückwärtsfahrt des Schiffes ermittelt werden können.

Wenn das Schiff sich in Querrichtung ohne Vorwärts- oder Rückwärtsgeschwindigkeit bewegt, d.h. mit dem Driftwinkel $\beta = 90$ Grad, dann bestehen die auf den Schiffsrumpf angreifenden Kräfte hauptsächlich nur aus dem Querströmungswiderstandseffekt, so daß der $Y'(\beta)$ -Wert bei $\beta = 90$ Grad gleich dem mittleren Querwiderstandsbeiwert \bar{C}_D ist, mit dem Vorzeichen der Quergeschwindigkeit v :

$$Y'(\beta) \Big|_{\beta=90^\circ} = \frac{\frac{\rho}{2} \int_{-L/2}^{L/2} C_D(x) * D(x) * v |v| dx}{\frac{\rho}{2} L * D * v^2} = \text{sgn}(v) * \bar{C}_D$$

(4. 4)

Ähnlich gilt es:

$$N'(\beta) \Big|_{\beta=90^\circ} = \frac{\frac{\rho}{2} \int_{-L/2}^{L/2} C_D(x) * D(x) * v |v| x dx}{\frac{\rho}{2} L^2 * D * v^2}$$

$$= \text{sgn}(v) \frac{\int_{-L/2}^{L/2} C_D(x) * D(x) * x dx}{L^2 * D} \quad (4. 5)$$

$$\begin{aligned}
 Y'(\gamma) \Big|_{\gamma=90^\circ} &= \frac{\frac{\rho}{2} \int_{-L/2}^{L/2} C_D(x) * D(x) * r * x |r * x| dx}{\frac{\rho}{2} L * D \left(\frac{L * r}{2}\right)^2} \\
 &= \operatorname{sgn}(r) \frac{4 \int_{-L/2}^{L/2} C_D(x) * D(x) * x |x| dx}{L^3 * D} \quad (4.6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N'(\gamma) \Big|_{\gamma=90^\circ} &= \frac{\frac{\rho}{2} \int_{-L/2}^{L/2} C_D(x) * D(x) * r * x |r * x| x dx}{\frac{\rho}{2} L^2 * D \left(\frac{L * r}{2}\right)^2} \\
 &= \operatorname{sgn}(r) \frac{4 \int_{-L/2}^{L/2} C_D(x) * D(x) * x^2 |x| dx}{L^4 * D} \quad (4.7)
 \end{aligned}$$

Da die Schiffsform - mit Ausnahme des rechtsdrehenden Propellers - eine Symmetrie um die Mittellängsebene aufweist, müßten sowohl Y als auch N streng ungerade Funktionen von β und γ sein. In Abb. 4.2, ..., 4.8 sind die Werte deshalb nur in zwei Quadranten dargestellt.

Aus den Kenntnissen der hydrodynamischen Derivative bzw. der Querwiderstandsbeiwerte und aus den Versuchsergebnissen können wir zur Ermittlung der Querkraft und des Giermoments infolge β und γ in vier Quadranten mehrere mathematische Formeln sachbezogen entwickeln. Die sämtliche Parameter in den Formeln sind physikalisch interpretierbar.

Ein Beispiel für solche Formeln ist das folgende, wobei die Beiwerte der Kräfte als einfache trigonometrische Polynome der Winkelvariablen β und γ in allen vier Quadranten angenähert werden:

$$Y(\beta)' = \text{sgn}(\beta) [A_1 * \sin(2|\beta|) * \cos \beta + A_2 * \sin^2 \beta] \quad (4. 8)$$

$$N(\beta)' = \text{sgn}(\beta) [B_1 * \sin(2|\beta|) * (1 - 0.5|\cos \beta|) + B_2 * \sin^2 \beta] \quad (4. 9)$$

$$Y(\gamma)' = \text{sgn}(\gamma) [C_1 * \sin(2|\gamma|) * (|\cos^{1/3} \gamma| - 0.2) + C_2 * \sin^2 \gamma] \quad (4.10)$$

$$N(\gamma)' = \text{sgn}(\gamma) [D_1 * \sin(2|\gamma|) * (\cos \gamma + 0.5) + D_2 * \sin^2 \gamma] \quad (4.11)$$

Hier ist der Koeffizient A_1 (bzw. B_1 , C_1 und D_1) eine Funktion vom hydrodynamischen Derivat Y_v' (bzw. N_v' , Y_r' und N_r'). A_2 , B_2 , C_2 , und D_2 sind entsprechend Funktionen von den Querwiderstandsbeiwerten der Spanten.

Die theoretischen Berechnungen weisen aus, daß es zwischen den Werten von hydrodynamischen Derivativen bei Vorwärtsfahrt und Rückwärtsfahrt nur geringfügige und vernachlässigbare Unterschiede gibt. Darum wird in diesen Formeln angenommen, daß die hydrodynamischen Werte für β , $\gamma = 180$ Grad dieselben wie für β , $\gamma = 0$ Grad sind.

Abb 4.3a zeigt die rechnerischen Ergebnisse mit dieser Methode, Abb. 4.3b zeigt die Versuchsergebnisse von SHARMA (1984) für dasselbe Schiff. Abgesehen von verschiedenen angenommenen C_0 -Werten stimmen die Kraftbeiwertkurve ziemlich gut überein.

4.2 Berechnung der Kräfte in vier Quadranten auf flachem Wasser

Aus den Berechnungen in Kapitel 2 erfahren wir, daß alle vier hydrodynamischen Derivative wesentlich von der Wassertiefe beeinflußt werden, wenn diese geringer als etwa das Dreifache des Schiffstiefgangs ist. Für $D/H > 0.8$ können sie auf mehr als das Vierfache ihres Wertes in tiefem Wasser anwachsen. Dies beeinflußt natürlich entsprechend die Kräfte in vier Quadranten.

Nach den Versuchsergebnissen von OLTMANN (1986) und TUJI et al. (1969) nimmt der Querwiderstandsbeiwert mit abnehmender Wassertiefe deutlich zu (Abb. 4.4). Diese Tendenz kann die hydrodynamische Kräfte auch wesentlich beeinflussen.

Die mittleren Querwiderstandsbeiwerte \bar{C}_D auf flachem Wasser (bezogen auf die Quergeschwindigkeit des Wassers relativ zum Schiffsquerschnitt an der äußeren Grenzen des Nahfeldes) können mit einer Regressionsformel wie folgt ermittelt werden:

$$\bar{C}_{D \text{ flach}} = \bar{C}_{D \text{ tief}} + \frac{2.5 (D/H)^2}{(1-D/H)^{1/4}} \quad (4.12)$$

Abb. 4.5 bis 4.8 zeigen die Verläufe der hydrodynamischen Kräfte $Y(\beta)$, $N(\beta)$, $Y(\gamma)$ und $N(\gamma)$ für das Mariner-Schiff. Diese Kurven sind durch die obere Berechnung ermittelt und charakterisieren die Kräfte in vier Quadranten für verschiedene Wassertiefe.

5. Erfassung der Drehzahländerung bei Manövern und Einbeziehung des Propellermanövers

Infolge der äußeren Störungen wie Wind, Strömung und Seegang sowie bei Hafeneinfahrt und -ausfahrt, muß ein Schiff sich beschleunigen oder verzögern, manchmal auch rückwärtsfahren oder stoppen. Deshalb bleibt die Antriebsmaschinendrehzahl bzw. Propellerdrehzahl im manövrierverlauf nicht unveränderlich. Es ist dann zu untersuchen, wie sich die Drehzahl während der Manövrierbewegung verändert und wie diese Änderung das Manövrierverhalten des Schiffes praktisch beeinflußt.

5.1 Propellerschub und -drehmoment in vier Quadranten

Wenn ein Schiff vorwärts fährt, ist seine Geschwindigkeit u positiv, und die Propellerdrehzahl n normalerweise auch positiv. In diesen Fall sind zur Untersuchung der Zusammenarbeit von Schiff, Antriebsmaschine und Propeller nur die positiven u und n - in erstem Quadranten - zu berücksichtigen.

Wenn die Propellerdrehzahl n negativ wird (d.h. die Drehrichtung des Propellers sich umkehrt), verändert sich die Schiffsgeschwindigkeit u auch entsprechend. Dann wird die Freifahrtscharakteristik des Propellers den sogenannten ersten Quadranten überschreiten. Die Kombinationen der Geschwindigkeiten mit Drehzahl für verschiedene Fahrzustände können in allen vier Quadranten liegen. Für die Untersuchung der Drehzahländerung und des Propellermanövers mußte man den Propellerschub und das Propellerdrehmoment im gesamten Bereich der vier Quadranten bestimmen, damit man sie in allen möglichen Manövrierfällen ermitteln kann.

Während in der Nähe des Propeller-Auslegungspunktes die üblichen Beiwerte K_r und K_0 in der Wageninger Polynomdarstellung benutzt werden, werden bei starken Abweichungen vom Auslegungspunkt, insbesondere bei Rückwärtsfahrt und/oder Rückwärtsdrehzahl des Propellers, die Koeffizienten

$$C_T^* = \frac{T_P}{\pi \cdot \rho \cdot D_P^2 [v_A^2 + (0.7 \cdot \pi \cdot n \cdot D_P)^2]} \quad (5.1)$$

$$C_Q^* = \frac{Q_P}{\pi \cdot \rho \cdot D_P^3 [v_A^2 + (0.7 \cdot \pi \cdot n \cdot D_P)^2]} \quad (5.2)$$

zur Bestimmung des Schubs T_P und des Propellermoments Q_P benutzt. Die Beiwerte C_T^* und C_Q^* können für jeden Wert des Propellerfortschrittswinkels

$$\varepsilon = \text{Arctg}\left(\frac{v_A}{0.7 \cdot \pi \cdot n \cdot D_P}\right) \quad (5.3)$$

zwischen 0 und 360 Grad, nämlich in allen vier Quadranten, gebildet und durch mathematische Darstellungen angenähert werden. Solche Darstellung verwendet nicht die übliche Fortschrittsziffer, weil diese bei der Drehzahl 0 gegen unendlich geht.

Abb. 5.1 zeigt die Versuchsergebnisse von LAMMEREN et al. (1969), ein "4-Quadranten-Propellerdiagramm" für B4-70 propeller.

Der wesentliche Verlauf dieser Kurven kann unter Verzicht auf die formale Fourier-Reihe schon mit zwei Termen angenähert werden. Z.B.

$$C_Q^*(\varepsilon) = k_{1Q} \cdot \cos(\varepsilon) \cdot |\cos \varepsilon| + k_{2Q} \cdot \sin(\varepsilon) \cdot |\sin \varepsilon| \quad (5.4)$$

$$C_T^*(\varepsilon) = k_{1T} \cdot \cos(\varepsilon) \cdot |\cos \varepsilon| + k_{2T} \cdot \sin(\varepsilon) \cdot |\sin \varepsilon| \quad (5.5)$$

Die Konstanten k_{1Q} , k_{2Q} , k_{1T} und k_{2T} werden durch die K_Q - und K_T -Werte bei Geschwindigkeit $v_A = 0$ und bei Auslegungsgeschwindigkeit bestimmt, d.h., die C_Q^* - und C_T^* -Werte werden auf zwei nahestehenden Punkten festgelegt.

Um eventuell größere Ausweichungen zu vermeiden, insbesondere für die C_Q^* - und C_T^* -Werte nahe $\varepsilon = 0$ Grad und $\varepsilon = 180$ Grad, verwenden wir die genauen K_Q - und K_T -Werte für ε zwischen 0 und den Nulldurchgängen von K_Q und K_T (wo K_Q oder K_T gleich Null ist) bzw. zwischen 180 Grad und den Nulldurchgängen im 3. Quadranten; für sonstige Bereiche werden die C_Q^* - und C_T^* -Verläufe durch Polynomzüge angenähert.

Auf Grund von Versuchsergebnissen für verschiedene Propellerparameter von LAMMEREN et al. (1969) werden einige Eckpunkte ausgewählt, deren Werte durch Propellersteigung P , Propellerdurchmesser D_P , Propellerflächenverhältnis A_ε/A_0 und Propellerflügelzahl Z_P bestimmt werden können, z.B.:

$$C_T^*(\varepsilon=80^\circ) = 0.100 \frac{P}{D_P} - 0.300 \frac{A_\varepsilon}{A_0} + 0.010 * Z_P - 0.440$$

$$C_T^*(\varepsilon=120^\circ) = - 0.075 \frac{P}{D_P} - 0.670 \frac{A_\varepsilon}{A_0} + 0.014 * Z_P - 0.242$$

$$C_T^*(\varepsilon=260^\circ) = - 0.250 \frac{P}{D_P} + 0.470 \frac{A_\varepsilon}{A_0} - 0.014 * Z_P + 0.947$$

$$C_T^*(\varepsilon=300^\circ) = - 0.200 \frac{P}{D_P} + 0.530 \frac{A_\varepsilon}{A_0} - 0.006 * Z_P + 0.683$$

(5. 6)

$$C_Q^*(\varepsilon=80^\circ) = - 0.1225 \frac{P}{D_P} - 0.1567 \frac{A_\varepsilon}{A_0} + 0.0013 * Z_P + 0.0963$$

$$C_Q^*(\varepsilon=120^\circ) = - 0.1375 \frac{P}{D_P} - 0.7670 \frac{A_\varepsilon}{A_0} + 0.0003 * Z_P + 0.0743$$

$$C_Q^*(\varepsilon=260^\circ) = 0.1000 \frac{P}{D_P} - 0.1267 \frac{A_\varepsilon}{A_0} + 0.0134 * Z_P + 0.0893$$

$$C_Q^*(\varepsilon=300^\circ) = 0.1125 \frac{P}{D_P} - 0.1200 \frac{A_\varepsilon}{A_0} + 0.0060 * Z_P + 0.0725$$

(5. 7)

Die Ergebnisse einer Beispielberechnung für den Propeller von einem Tanker mit $P = 5.893 \text{ m}$, $D_P = 7.91 \text{ m}$, $A_E/A_0 = 0.6$ und $Z_P = 5$ sind in Abb. 5.2 dargestellt. Die Kurven sind näher approximiert zu den Versuchskurven als die mit zwei trigonometrischen Termen.

5.2 Steuerwirkung von Propellern

Mit der Steuerwirkung eines Propellers ist hier die Drehwirkung gemeint, die bei in Mittelstellung festgehaltenem Ruder der arbeitende Propeller allein erzeugt. Bei der von der hydrodynamischen Unsymmetrie eines Einschraubers herrührende Steuerwirkung ist zwischen Betriebspunkt und Stoppmanöver wesentlich zu unterscheiden.

Die vom Propeller verursachte Unsymmetrie der Strömung induziert am System Rumpf-Propeller-Ruder eine Querkraft und ein Giermoment. Für deren Größe ist bei Vorwärtsdrehung des Propellers vor allem die Ruderanordnung entscheidend. Große Unsymmetrie und damit ein erheblicher neutraler Ruderwinkel treten auf, wenn das Ruder nicht bis unterhalb der Propellerstrahlgrenze reicht. Normalerweise ist diese Unsymmetrie bei Vorwärtsdrehung des Propellers aber nicht bedeutend und kann in den Programmen einfach durch einen neutralen Ruderwinkel ungleich Null berücksichtigt werden.

Bei Stoppmanövern, d.h. bei vorwärts fahrendem Schiff und Rückwärtsdrehung des Propellers, entstehen dagegen viel größere Querkräfte Y_P und Giermoment N_P . Diese sind besonders wichtig, weil das Ruder bei Stoppmanövern praktisch wirkungslos ist, so daß die Unsymmetrie nicht ausgeglichen werden kann. Der Einfluß der Schiffsgeschwindigkeit U und der Propellerdrehzahl n auf die vom Propeller bei Rückwärtsdrehung verursachten Kräfte wurde von FUJINO (1978), NOMOTO (1978) und anderen für verschiedene Schiffstypen durch Modellversuche ermittelt. Abb. 5.3 zeigt die vom Propeller herrührenden hydrodynamischen Kräfte bei Rückwärtsdrehung des Propellers.

Wenn die Quer- und Gierbewegung vernachlässigt werden können, lassen sich Y_p und N_p für ein bestimmtes Schiff als Funktion der Propellerfortschrittsziffer $J = v_A / (n \cdot D_p)$ angeben. Nach den Versuchsergebnissen wurden Regressionsformeln für Y_p und N_p aufgestellt, die in dem für Stoppmanöver typischen Bereich für J etwa zwischen -1.5 und 0 gelten. Z.B. folgende Regressionsformeln

$$Y_p = Y'_p \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D_p^4 \quad (5.8)$$

$$N_p = N'_p \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D_p^5 \quad (5.9)$$

$$Y'_p = -0.0865 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot J}{-0.71}\right) \quad (5.10)$$

$$N'_p = -0.0268 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot J}{-0.68}\right) \quad (5.11)$$

können für verschiedenen Schiffstypen verwendet werden. Ansätze für theoretische Berechnungsmethoden liegen bisher nicht vor.

Aufgrund der Ergebnisse aller genannten Versuche kann der Einfluß des Ruderwinkels und der Schiffsgeschwindigkeit (bei festem J) auf Y_p und N_p vernachlässigt werden. Der Einfluß des Driftwinkels und der Giergeschwindigkeit wird wie für das Schiff bei Vorausfahrt üblich bestimmt und addiert.

5.3 Bestimmung der Drehzahländerung

5.3.1 Drehmoment der Schiffsantriebsmaschine

Um die Drehzahländerung zu bestimmen, braucht man nicht nur die Kenntnis des Propellermoments, sondern auch die des Moments der Antriebsmaschine.

Aus dem Kennfeld der Schiffsantriebsmaschine erhält man eine Aussage über das Betriebsverhalten der Maschine in ihrem gesamten Verwendungsbereich, wie es in Abb. 5.4 zeigt. Das Antriebsmoment Q_E hängt grundsätzlich von der Drehzahl, dem Brennstoffdurchsatz (die sogenannte "Füllung") sowie von Art und Zustand der Antriebsanlage ab. Der in Abb. 5.4 gezeigte Bereich wird eingegrenzt durch n_{min} , n_{max} , die maximale mechanische Beanspruchung sowie die Rauchgrenze (Pumpgrenze des Abgasturboladers).

Zur Berechnung der Drehzahländerung bei der Manövrierbewegung werden die Nenndrehzahl am Propeller n_0 und das maximale Maschinenmoment am Propeller Q_{Emax} eingegeben. Normalerweise werden als n_{min} etwa $0.3 \cdot n_0$ und als n_{max} etwa $1.05 - 1.10 \cdot n_0$ vorausgesetzt. Wenn die Drehzahl n größer als n_0 und kleiner als n_{max} ist, bleibt das Drehmoment Q_E konstant und zwar gleich Q_{Emax} ; wenn n kleiner als n_0 und größer als n_{min} ist, wird eine Parabel-Funktion für Q_E verwendet:

$$Q_E = \begin{cases} 0 & \text{für } |n| < n_{min} \\ Q_{Emax} \left[a + \frac{b |n|}{n_0} + c \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 \right] & \text{für } n_{min} < |n| < n_0 \\ Q_{Emax} & \text{für } n_0 < |n| < n_{max} \end{cases} \quad (5.12)$$

5.3.2 Propellerdrehungsgleichung

Die bisher behandelten drei Freiheitsgrade der Schiffsbewegung werden ergänzt um einen Freiheitsgrad für die Propellerdrehung. Die zugehörige Bewegungsgleichung hat allerdings viel kürzere Zeitkonstanten als die Schiffsbewegungen. Um die entsprechend kürzeren Zeitschrittweiten in der Simulation und damit wesentlich verlängerte Rechenzeiten zu vermeiden, wird eine vereinfachte Bewegungsgleichung angesetzt, die bei beliebig großem Zeitschritt stabil ist.

Die Gleichung für Propellerdrehung ist:

$$Q_E + Q_P = I_{EP} * 2 * \pi \frac{dn}{dt} \quad (5.13)$$

Hier bedeutet I_{EP} die Summe der Massenträgheitsmomente aller rotierenden Teile des Antriebssystems einschließlich des hydrodynamischen Massenträgheitsmoments.

Im stationären Betriebszustand wird $dn/dt = 0$ und damit

$$Q_E + Q_P = 0 \quad (5.14)$$

Das auf gleiche Drehzahl bezogene Drehmoment von Antriebsmaschine und Propeller ist in diesem Zustand dem Betrage nach gleich, wenn man die mechanischen Verluste vernachlässigt (Wellengenerator kann nicht vernachlässigt werden. Die Verluste davon sollen berücksichtigt werden).

Bei instationären Vorgängen unterscheiden sich $Q_E = Q_E(t)$ und $Q_P = Q_P(t)$ nach Größe und möglicherweise auch Richtung. Der Verlauf des von der Antriebsmaschine abgegebenen Drehmomentes $Q_E(t)$ hängt von der Drehzahl und Füllung ab. Das Propellerdrehmoment $Q_P(t)$ läßt sich in Abhängigkeit von der Propellerdrehzahl n und der Schiffsgeschwindigkeit u darstellen.

5.3.3 Bestimmung der möglichen bzw. technisch zulässigen Drehzahl

Zur Berechnung der Drehzahländerung beim Manövrieren von Schiffen sind einige technische Daten erforderlicherweise als bekannt vorausgesetzt: Die Drehzahl bei Manövrierbeginn n_1 und die für die Maschine möglich zeitliche Drehzahländerung $|n|$.

In einem positiven Zeitintervall Δt ist die Drehzahländerung gleich $\Delta t * |n|$. Die mögliche veränderte Maschinendrehzahl n ist im Bereich:

$$n_1 - \Delta t |\dot{n}| \leq n \leq n_1 + \Delta t |\dot{n}| \quad (5.15)$$

Falls eine gewünschte Drehzahl n_w erfordert wird, kann die mögliche veränderte Drehzahl n nur zwischen zwei Überlastgrenzwerten liegen:

$$n_{g \min} \leq n \leq n_{g \max} \quad (5.16)$$

mit

$$n_{g \max} = \min (n_w, n_1 + \Delta t |\dot{n}|) \quad \text{für } n_w > n_1$$

$$n_{g \min} = n_1 - \Delta t |\dot{n}| \quad (5.17)$$

oder

$$n_{g \max} = n_1 + \Delta t |\dot{n}| \quad \text{für } n_w < n_1$$

$$n_{g \min} = \max (n_w, n_1 - \Delta t |\dot{n}|) \quad (5.18)$$

Eine gewünschte Drehzahl, die außerhalb des Bereichs $(n_1 - \Delta t |\dot{n}|, n_1 + \Delta t |\dot{n}|)$ liegt, wird im Zeitintervall Δt nicht beachtet.

Das Propellermoment Q_p bei verschiedenen Drehzahlen n im möglichen Fahrzustand wird in Abschnitt 5.1 ermittelt. Das Drehmoment der Antriebsmaschine kann durch Gleichung (5.8) festgelegt werden. Um gegebenenfalls einen Schnittpunkt für beide Momente zu suchen, haben wir die beiden Größen zu vergleichen.

Beim Manöverbeginn mit Drehzahl n_1 ist das Propellerdrehmoment gleich $Q_p(n_1)$ und das Maschinenmoment gleich $Q_E(n_1)$. Falls $Q_E(n_1) < Q_p(n_1)$ ist, wird die Drehzahl reduziert. Man berechnet dann das Propellerdrehmoment $Q_p(n_{g \min})$. Falls gleichzeitig noch $Q_E(n_1) < Q_p(n_{g \min})$ ist, wird die jetzige Drehzahl n_1 auf den kleinsten Wert $n_{g \min}$ gesetzt, den die Antriebsmaschine im Zeitintervall Δt erreichen kann, nämlich: $n_2 = n_{g \min}$.

Für $Q_E(n_{gmin}) < Q_P(n_1) < Q_E(n_1)$ wird die Drehzahl linear interpoliert:

$$n_2 = n_1 - \Delta t |\dot{n}| \frac{Q_E(n_1) - Q_P(n_1)}{Q_P(n_{gmin}) - Q_P(n_1)} \quad (5.19)$$

Um die Drehzahl noch genauer zu bestimmen, kann eine Korrektur gemacht werden:

$$n_{2k} = n_2 - \Delta t |\dot{n}| \frac{Q_E(n_2) - Q_P(n_2)}{Q_P(n_{gmin}) - Q_P(n_1)} \quad (5.20)$$

n_2 bzw. n_{2k} sind bestimmt zwischen n_{gmin} und n_{gmax} . Anderenfalls, wenn $Q_E(n_1) > Q_P(n_1)$ und auch $Q_E(n_1) > Q_P(n_{gmax})$, wird n den größten Wert n_{gmax} annehmen. Falls $Q_P(n_1) < Q_E(n_1) < Q_P(n_{gmax})$, ergibt sich lineare Interpolation:

$$n_2 = n_1 + \Delta t |\dot{n}| \frac{Q_E(n_1) - Q_P(n_1)}{Q_P(n_{gmax}) - Q_P(n_1)} \quad (5.21)$$

Und der korrigierte Wert:

$$n_{2k} = n_2 + \Delta t |\dot{n}| \frac{Q_E(n_2) - Q_P(n_2)}{Q_P(n_{gmax}) - Q_P(n_1)} \quad (5.22)$$

Bisher haben wir die richtige Drehzahl für den Zeitpunkt $t + \Delta t$ gewählt. Für den nächsten Zeitschritt wird der Wert n_{2k} als der Anfangswert des Zeitintervalls angenommen. Weiterhin wird unter Beachtung der gewünschten Drehzahl n_w eine neue Drehzahl ebenso wie im ersten Schritt für $t + \Delta t$ bestimmt.

6. Einbeziehung des Querstrahlers

Bei Querstrahlern handelt es sich um die vorzugsweise in Querrichtung des Schiffes installierten Propeller oder Axialpumpen, die in Quertunneln eingesetzt werden und zur Erzeugung von Schub dienen. Die Wirkung eines Querstrahlers beruht nicht allein auf der Kraft, die aus dem Impuls der im Quertunnel strömenden Flüssigkeit resultiert, sondern auch auf die Fahrgeschwindigkeit des Schiffes. Die Strahlströmung auf der Austrittsseite des Querstrahlers verursacht ebenfalls eine von der Schiffsgeschwindigkeit U und der Strahlgeschwindigkeit u_j abhängige Querkraft. Die Ergebnisse der Kraftmessungen zeigen einen starken Abfall der Gesamtquerkraft im Bereich $0 < U/u_j < 0.6$ (Abb. 6.1). Dies kommt durch die Wechselwirkung zwischen Querstrahler und Schiffsrumpf zustande. Der Schub wird deshalb als Produkt aus dem Standschub T_0 (bei unbewegtem Schiff) und einer Funktion von $\sigma = U/u_j$ ausgedrückt:

$$Y_L = Y_L'(\sigma) * T_0 \quad (6. 1)$$

$$N_L = Y_L'(\sigma) * x_{yL}'(\sigma) * x_L * T_0 \quad (6. 2)$$

mit

$$\sigma = \frac{U}{u_j} = \left[\frac{u^2 + (v + x_L * r)^2}{4 * T_0 / (r * \pi * D_L^2)} \right]^{1/2} \quad (6. 3)$$

x_L : Abstand des Quertunnels vom Hauptspant

D_L : Quertunneldurchmesser

Die von einem Querstrahler bei fahrendem Schiff entstehenden gekreuzten Strömungen sind theoretisch schwer zugänglich. Der Modellversuch und die anschließende Bordmessung sind daher ein praktischer Weg zur Lösung dieser Probleme.

Nach Versuchsergebnissen von BRIX (1978), CHISLETT und BJÖRHEDEN (1966) sowie MEYER (1985) wurden empirische Formeln für die Koeffizienten Y_L' und x_L' aufgestellt, die etwa im Bereich $\sigma = (-0.6, 1.0)$ gelten:

$$Y_L' = \begin{cases} \frac{1}{-7.440 \cdot \sigma^2 + 10.610 \cdot \sigma - 0.350} & \text{für } 0.150 \leq \sigma < 1.000 \\ -3.066 \cdot \sigma^2 + 1 & \text{für } 0.000 \leq \sigma < 0.150 \\ -4.228 \cdot \sigma^2 + 1 & \text{für } -0.150 \leq \sigma < 0.000 \\ \frac{1}{-1.863 \cdot \sigma^2 - 2.174 \cdot \sigma + 0.821} & \text{für } -0.600 \leq \sigma < -0.150 \end{cases} \quad (6.4)$$

$$X_{yL}' = \begin{cases} \frac{3.018 \cdot \sigma^2 + 1}{(-7.440 \cdot \sigma^2 + 10.610 \cdot \sigma - 0.350) \cdot (-6.011 \cdot \sigma^2 + 1)} & \text{für } 0.200 \leq \sigma < 0.800 \\ \frac{-6.011 \cdot \sigma^2 + 1}{-3.066 \cdot \sigma^2 + 1} & \text{für } 0.150 \leq \sigma < 0.200 \\ \frac{-6.011 \cdot \sigma^2 + 1}{-3.066 \cdot \sigma^2 + 1} & \text{für } 0.000 \leq \sigma < 0.150 \\ 0.714 \cdot \sigma + 1 & \text{für } -0.600 \leq \sigma < 0.000 \end{cases} \quad (6.5)$$

Abb. 6.2 zeigt die mit diesen Formeln berechneten Kurven.

Nach den Versuchsergebnissen von BRIX (1978) wird angenommen, daß sich ein Bugquerstrahler bei Vorausfahrt ähnlich verhält wie ein Heckquerstrahler bei Rückwärtsfahrt und umgekehrt. Falls $X_{yL, Heck} = -X_{yL, Bug}$, gelten dann:

$$\begin{aligned} X_{L, Heck} &= -X_{L, Bug} \\ Y_{L', Heck} \Big|_{u>0} &= Y_{L', Bug} \Big|_{u<0} \\ Y_{L', Heck} \Big|_{u<0} &= Y_{L', Bug} \Big|_{u>0} \\ X_{yL', Heck} \Big|_{u>0} &= X_{yL', Bug} \Big|_{u<0} \\ X_{yL', Heck} \Big|_{u<0} &= X_{yL', Bug} \Big|_{u>0} \end{aligned} \quad (6.6)$$

Bei den Berechnungen wurde der Einfluß des Driftwinkels β vernachlässigt. Die vom Querstrahler erzeugte Kraft in Schiffslängsrichtung ist klein und wurde ebenfalls vernachlässigt.

Der Einfluß des Querstrahlers auf die Steuerbarkeit eines Schiffes läßt sich anhand der Ergebnisse von Simulationsrechnungen darstellen. Die Bewegungen wurden für zeitlich konstante und für wechselnde Querstrahlerwirkung während der Dauer des Manövers bestimmt.

7. Berechnung der Manövrierbewegung (Simulationsberechnung)

7.1 Bewegungsgleichungen des manövrierenden Schiffes

Grundlage aller rechnerischen Manövrieruntersuchungen sind die Bewegungsgleichungen des manövrierenden Schiffes. Sie werden in einem schiffsfesten Koordinatensystem x, y, z beschrieben (Abb. 7.1); die Bahn des Schiffes dagegen in einem erdfesten Koordinatensystem x_0, y_0, z_0 , das beim Manöverbeginn mit x, y, z zusammenfällt. Das mathematische Modell der Manövrierbewegung eines Schiffes wird auf dem Grund der verbundenen Gleichungen dargestellt, die die Berechnung der Längs-, Quer- und Gierbewegung des Schiffes in der horizontalen Ebene ermöglichen. Die Drehung des Propellers und der Antriebsmaschine wird hier berücksichtigt.

Bei Vernachlässigung unbedeutender Kopplungen mit der Rollbewegung lauten die Bewegungsgleichungen in vier Freiheitsgraden:

$$m (u - v \cdot r - x_G \cdot r^2) = X$$

$$m (v + u \cdot r + x_G \cdot r) = Y$$

$$J_z \cdot r + m \cdot x_G (v + u \cdot r) = N$$

$$2 \cdot \pi \cdot I_{EP} \cdot n = Q_E + Q_P \quad (7.1)$$

Hier bedeutet m die Schiffsmasse, I_z das Trägheitsmoment der Schiffsmasse um die z -Achse. x_G ist die x -Koordinate des Schiffsschwerpunktes. Gesucht sind die drei Zeitfunktionen von Längsgeschwindigkeit u , Quergeschwindigkeit v , Winkelgeschwindigkeit r in der Drehbewegung um die vertikale Achse und die Drehzahl n des Propellers. Auf der rechten Seite stehen die hydrodynamischen Kräfte in Längsrichtung X und in Querrichtung Y sowie das Drehmoment N . Q_E und Q_P sind das Drehmoment entsprechend von der Antriebsmaschine und dem Propeller. Wenn die auf das Schiff wirkenden Kräfte X, Y und N bekannt

sind, kann dieses Gleichungssystem nach der Bewegung des manövrierenden Schiffes aufgelöst werden. Aus der Beschleunigung werden durch die Lösung der gewöhnliche Differentialgleichungen mit einem numerischen Integrationsverfahren die Geschwindigkeit u , v und r sowie daraus die Position und der Kurswinkel in dem erdfesten Bezugssystem berechnet.

Der Rollwinkel wird aus dem statischen Gleichgewicht $K = 0$ bestimmt. Die Drehzahländerung wird wie in Kapitel 5 berechnet. X , Y , K und N werden aus den folgenden Anteilen addiert:

$$X = X_H + X_R + X_P + X_L + X_W + X_S$$

$$Y = Y_H + Y_R + Y_P + Y_L + Y_W + Y_S$$

$$N = N_H + N_R + N_P + N_L + N_W + N_S$$

$$K = K_H \tag{7.2}$$

Dabei bedeuten:

X_H, Y_H, N_H, K_H : Rumpfkkräfte

X_R, Y_R, N_R : Ruderkräfte

X_P, Y_P, N_P : Propellerkräfte

X_L, Y_L, N_L : Querstrahlerkräfte

X_W, Y_W, N_W : Windkräfte

7.1.1 Rumpfkkräfte

Die auf den Schiffsrumpf angreifenden hydrodynamischen Kräfte können durch Polynome von Bewegungsvariablen ausgedrückt werden:

$$X_H = -m_x * u + X_{v v} * v^2 + X_{v r} * v r + X_{r r} * r^2 + R_t$$

$$Y_H = -m_y (v + x_y * r) + Y(\beta) + Y(\gamma) + R_y$$

$$N_H = - m_y * X_y * v - J_z * r + N(\beta) + N(\gamma) + R_H$$

$$K_H = k_u * u (k_v * v + k_r * r) - R_y [KG - 0.65 * D(0)] \quad (7. 3)$$

Dabei bedeuten:

m_x : Hydrodynamische Masse für Beschleunigung in x-Richtung; sie wird angenähert durch $2.7 \rho \quad \delta^{3/3} / L^2$ sowohl für tiefes als auch für flaches Wasser.

X_{vv}, X_{vr}, X_{rr} : Koeffizienten zur Widerstandskorrektur in Abhängigkeit von v und r , ermittelt nach Modellversuchsergebnissen.

R_t : Summierter Widerstand aus dem Plattenreibungswiderstand und dem Restwiderstand nach KELLER (1973) für Bewegung in x-Richtung.

m_y, J_z : Hydrodynamische Masse für Beschleunigung in y-Richtung bzw. hydrodynamisches Trägheitsmoment für Drehbeschleunigung um die z-Achse, abhängig von Wassertiefe. Die Werte sind in Kapitel 2 berechnet worden.

x_y : x-Koordinate des Schwerpunktes von m_y

β : Driftwinkel, $\beta = \text{Arctg}(-\frac{v}{u})$

γ : "Gierwinkel", $\gamma = \text{Arctg} \frac{r * L/2}{u}$

$Y(\beta), Y(\gamma)$: Hydrodynamische Querkraft infolge Driftwinkel bzw. Giergeschwindigkeit, abhängig von der Wassertiefe. Die Werte sind in Kapitel 4 berechnet worden.

$N(\beta)$, $N(\gamma)$: Hydrodynamisches Giermoment infolge Driftwinkel bzw. Giergeschwindigkeit, abhängig von der Wassertiefe. Die Werte sind in kapitel 4 berechnet worden.

R_y , R_n : Summierter Widerstand aus den Querströmungswiderstandsanteilen (abhängig von der Wassertiefe) und dem Plattenreibungswiderstand für Bewegung in y-Richtung bzw. Drehung um die z-Achse

k_u , k_v , k_r : Koeffizienten mit Korrekturen für dreidimensionale Strömung

KG : Schwerpunkthöhe der Schiffsmasse

$D(x)$: Spanttiefgang

Die Formel zur Berechnung der Querkraft Y_H sowie des Giermoments N_H im Gleichungssystem (7.3) gilt nicht nur für die Manövrierbewegung des Schiffes bei geringer Vorwärts- und Rückwärtsgeschwindigkeit, sondern auch für die Bewegung bei relativ höher Vorwärtsgeschwindigkeit. Der Grund dafür liegt darin, daß die hydrodynamischen Werte von den Termen $Y(\beta)$, $Y(\gamma)$, $N(\beta)$ und $N(\gamma)$ für kleinen β - bzw. γ -Wert hauptsächlich von den Derivativen Y_v , Y_r , N_v und N_r abhängen (siehe Gleichungen (4.7) bis (4.11)).

In diesen Gleichungen ist die Korrektur der Rumpfkkräfte in realer Flüssigkeit eingeschlossen. Diese Korrekturan-teile werden als unabhängig von der Wassertiefe angenommen.

7.1.2 Ruderkräfte

Die Ruderkräfte werden in folgender Form dargestellt:

$$X_R = R \cdot \sin \alpha - D_R \cdot \cos \alpha$$

$$Y_R = (R \cdot \cos \alpha + D_R \cdot \sin \alpha) (1 + a_H)$$

$$N_R = (R \cdot \cos \alpha + D_R \cdot \sin \alpha) (1 + a_H) (x_R + \Delta x_L) \quad (7.4)$$

Dabei bedeuten

R : Ruderauftrieb, $R = (R_1 / \alpha_1) \sin \alpha_1$; R_1 wurde in Abschnitt 2.7 berechnet.

D_R : Ruderwiderstand, $D_R = R^2 / (\pi \wedge)$, mit $\wedge = (\text{Ruderhöhe})^2 / \text{Ruderfläche}$

α : Mittlere Strömrichtung, relativ zur x-Achse am Ruder

α_1 : Effektive Ruderwinkel, $\alpha_1 = \alpha + \delta$

x_R : x-Koordinate des Ruders

a_H : Faktor für die Wirkung des Schiffsrumpfes; er vergrößert sich in flachem Wasser.

Δx_L : Verschiebung des Ruderkraftangriffspunktes, in flachem Wasser nach vorn.

Der Ruderauftrieb pro Anstellwinkel R wird nach der sogenannten erweiterten Traglinientheorie für eine über die Ruderhöhe variierende Anströmgeschwindigkeit berechnet. Den Einfluß des Flachwassers wird dabei berücksichtigt. Der induzierte Ruderwiderstand D_R wird aus dem Auftrieb R angenähert. R und D_R werden in x- und y-Richtung zerlegt. Die y-Komponente wird mit einem Faktor für die Wirkung des Schiffsrumpfes multipliziert. Die so berechnete Ruderquerkraft umfaßt auch die durch das Ruder am Rumpf induzierte Querkraft. Das Giermoment durch das Ruder ergibt sich aus der Multiplikation dieser Ruderquerkraft mit der x-Koordinate des Kraftangriffspunktes. Die Korrektur der Ruderkraft in realer Flüssigkeit ist abhängig von der Geschwindigkeit quer zum Ruderblatt. Diese Korrekturanteile werden auch als unabhängig von der Wassertiefe angenommen.

7.1.3 Propellerkräfte

Die Längskraft des Propellers wird ohne Beachtung der Quer- und Gierbewegung des Schiffes in Abhängigkeit von Drehzahl und Schiffsgeschwindigkeit aus systematischen Versuchen (siehe Abschnitt 5.1) für vier Quadranten bestimmt:

$$X_P = (1 - t_P) * \frac{1}{8} \pi \rho D_P^2 * C^*_{T1} [u^2 (1 - w_P)^2 + (0.7 \pi n D_P)^2] \quad (7.5)$$

mit:

$$C^*_{T1} = 0.5 [C^*_T(\varepsilon_1) + C^*_T(\varepsilon_2)] \quad (7.6)$$

$$\varepsilon_1 = \arctg \left\{ \frac{u [1 - (1 + w_{diff}) * w_P]}{0.7 \pi n D_P} \right\} \quad (7.7)$$

$$\varepsilon_2 = \arctg \left\{ \frac{u [1 - (1 - w_{diff}) * w_P]}{0.7 \pi n D_P} \right\} \quad (7.8)$$

t_P = Sogziffer

w_P = Nachstromziffer

w_{diff} = Faktor für die vertikale Nachstromverteilung

Die resultierende Querkraft und Giermoment infolge eines Propellers sind für Vorwärtsdrehung und Rückwärtsdrehung des Propellers unterschiedlich. Bei Vorwärtsdrehung $n > 0$ werden diese Kräfte, deren Werte ziemlich gering sind, aus dem Momentenungleichgewicht und der Exzentrizität des Schubmittelpunktes ermittelt, wenn die Kräfte und das Momente auf $0.7 * \text{Radius}$ des Propellers angreifen. Bei Rückwärtsdrehung $n < 0$ werden der Querkraft- und Giermomentsbeiwert nach Regressionsformeln (Abschnitt 5.2) berechnet. Deshalb können die Kräfte in folgenden Formen dargestellt werden:

$$Y_P = \begin{cases} - \frac{C^*_{Qz}}{0.7 D_P} * \frac{1}{8} \pi \rho D^3_P [u^2 (1-w_P)^2 + (0.7 \pi n D_P)^2] \\ * \cos(\alpha_P) & \text{für } n > 0 \\ Y'_P * \rho n^2 D^4_P & \text{für } n < 0 \end{cases} \quad (7.9)$$

$$N_P = \begin{cases} C^*_{Tz} * 1.4 D_P * \frac{1}{8} \pi \rho D^2_P [u^2 (1 - w_P)^2 + \\ (0.7 \pi n D_P)^2] \sin(\alpha_P) + Y_P x_P & \text{für } n > 0 \\ N'_P * \rho n^2 D^3_P & \text{für } n < 0 \end{cases} \quad (7.10)$$

mit

$$C^*_{Qz} = 0.5 [C^*_Q(\varepsilon_1) - C^*_Q(\varepsilon_2)] \quad (7.11)$$

$$C^*_{Tz} = 0.5 [C^*_T(\varepsilon_1) - C^*_T(\varepsilon_2)] \quad (7.12)$$

α_P = Neigung der Nachstromebenen

x_P = x-Koordinate des Propellers

Da der Einfluß des Flachwassers auf die Propellerkräfte vernachlässigbar gering ist, wird es bei den Berechnungen unbeachtet.

7.1.4 Weitere Kräfte und Momente

Kräfte und Giermomente durch Wind werden aus den Ergebnissen von Modellversuchen im Windkanal ermittelt. Die Windkraftkomponentenbeiwerte werden als Eingabedaten eingelesen. Die WindkraftsgröÙe hängen dann von der globalen Windrichtung und Windgeschwindigkeit ab.

Falls das Schiff Querstrahler besitzt, können deren Schubkräfte und -momente in Abhängigkeit von dem Verhältnis der Schiffsgeschwindigkeit zu Querstrahlgeschwindigkeit aus Modellmessungen ermittelt und in die Berechnung einbezogen werden.

Die Bewegungsgleichungen werden wie üblich in einem mit dem Schiff fest verbundenen Koordinatensystem aufgestellt; in diesem System sind Massenkräfte zu berücksichtigen.

7.2 Die Simulationsberechnung der Manövrierfähigkeit

Nach den beschriebenen Methoden wurden die Rechenprogramme für die Simulationsberechnung aufgestellt. Sie gestatten es, die Summe der auf das Schiff einwirkenden Kräfte und Momente zu berechnen. Wenn die Position und die Geschwindigkeit des Schiffes in diesen drei Freiheitsgraden bekannt sind, können auch die Schiffsbeschleunigung in Längs- und Querrichtung sowie die Drehbeschleunigung um die Hochachse berechnet werden. Mit einem numerischen Integrationsverfahren für gewöhnliche Differentialgleichungen ergeben sich daraus die Geschwindigkeiten und die Position des Schiffes als Funktion der Zeit im erdfesten Bezugssystem. Für solche Simulationen müssen Anfangswerte für die Lage und Bewegung des Schiffes gegeben sein. Außerdem müssen die Algorithmen vorliegen, mit denen je nach der Art des Manövers der Ruderwinkel, Querstrahlerdaten sowie die Windgeschwindigkeit und Windrichtung bestimmt werden.

Die Simulationsberechnung gilt je nach den Umständen für das Manövrieren eines Schiffes in flachem Wasser oder in tiefem Wasser, bei geringer oder normaler Vorwärts- oder Rückwärtsgeschwindigkeit, mit oder ohne Propellerdrehzahländerung sowie mit oder ohne Querstrahlersteuerwirkung. Mit diesen Rechenprogrammen können auch Manövierzustände berechnet werden, die bei Hafeneinfahrt und -ausfahrt, Fahrt in beschränkten Gewässern usw. vorkommen können, z.B. Beschleunigung, Verzögerung,

Stoppmanövern bzw. Rückwärtsfahrt mit oder ohne Wassertiefeeinfluß, Windeinfluß und anderen Einflüssen.

Als Beispiel wurden die Manövrierbewegungen für zwei Tanker (Esso Osaka und Tokyo-Maru) mit größerer Völligkeit und für ein Frachtschiff (Mariner-Schiff) mit geringer Völligkeit simuliert. Ihre Hauptabmessungen werden in Tabelle 7.1, Spantenriß und Seitenansicht für zwei Schiffe in Abb. 7.2 und 7.3 angegeben.

Das Verhältnis des Schiffstiefgangs zur Wassertiefe beträgt 0.17, 0.40, 0.67 und 0.83.

7.3 Vergleich mit Versuchsergebnissen

7.3.1 Der Einfluß des Flachwassers

In Abb. 7.4 sind die Simulationsergebnisse für den Tanker "Esso Osaka" im flachem Wasser dargestellt. Zum Vergleich sind auch Ergebnisse aus einer Großausführung, die CRANE (1979) mit einem Schiff im Golf von Mexiko durchgeführt hat, und Ergebnisse aus dem Modellversuch von KIJIMA et al. (1985) aufgetragen.

In Tab. 7.2 sind die Drehkreisdaten des Tankschiffs bei einer Anfangsgeschwindigkeit von 7.2 kn angegeben. Dabei bedeuten x_1 der Vorausweg bei einer Kursänderung von 90 Grad, y_1 der Querweg ebenfalls bei einer Kursänderung von 90 Grad, x_2 der maximale Vorausweg und y_2 der maximale Querweg. Der Anfang der Kreisbewegung liegt am Ursprungspunkt.

Der Vergleich zeigt:

- Der Drehkreis wird durch das Rechenverfahren gut wiedergegeben.
- Mit abnehmender Wassertiefe vergrößert sich der Kreisdurchmesser.
- Der Vorausweg bei der 90 Grad-Kursänderung verändert sich auf flachem Wasser nicht so erheblich wie der Querweg.

In Abb. 7.5 sind die Berechnungsergebnisse sowie die empirischen Ergebnisse von KIJIMA et al. (1985) bezüglich der Drehgeschwindigkeit r , des Geschwindigkeitsverlusts V_s/V_0 , des Gierwinkels γ und des Driftwinkels β beim Kreismanövern auf tiefem und flachem Wasser gegenübergestellt.

Daraus lassen sich erkennen:

- Der Drehgeschwindigkeit bei einer stationären Drehbewegung verkleinert sich mit abnehmender Wassertiefe.
- Dagegen wird der Geschwindigkeitsverlust bei dem stationären Zustand im flachen Wasser vergrößert.
- Der Driftwinkel ist im flachen Wasser kleiner als im tiefen Wasser.
- Änderung der Parameter r , V_s/V_0 und β mit der Zeit im flachen Wasser stimmt mit dem Flachwassereinfluß auf den Durchmesser des Drehkreises überein.
- Die Versuchsergebnisse werden durch das Berechnungsverfahren gut erfaßt.

Mit demselben Rechenprogramm wurden Kreismanöver für ein schlankes Schiff vom Mariner-Typ berechnet. Die Vergrößerung des Drehkreises ist stärker als beim Tankerschiff. Aus den zuvor berechneten hydrodynamischen Ableitungen kann die Gierstabilität des Schiffs ermittelt werden. Die Stabilitätsbedingung lautet

$$l'_r > l'_v \quad (7.13)$$

mit
$$l'_r = \frac{N'_r - m'x'_G}{Y'_r - m'} \quad (7.14)$$

$$l'_v = \frac{N'_v}{Y'_v} \quad (7.15)$$

In Abb. 7.6 sind die Werte für das Mariner-Schiff dargestellt. Dabei ist zu erkennen, daß der berechnete Wert von l'_v praktisch nicht von der Wassertiefe abhängt. Die experimentellen Werte sind auf dem tiefen Wasser durchweg kleiner als die berechneten. Sowohl die berech-

neten als auch die experimentellen Werte von $l'r$ wachsen mit abnehmender Wassertiefe an. Das bedeutet, daß die Gierstabilität in sehr flachem Wasser wesentlich größer ist als in tiefem Wasser.

7.3.2 Stoppmanöver

In Abb. 7.7a,b,c sind die rechnerischen Ergebnisse von Stoppmanövern für den Tanker Tokyo-Maru aufgetragen. Abb. 7.7a stellt das normale Drehkreismanöver mit einem Ruderwinkel von -35 Grad dar. Das Stoppmanöver bei Kreisbewegung mit einem Ruderwinkel von -35 Grad ist in Abb. 7.7b gezeigt. Dabei wurde eine konstante Änderung der Propellerdrehzahl von 0.025 r/s² eingesetzt. Dadurch wandelt sich die Propellerdrehzahl n innerhalb von 50 Sekunden von einem Anfangswert (1.467 r/s) bis zur Rückwärtsdrehung des Propellers. Abb. 7.7c veranschaulicht das Stoppmanöver bei einer Geradeausfahrt mit 0 Grad Ruderwinkel. Zum Vergleich sind Versuchsergebnisse von SHARMA (1984) in Abb. 7.8 aufgetragen. Der Vergleich läßt erkennen:

- Es besteht die Tendenz, daß das Schiff nach Steuerbord abbiegt, mit oder ohne Ruderssteuern.
- Bei 0 Grad Ruderwinkel ist die Fahrspur nach den rechnerischen Ergebnissen weniger nach Steuerbord abbiegt als die nach den Versuchsergebnissen.
- Bei -35 Grad Ruderwinkel stimmt die Fahrspur nach den rechnerischen Ergebnissen gut mit der nach den Versuchsergebnissen überein.

In Abb. 7.9 sind die Berechnungsergebnisse mit den Modellversuchsergebnissen von KOBAYASHI (1987) für Stoppmanöver und Rückwärtsbewegung verglichen. Bei dem Simulationsprozeß wurde zuerst die Vorwärtsbewegung nachgebildet, die dann über einen Bereich von Null-Vorwärtsgeschwindigkeit kontinuierlich zur Rückwärtsbewegung übergegangen ist. Eine gute Übereinstimmung besteht in der Schiffsfahrspur, der Abweichung in Quer-richtung sowie der Rückwärtsfahrtrichtung.

In Abb. 7.11 sind die Schiffsfahrspur für den Tanker Tokyo-Maru in flachem Wasser dargestellt. Die Abhängigkeit der Abweichung in Querrichtung sowie Rückwärtsfahrtrichtung von der Wassertiefe ist deutlich zu erkennen. Je flacher das Wasser ist, desto kleiner ist der Winkel zwischen der Vorwärts- und der Rückwärtsfahrspur. Die entsprechenden Versuchsergebnisse liegen nicht vor.

7.3.3 Manövrieren mit Querstrahlern

Die Manövrierbewegungen des Schiffs mit der Steuerwirkung von Querstrahlern wurden für kurzes Drehkreismanöver, Standdrehung und schräge Bewegung simuliert.

In Abb. 7.12 sind die Kurve für Drehkreisbewegung des Schiffs mit der Wirkung eines Bugquerstrahlers bei geringer Schiffsvorwärtsgeschwindigkeit dargestellt. Zum qualitativen Vergleich sind dabei auch die Versuchsergebnisse von KOBAYASHI in Abb. 7.13 aufgetragen. Durch diese vergleichende Darstellung sind zu erkennen:

- Der Drehkreis wird durch das Simulationsmodell gut wiedergegeben.
- Mit zunehmender Vorwärtsgeschwindigkeit vergrößert sich der Kreisdurchmesser.
- Mit einem Bug- oder Heckquerstrahler können Kreisbewegungen mit einem Durchmesser von beliebiger Größe erzeugt werden.

Abb. 7.14 stellt die simulierten Ergebnisse für den Tanker Tokyo-Maru mit der gleichzeitigen Wirkung vom Bug- und Heckquerstrahler dar. Dabei wurden die Achsen der Querstrahler senkrecht zur Schiffslängsachse festgelegt. Die Leistungen der beiden Querstrahler waren gleich. Die Vorwärtsgeschwindigkeit des schiffs war dabei gegen Null. In Abb. 7.14a wird die Fahrspur der Querbewegung des schiffs dargestellt. Dabei sind die Querkräfte, die vom Bug- und Heckquerstrahler verursacht wurden, nach Steuerbord gezeigt. Zum Vergleich werden die Versuchsergebnisse von KOBAYASHI (1987) in Abb. 7.15 dargestellt. Der Vergleich zeigt:

- Die Querbewegung des Schiffs wird durch die Simulationsberechnung gut wiedergegeben.
- Eine reine Querbewegung des Schiffs kann durch Querstrahler realisiert werden, die am Bug und Heck des Schiffs in gleiche Richtung drehen.

Falls der Bugquerstrahler positiv dreht (nämlich die dadurch erzeugte Querkraft nach Steuerbord zeigt), der Heckquerstrahler negativ dreht und die Längsgeschwindigkeit des schiffs gleich Null ist, wird das Schiff um seinen Schwerpunkt drehen, ohne Bewegungen in Schiffs-längsrichtung sowie -querrichtung. Abb. 7.14b und Abb. 7.15b stellen die entsprechenden Bewegungsspuren aus der Simulationsberechnung sowie dem Modellversuch von KOBAYASHI (1987) dar. Dabei ersieht man:

- Durch die in umgekehrten Richtungen drehenden Bug- und Querstrahler wird die Drehung des Schiffs um seinen Schwerpunkt realisiert.
- Die Simulationsergebnisse stimmen mit den Versuchsergebnissen gut überein.

7.3.4 Manövrierbewegung in Wind

Als Beispiel der Berechnung für geringe Vorwärts- und Rückwärtsgeschwindigkeit wurde die Manövriersimulation mit der Wirkung der Querstrahler durchgeführt. Außerdem wurde auch die Manövrierbewegung unter dem Einfluß des Windes vorhergesagt.

Abb. 7.16 zeigt die Drehkreisbewegung eines Tankers in Wind. Der Windeinfluß wird durch das Verhältnis $k = \text{Windgeschwindigkeit} / \text{Schiffsgeschwindigkeit}$ und auch durch den Winkel zwischen der Wind- und Schiffsfahrt-richtung bezeichnet. Abb. 7.16a und Abb. 7.16b stellen die simulierten Bewegungsspuren dar. k betrug dabei 2 bzw. 4 und der Winkel wurde auf 180 Grad festgelegt.

In Abb. 7.17 ist eine simulierte Drehkreisbewegung in Wind mit experimentellem Ergebnis von HIRANO (1987) dargestellt. Durch den Vergleich der Spuren läßt sich erkennen, daß die Bewegung des Schiffs unter dem Windeinfluß auch von diesem Simulationsmodell gut erfaßt werden kann.

7.3.5 Manövrierbewegung bei Beschleunigung oder Verzögerung

Außer dem Stoppmanöver wurde mit der Operation des Schiffsmotors auch die Manövrierbewegung des Schiffs bei Beschleunigung oder Verzögerung simuliert.

In Abb. 7.18 sind die Simulationsergebnisse für drei verschiedene Zustände der Drehkreisbewegung mit -35 Grad Ruderwinkel, nämlich die konventionelle Drehkreisbewegung (a), die beschleunigte Drehkreisbewegung (b) und die verzögerte Drehkreisbewegung (c) dargestellt.

Zum Vergleich sind auch Modellversuchsergebnisse von HIRANO (1987) in Abb. 7.19 und von NOMOTO (1978) in Abb. 7.20 aufgetragen. Aus diesem Vergleich ergeben sich folgende Ergebnisse:

- Die Versuchsergebnisse werden durch das Simulationsmodell gut erfaßt.
- Bei Beschleunigung wird sich der Drehkreis verkleinert.
- Bei Verzögerung wird sich der Drehkreis vergrößert.

8. Schlußfolgerung

Nach den beschriebenen Methoden wurde ein Simulationsmodell zur Vorhersage der Manöviereigenschaften eines Schiffes entwickelt. Dieses Modell gestattet es, die Summe der auf das Schiff einwirkenden Kräfte und Momente zu berechnen. Dabei können alle Größen, die die Manövrierbewegung des Schiffes wesentlich beeinflussen können, berücksichtigt werden. Die Wichtigsten davon sind :

- Einfluß des Flachwassers
- Beim Manövrieren auftretende Krängungen
- Drehzahländerung des Propellers
- Steuerwirkung des rückwärtsschiebenden Einschraubers-
Steuerwirkung der Querstrahler.

Die Manövrierbewegung mit großem Driftwinkel oder großer Giergeschwindigkeit wurde auch berücksichtigt.

Der Flachwassereinfluß wurde mit der Theorie schlanker Körper ermittelt. Die auf das Schiff wirkenden hydrodynamische Kräfte vergrößern sich mit abnehmender Wassertiefe. Die Simulationsergebnisse für Schiffsbewegungen in flachem Wasser stimmen sehr gut mit den Versuchsergebnissen überein.

Zur Berücksichtigung der Rollbewegung auf das Manövrierverhalten wurde die Methode von SÖDING (1984) verwendet und für flaches Wasser erweitert. Die Ergebnisse zeigen, daß die Krängung vor allem für die Seitenabweichung bei höherer Schiffsgeschwindigkeit von wesentlicher Bedeutung ist. Die Bewegungsverhalten des Schiffes beim Stoppmanövern wurde wirklichkeitsgetreu simuliert. Daraus kann man ersehen, daß das Schiff nach Steuerbord abbiegt, wenn das Ruder auch an Mittelstellung hält. Für das Stoppmanöver mit Rückwärtsmanöver, nämlich die Schiffsbewegung über den Bereich von Null-Vorwärtsgeschwindigkeit kontinuierlich zur Rückwärtsfahrt übergeht, wurden die Abweichung in Querrichtung und die Rückwärtsfahrtrichtung durch das Simulationsmodell gut wiedergegeben.

Zur Darstellung der Manövrierbewegung mit Steuerwirkung von Querstrahlern wurden die Rechenergebnisse mit den Modellversuchsergebnissen verglichen. Der Vergleich zeigt, daß mit Hilfe eines Querstrahlers oder mehrerer Querstrahler normales bzw. kurzes Drehkreismanöver, Drehmanöver um die Schwerpunkt des Schiffs sowie reine laterale Bewegung realisiert werden können. Die Versuchsergebnisse wurden durch das Berechnungsverfahren gut erfaßt.

Mit diesem Simulationsmodell kann man noch mehrere Manövierzustände nachbilden (z.B. die Bewegung des Schiffes unter Berücksichtigung des Windes sowie bei Beschleunigung oder Verzögerung usw.).

Die Ergebnisse der bisher durchgeführten Simulationsberechnungen weisen darauf hin, daß das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Simulationsmodell als ein sehr gutes Vorhersagenverfahren zur Nachbildung und zur Bewertung der Manövrierbewegung eines Schiffs angesehen werden kann.

Literaturverzeichnis

BRIX, J.:

Querstrahlsteuer

2. Auflage, HSVA-Bericht Nr.80

CHISLETT, M.S.; BJÖRHEDEN, O.:

Influence of Ship Speed on the Effectiveness of a Lateral-Thrust Unit

Hydro-Og Aerodynamisk Laboratorium Lyngby - Denmark,
Report-No. Hy-8 (April 1966)

CRANE, C.L.:

Maneuvering Trials of a 278000-DWT-Tanker in Shallow and Deep Water

SNAME Transactions, 87(1979)251-283

FUJINO, M.; KIRITA, A.:

On the Manoeuvrability of Ships while Stopping by Adverse Rotation of Propeller - 1nd Report

Journal of the Kansai; Society of Naval Architects (in Japanese). Vol.169(1978)57-70

FUJINO, M.:

Experimental Studies on Ship Manoeuvrability in Restricted Waters (Part 1.)

Internat. Shipb. Progress, 15, (1968)279-301

HIRANO, M.; TAKASHINA, J.; MORIYA, S.:

A Practical Prediction Method of Ship Maneuvering Motion and Its Application

RINA Int. Conf. on Maneuverability, London (April 1987)

KELLER, W.H. Auf'm:

Extended Diagrams for Determining the Resistance and Required Power for Single-Screw Ships

Int. Shipb. Progr. 20(1973)133

KHATTAB, O.:

Ship Handling in Harbours using Real Time Simulation

RINA Int. Conf. on Manoeuvrability, London (April 1987)

KIJIMA, K.; MARAKAMI, M.; KATSUNO, T.; NAKIRI, Y.:

A Study on the Ship Manoeuvring Characteristics in Shallow Water

Transactions of the West-Japan Society of N.A. (1985)111-222

KOBAYASHI, E.; ASAI, S.:

A Simulation Study on Ship Manoeuvrability at Low Speeds

RINA Int. Conf. on Manoeuvrability, London (April 1987)

LAMMEREN, W.P.A. van; MANEN, J.D. van; OOSTERVELD, M.W.C.:
The Wageningen B-Screw Series. SNAME Transaction, Vol.
77, (1969) 269-317

MEYER, M.:
Die Umströmung von Schiffen beim Einsatz von Bugstrahl-
rudern und deren Wirkung auf die Steuerbarkeit
Schiffbauforschung, Vol. 24 (1985) 211-220

NEWMAN, J.N.:
Lateral Motion of a Slender Body between two Walls
Fluid Mech. 39 (1969) 97-115

OLTMANN, P.; SHARMA, S.D.:
Simulation of Combined Engine and Rudder Maneuvers using
an Improved Model of Hull-Propeller-Rudder Interactions
Proc. 15th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics,
Hamburg (1984) 83-108

OLTMANN, P.; WOLFF, K.; MÜLLER, E.; BAUGARTEN, B.:
Zur Korrelation Modell-Großausführung bei Manövrierver-
suchen auf tiefem und flachem Wasser
Jahrbuch STG 80 (1986) 217-245

SHARMA, S.D.; ZIMMERMANN, B.:
Schrägschlepp- und Drehversuche in vier Quadranten
(Teil 1.)
Schiff und Hafen, Vol. 33, 123-125

SÖDING, H.:
Bewertung der Manöviereigenschaften im Entwurfsstadium
Jahrbuch STG 78 (1984) 179-204

SON, K.; NOMOTO, K.:
On the Coupled Motion of Steering and Rolling of a High
Speed Container Ship
JSNAJ, (Dezember 1981) 232

TUJI, T.; MORI, N.; YAMANOUCHI, Y.:
On the Water Force Acting on a Ship in Oblique Flow
(Restricted Water Effect)
12. th ITTC (1969)

YOSHIMURA, Y.; NOMOTO, K.:
Modeling of Manoeuvring Behaviour of Ships with a Pro-
peller Idling, Boosting and Reversing
JSNAJ, (Dezember 1978) 57-69

ZHAO, Y.:
Hydrodynamische Kräfte an manövrierenden Schiffen auf
flachem Wasser
IFS-Bericht, Hamburg, Nr. 466 (März, 1986)

Tab. 2.1 Dimensionslose hydrodynamische Ableitungen des Mariner-Schiffes in flachem und in tiefem Wasser (Die zum Vergleich angeführten Werte des Experiments von FUJINO (1968) entsprechen einer Froude-Zahl $F_n = 0.0905$) (I: nach Berechnung, II: nach Experiment)

D/H		0.00	0.40	0.52	0.67	0.83
$10^3 * Y'_v$	I	9.187	11.160	13.312	17.672	27.168
	II	14.8	15.0	18.7	29.8	86.9
$10^3 * N'_v$	I	3.768	4.820	5.629	7.468	11.420
	II	3.53	4.52	6.25	8.67	12.5
$10^3 * Y'_r$	I	2.561	2.621	2.960	3.765	5.549
	II	3.06	3.72	3.78	5.34	11.53
$10^3 * N'_r$	I	-2.316	-2.390	-2.516	-3.014	-3.986
	II	-2.28	-2.30	-2.62	-3.23	-6.32
$10^3 * Y'_s$	I	3.310	3.408	3.503	3.683	4.000
	II	2.94	3.12	3.85	3.43	5.21
$10^3 * N'_s$	I	-1.653	-1.670	-1.698	-1.754	-1.857
	II	-1.49	-1.64	-1.59	-1.68	-1.48

x-Koord.	$\phi = 0^\circ$	$\phi = 5^\circ$	$\phi = 10^\circ$	$\phi = 15^\circ$
-75.520	0.4296	1.6736	2.7628	1.0397
-68.485	4.0416	3.9801	4.0082	3.7888
-61.450	4.5186	4.5287	4.5091	4.4628
-54.415	5.0520	5.0886	5.1084	5.1120
-47.380	5.9595	6.0425	6.1071	6.1532
-39.465	7.1314	7.2885	7.4231	7.5289
-31.550	8.4451	8.6353	8.8360	9.0138
-23.635	9.2234	9.4000	9.6949	10.0113
-15.720	9.9002	9.9299	10.2560	10.6743
-7.805	10.0218	10.1120	10.4577	10.9708
0.110	9.6479	10.1255	10.4511	10.9705
8.025	9.8285	9.7601	10.0594	10.4778
15.940	8.9738	9.0833	9.3690	9.7098
23.855	7.7352	7.0482	8.2181	8.4968
31.770	6.8637	7.0123	7.1856	7.3619
39.685	5.5566	5.7640	5.8709	5.9732
47.600	4.7957	4.8508	4.8977	4.9363
55.515	4.0051	4.0345	4.0513	4.0560
63.430	3.5182	3.5374	3.5410	3.5283
71.340	3.2089	3.1688	3.1686	3.1664
79.250	0.4489	0.5275	0.1307	0.0042

Tab. 3.1 Versperrungskoeffizienten C für das Mariner-Schiff auf flachem Wasser mit $D/H = 0.400$ unter verschiedenen Krängungswinkeln

x-Koord.	$\phi = 0^\circ$	$\phi = 5^\circ$	$\phi = 10^\circ$	$\phi = 15^\circ$
-75.520	0.7298	0.7271	0.7695	1.5448
-68.485	8.8526	8.6792	8.7367	8.0970
-61.450	10.0920	10.1317	10.0610	9.8915
-54.415	11.4999	11.6431	11.7048	11.6850
-47.380	14.0267	14.4192	14.7150	14.9038
-39.465	17.3962	18.2986	19.1501	19.8761
-31.550	21.2843	22.7733	24.4980	26.3053
-23.635	23.5289	25.3788	28.2867	32.1329
-15.720	25.5801	27.0971	30.7596	36.5079
-7.805	26.2104	27.4829	31.6076	38.9343
0.110	25.1342	27.3777	31.3398	38.5550
8.025	23.8850	26.0896	29.2799	34.3525
15.940	22.3075	23.6675	26.1762	29.6177
23.855	18.4900	19.8570	21.6433	23.7215
31.770	16.1280	16.9698	17.9393	18.9495
39.685	12.8010	13.2786	13.7437	14.1738
47.600	10.5438	10.7577	10.9298	11.0564
55.515	8.5123	8.6103	8.6618	8.6674
63.430	7.3045	7.3622	7.3708	7.3284
71.340	6.5584	6.4605	6.4304	6.4181
79.250	0.7259	0.8849	0.1036	0.0701

Tab. 3.2 Versperrungskoeffizienten C für das Mariner-Schiff auf flachem Wasser mit $D/H = 0.667$ unter verschiedenen Krängungswinkeln

Tab. 3.3 Dimensionslose hydrodynamische Masse und Koeffizienten des Mariner-Schiffes in flachem und in tiefem Wasser unter Krängung

Krängung		m'_{yy}	J'_{zz}	Y'_{vv}	N'_{vv}	Y'_{rr}	N'_{rr}
		*10 ³	*10 ³	*10 ³	*10 ³	*10 ³	*10 ³
D/H=0.00	$\phi = 0^\circ$	6.989	0.397	9.187	3.768	2.561	-2.316
	$\phi = 5^\circ$	7.048	0.402	9.647	3.937	2.582	-2.326
	$\phi = 15^\circ$	7.519	0.437	10.749	3.958	2.749	-2.403
D/H=0.40	$\phi = 0^\circ$	9.443	0.576	11.160	4.820	2.621	-2.390
	$\phi = 5^\circ$	9.529	0.592	11.942	5.158	2.652	-2.399
	$\phi = 15^\circ$	10.210	0.668	13.333	5.302	2.897	-2.468
D/H=0.67	$\phi = 0^\circ$	14.693	0.732	17.672	7.468	3.765	-3.014
	$\phi = 5^\circ$	15.036	0.764	19.439	8.215	3.876	-3.034
	$\phi = 15^\circ$	17.775	0.876	22.620	8.813	4.753	-3.197

Tab. 3.4 Einfluß der Krängung auf die Drehkreisdaten des Mariner-Modells (umgerechnet auf das 161 m lange Schiff) bei 35 Grad Ruderwinkel (Ruder-Fn unendlich) nach SÖDING (1984)

Anfangsgeschwindigkeit (kn)	15	15	20	20	25	25
Metazentrische Höhe (m)	0.6	100	0.6	100	0.6	100
Zeit für 90 Grad Kursänderung (s)	97	101	75	81	54	61
Vorausweg bei 90 Grad Kursänderung (m)	543	560	560	587	528	570
Querweg bei 90 Grad Kursänderung (m)	268	290	262	305	213	283
Zeit für 180 Grad Kursänderung (s)	183	192	144	154	99	113
Maximaler Vorausweg (m)	551	567	568	593	539	577
Maximaler Querweg (m)	516	566	606	685	506	650

Tab. 7.1 Hauptabmessungen der für die Berechnung benutzten Schiffe

	Mariner	Tokyo-Mar	Esso Osaka
Länge zwischen den Loten (m)	160.934	290.000	325.000
Länge in der Wasserlinie (m)	158.728	296.446	343.000
Breite auf Spanten (m)	23.175	47.500	53.000
Tiefgang am vorderen Lot (m)	6.850	16.196	21.790
Tiefgang am hinteren Lot (m)	8.075	15.964	21.790
Mittlerer Tiefgang (m)	7.463	16.063	21.790
Verdrängung (m ³)	1.663*10 ⁴	1.781*10 ⁵	3.194*10 ⁵
Völligkeitsgrad	0.588	0.805	0.831
Hauptvölligkeitsgrad	0.980	0.994	0.998
Verdrängungsschwerpunkt vor Hauptspant (m)	-3.550	7.243	10.300
Längenträgheitsmoment/Wasserdichte (m ⁵)	2.780*10 ⁷	1.192*10 ⁸	2.211*10 ⁸
Anzahl der Propeller	1	1	1
Propellerdurchmesser (m)	6.70	7.91	9.10
Steigung am Radius=0.7 (m)	6.459	5.893	6.507
Steigungsverhältnis	0.964	0.745	0.715
Flächenverhältnis	0.660	0.600	0.682
Längenkoordinate des Propellers (m)	-77.930	-141.750	-156.880
Propeller-Flügelzahl	4	5	5
Ruderfläche (m ²)	28.700	71.275	119.817
Längenkoordinate des Ruderdruckpunkts (m)	-81.675	-146.764	-162.500

Tab 7.2 Drehkreisdaten des Tankschiffes "Esso Osaka" bei 7.2 kn Anfangsgeschwindigkeit (Fn = 0.064) in tiefem und in flachem Wasser (I: nach CRANE, II: nach KIJIMA, III: nach Berechnung)

Tiefgang/Wassertiefe		D/H = 0.17	D/H = 0.67	D/H = 0.83
x1 / L	I	3.0213	3.0946	3.4615
	II	2.30	2.60	2.75
	III	3.1109	3.3325	3.5646
y1 / L	I	1.3077	1.2462	1.7077
	II	1.50	1.62	1.98
	III	1.3366	1.9142	2.4486
x2 / L	I	3.0923	3.1615	3.5065
	II	2.38	2.74	2.96
	III	3.2196	3.3678	3.6435
y2 / L	I	2.7538	3.6077	4.9154
	II	3.15	3.78	4.52
	III	2.7489	3.5755	4.7102

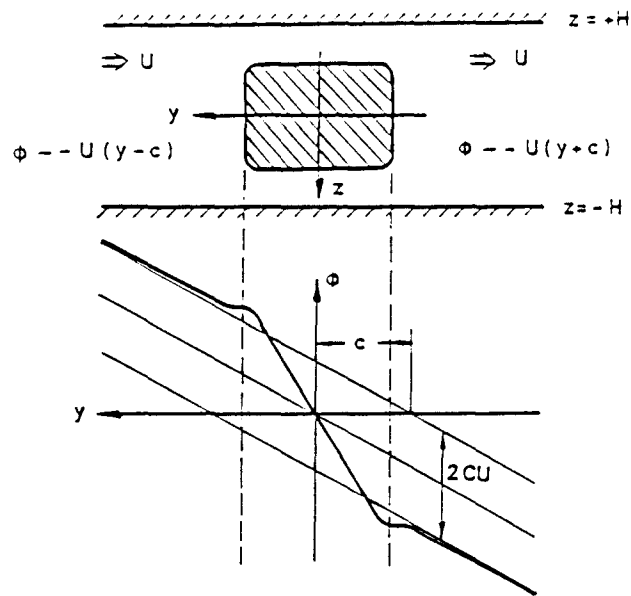


Abb. 2.1 : Ebene Strömung eines Querschnitts und ihr Potential im Nahfeld

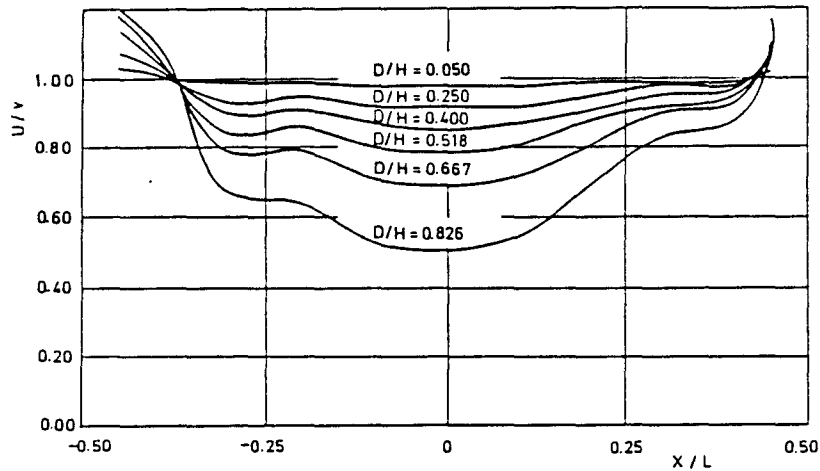


Abb. 2.2a: Verteilung des Versperrungskoeffizienten über Schiffslänge in verschiedenen Wassertiefen für das Mariner-Schiff bei reiner Querbewegung

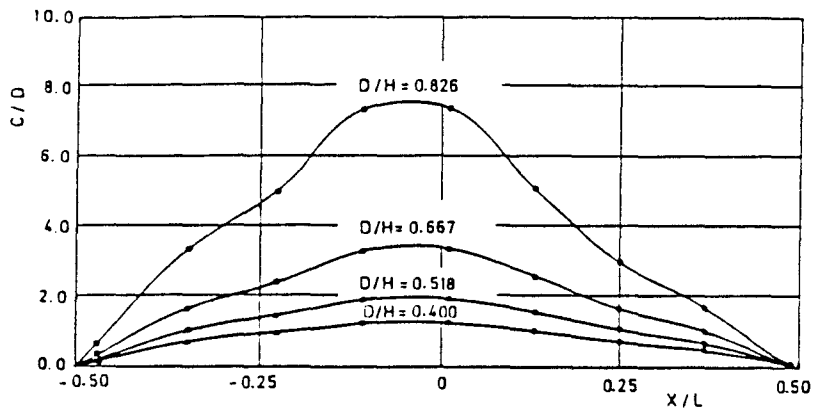


Abb. 2.2b: Verteilung des Geschwindigkeitsverhältnisses U/v über Schiffslänge in verschiedenen Wassertiefen für das Mariner-Schiff bei reiner Querbewegung

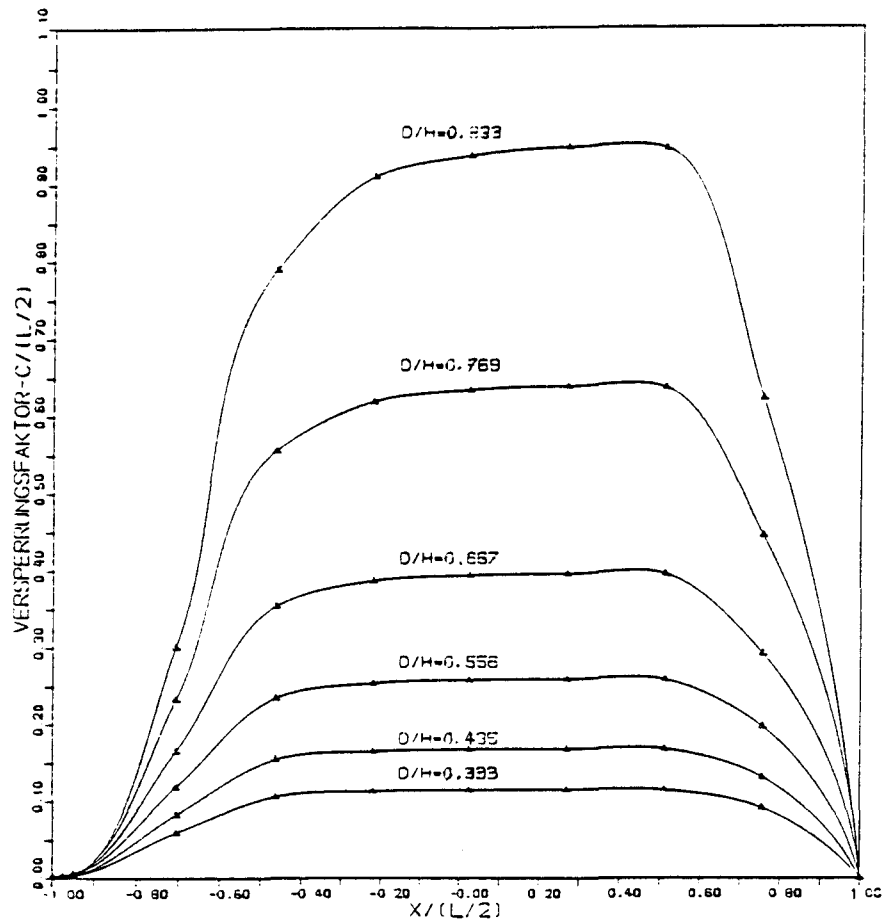


Abb. 2.3a:

Verteilung des Versperrungskoeffizienten über Schiffslänge in verschiedenen Wassertiefen für den Tanker Tokyo-Maru bei reiner Querbewegung

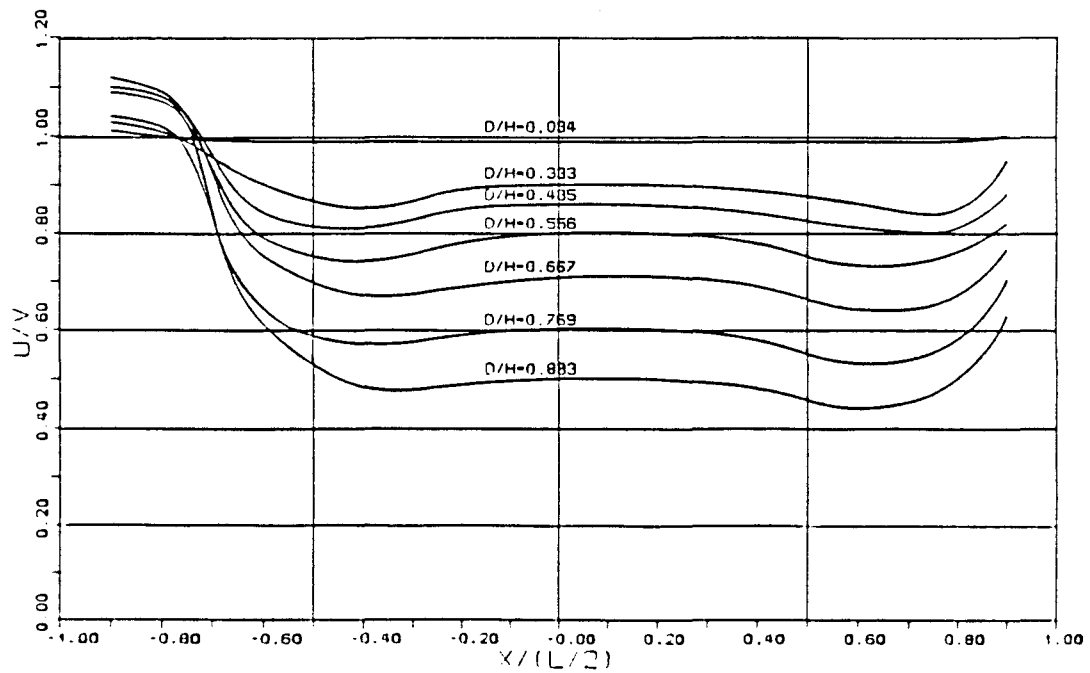


Abb. 2.3b:

Verteilung des Geschwindigkeitsverhältnisses U/v über Schiffslänge in verschiedenen Wassertiefen für den Tanker Tokyo-Maru bei reiner Querbewegung

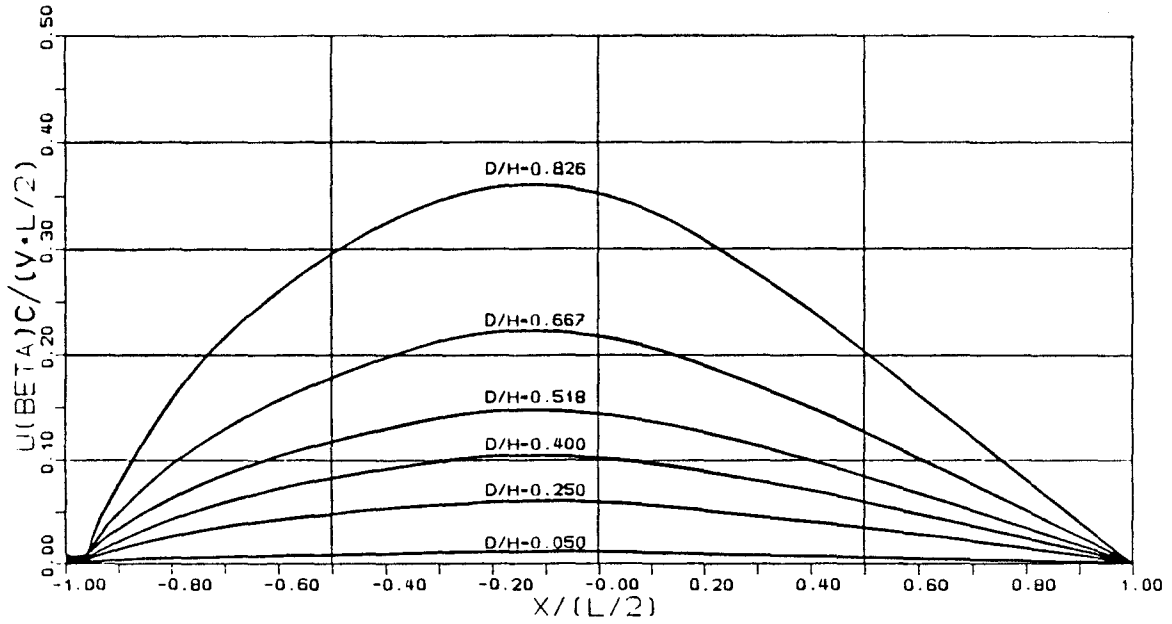


Abb. 2.4 :

Dimensionslose Funktion $U \cdot C$ in verschiedenen Wassertiefen für das Mariner-Schiff bei schräger Bewegung

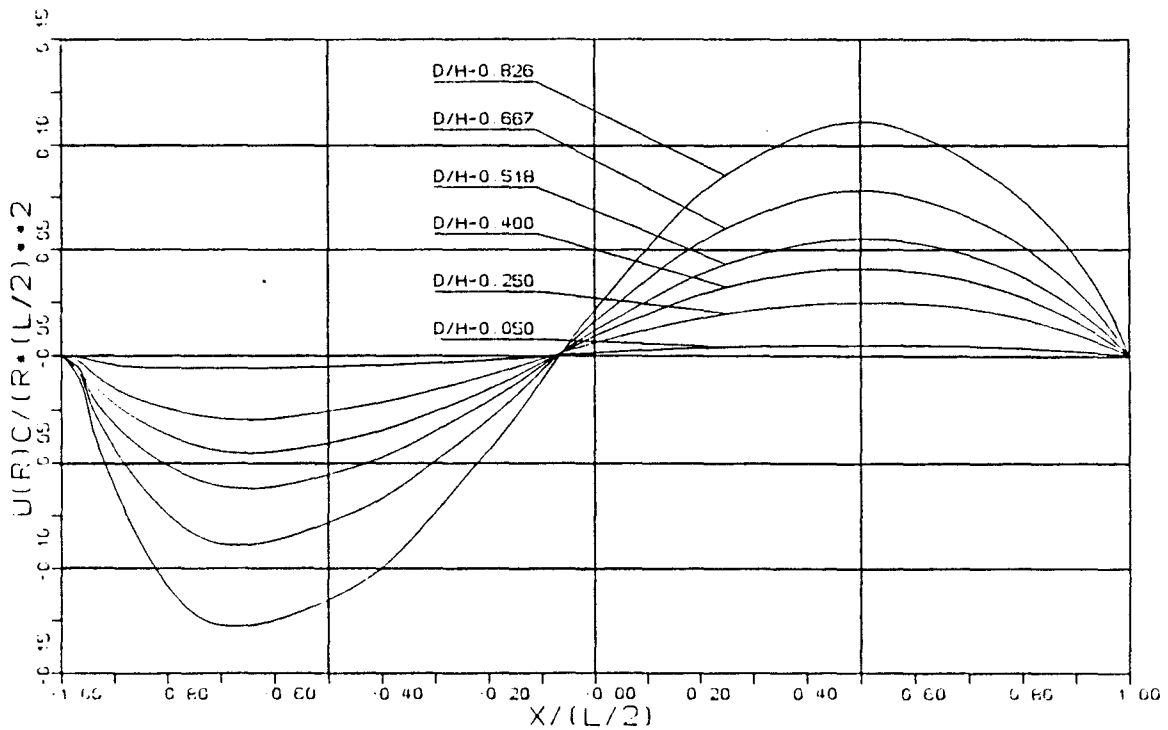


Abb. 2.5 :

Dimensionslose Funktion $U \cdot C$ in verschiedenen Wassertiefen für das Mariner-Schiff bei reiner Drehung

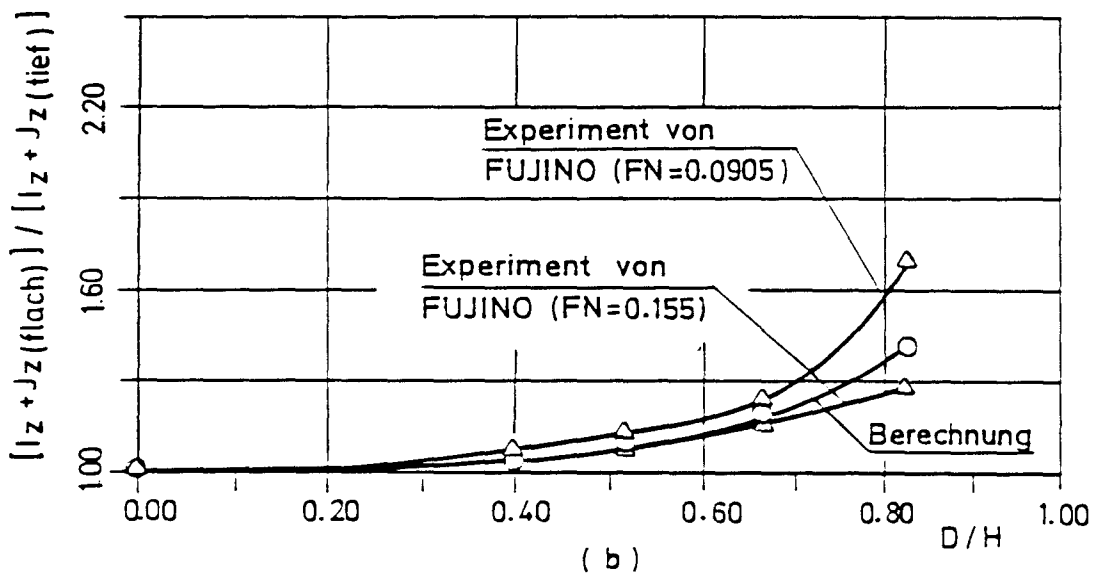
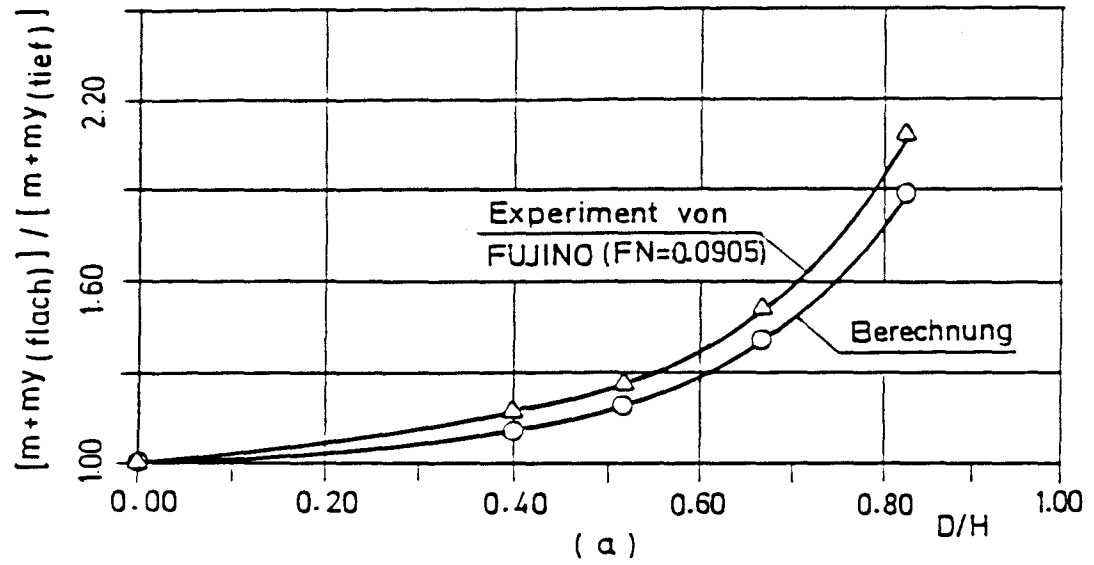


Abb. 2.6 : Summe von hydrodynamischer Masse und Schiffsmasse bzw. Summe von hydrodynamischem Trägheitsmoment und Massenträgheitsmoment des Schiffes um die z-Achse in Abhängigkeit von der Wassertiefe, bezogen auf den Wert für tiefes Wasser, für das Mariner-Schiff

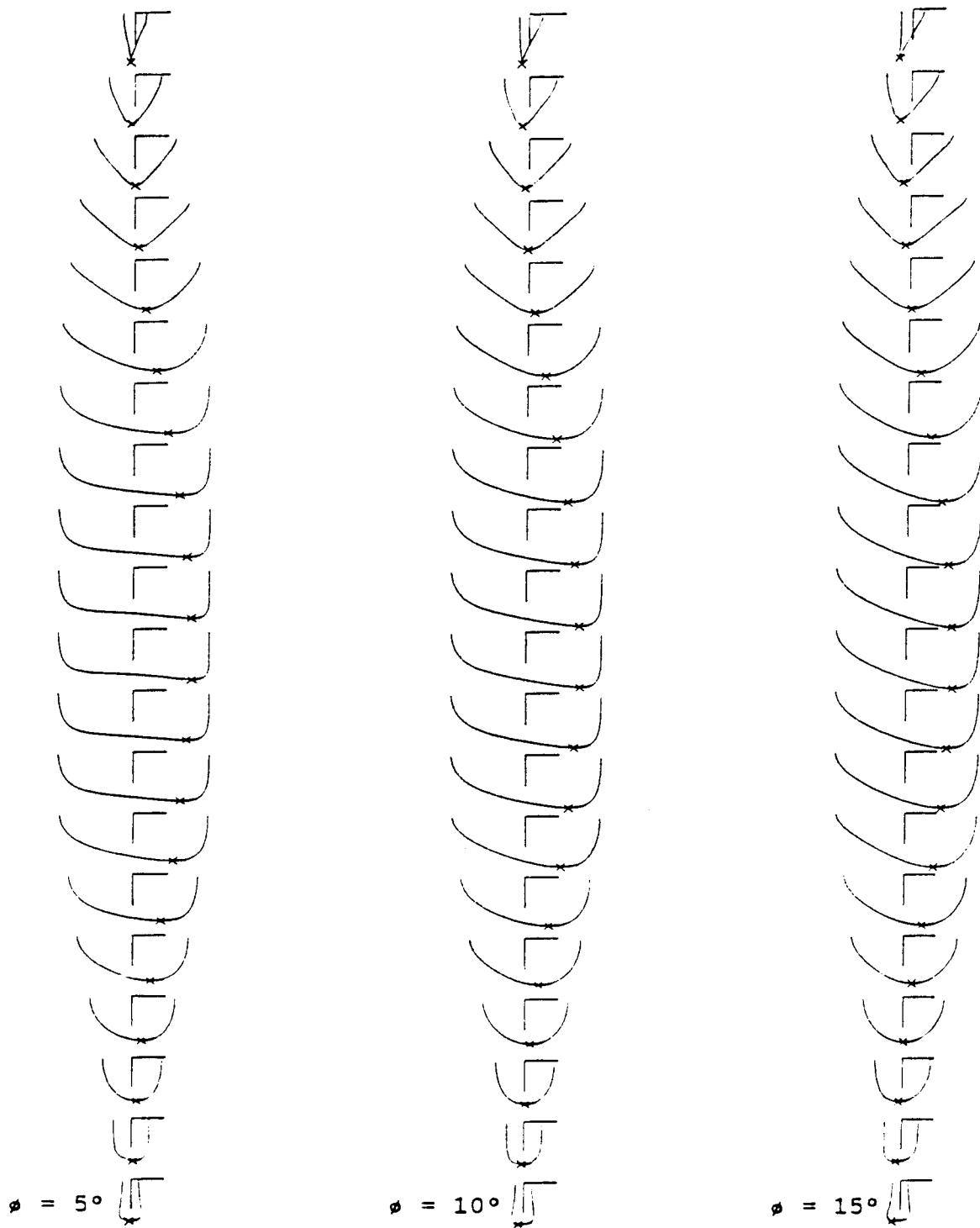
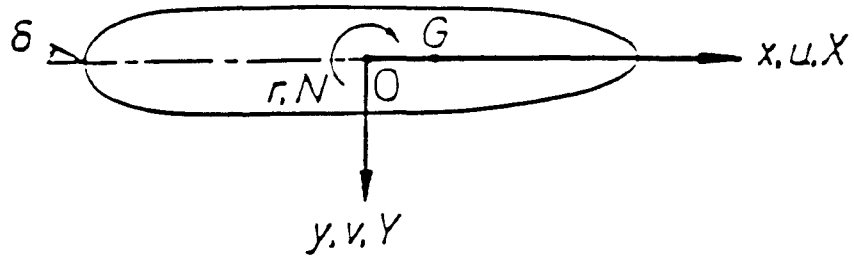
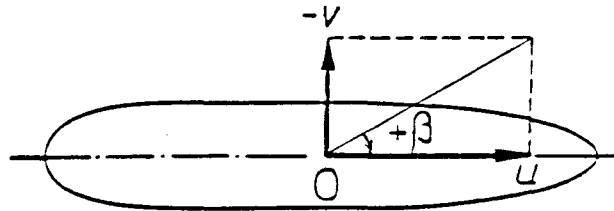


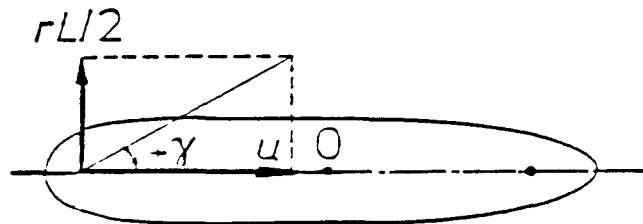
Abb. 3.1 : Formen von Annäherungen an die Schiffsspanten bei 5, 10 und 15 Grad Krängungswinkel. Die Annäherungen sind komforme Abbildungen eines Einheitshalbkreises entstanden.



(a) Koordinaten, Geschwindigkeit und Kräfte



(b) Driftwinkel β



(c) "Gierwinkel" γ

Abb. 4.1 : Definitionsskizzen

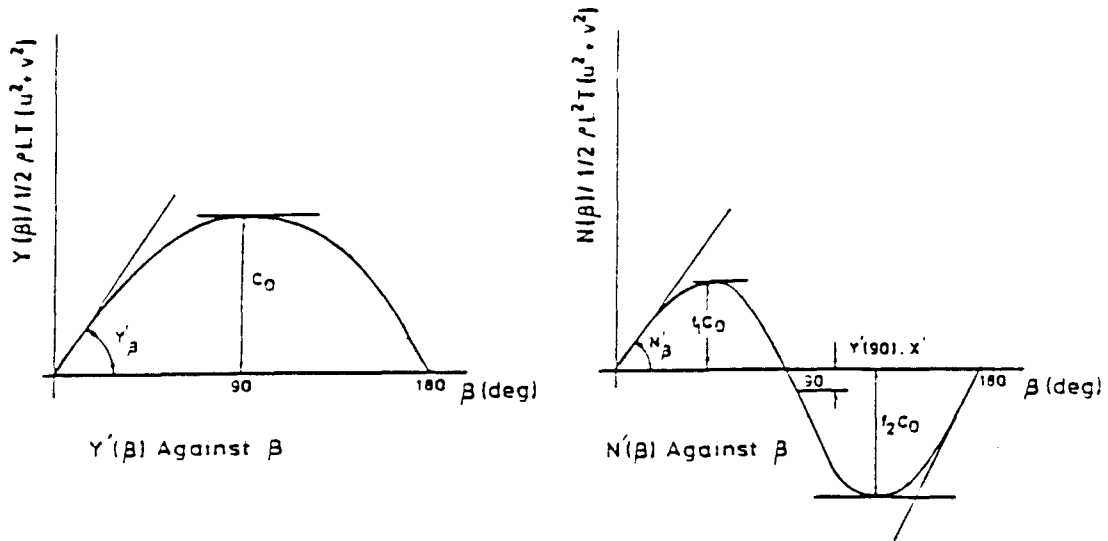


Abb. 4.2a: Die auf ein Schiff wirkende hydrodynamische Querkraft und das Giermoment bei sehr großem Driftwinkel nach KHATTAB (1987)

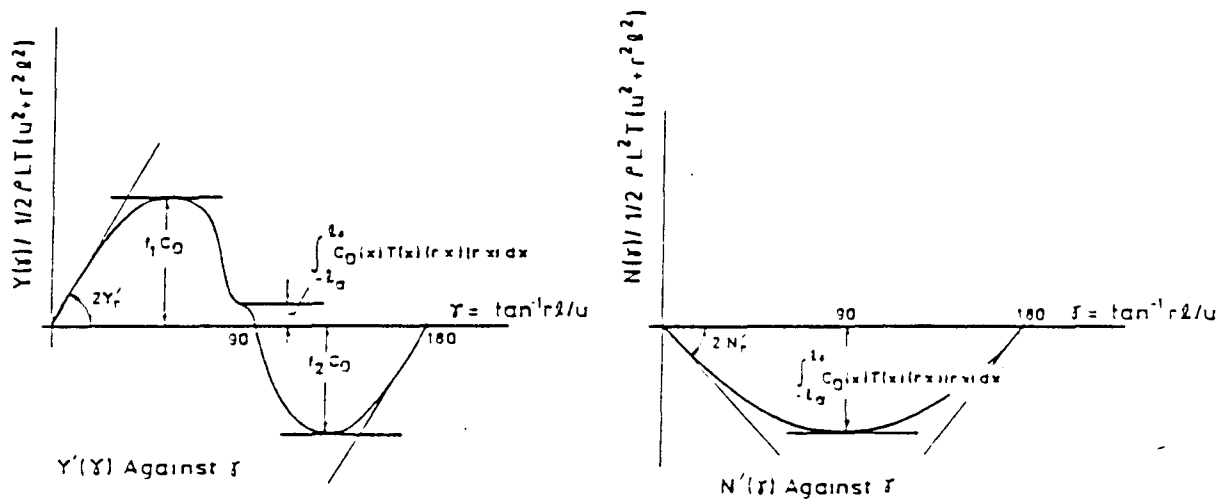


Abb. 4.2b: Die auf ein Schiff wirkende hydrodynamische Querkraft und das Giermoment bei sehr großem "Gierwinkel" nach KHATTAB (1987)

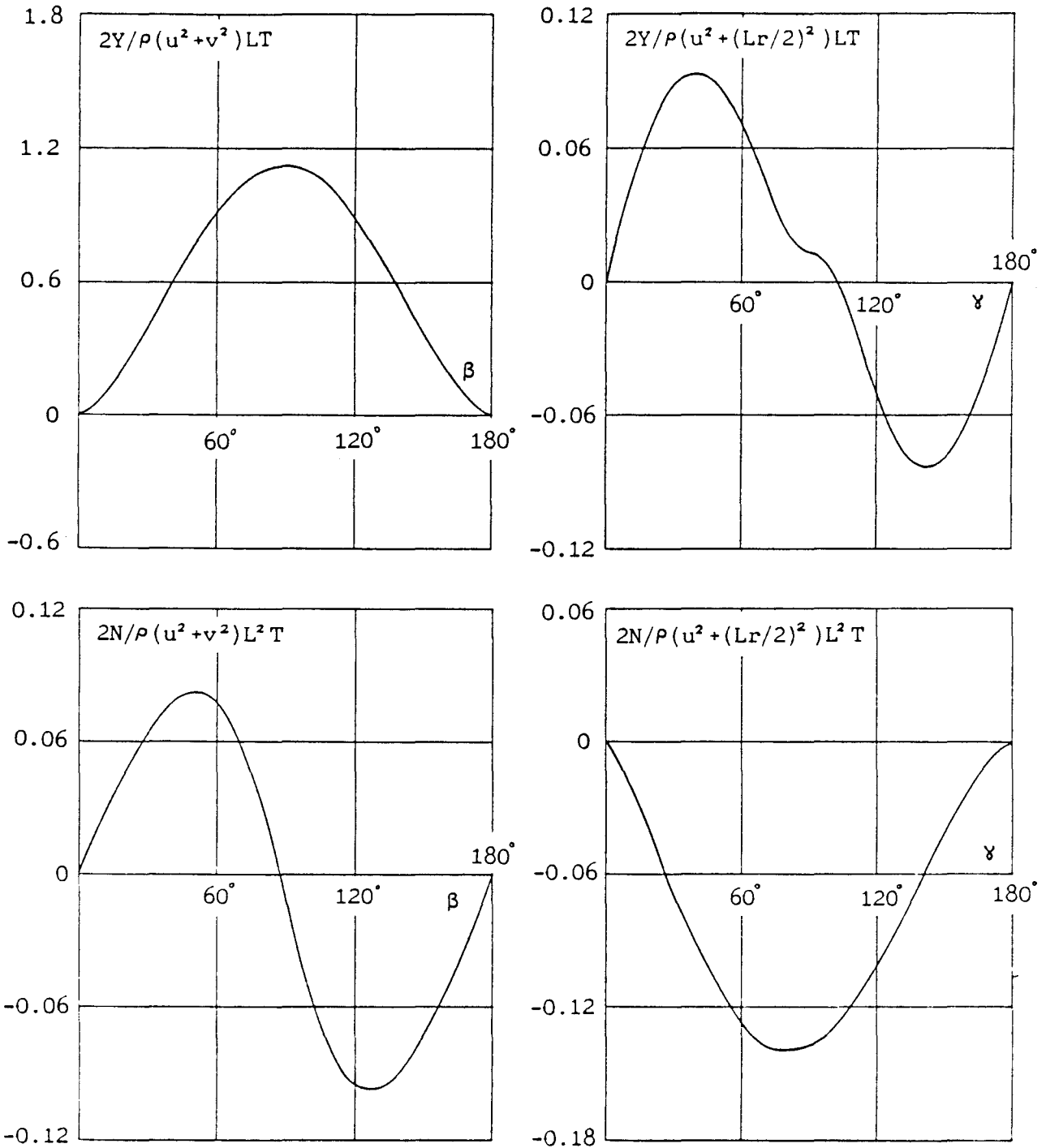


Abb. 4.3a: Querkraft und Biegemoment am Tanker Tokyo-Maru infolge Driftwinkel bzw. "Gierwinkel" nach vorliegender rechnerischer Methode

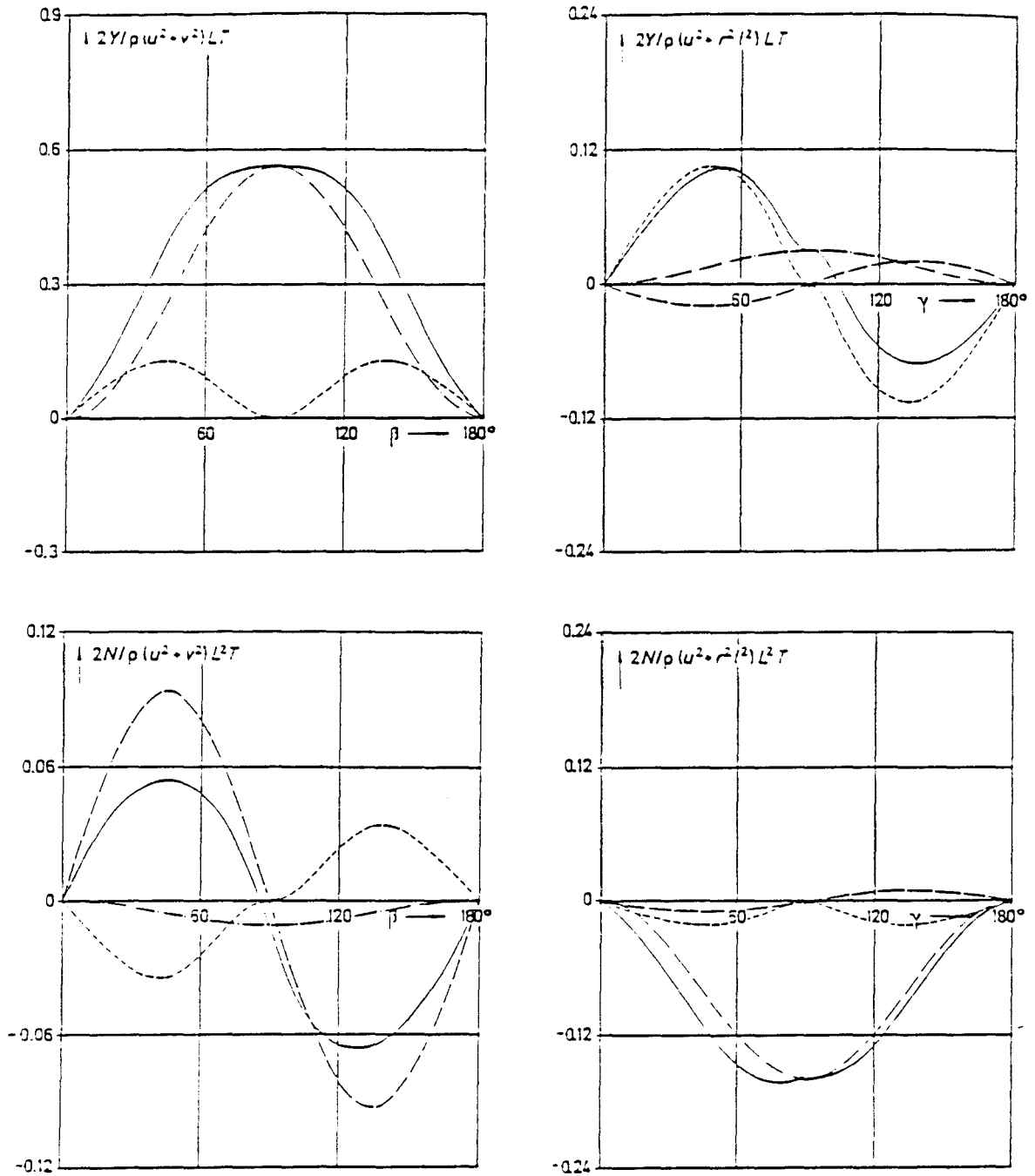


Abb. 4.3b: Querkraft und Giermoment am Tanker Tokyo-Marun infolge Driftwinkel und "Gierwinkel" nach SHARMA (1984)

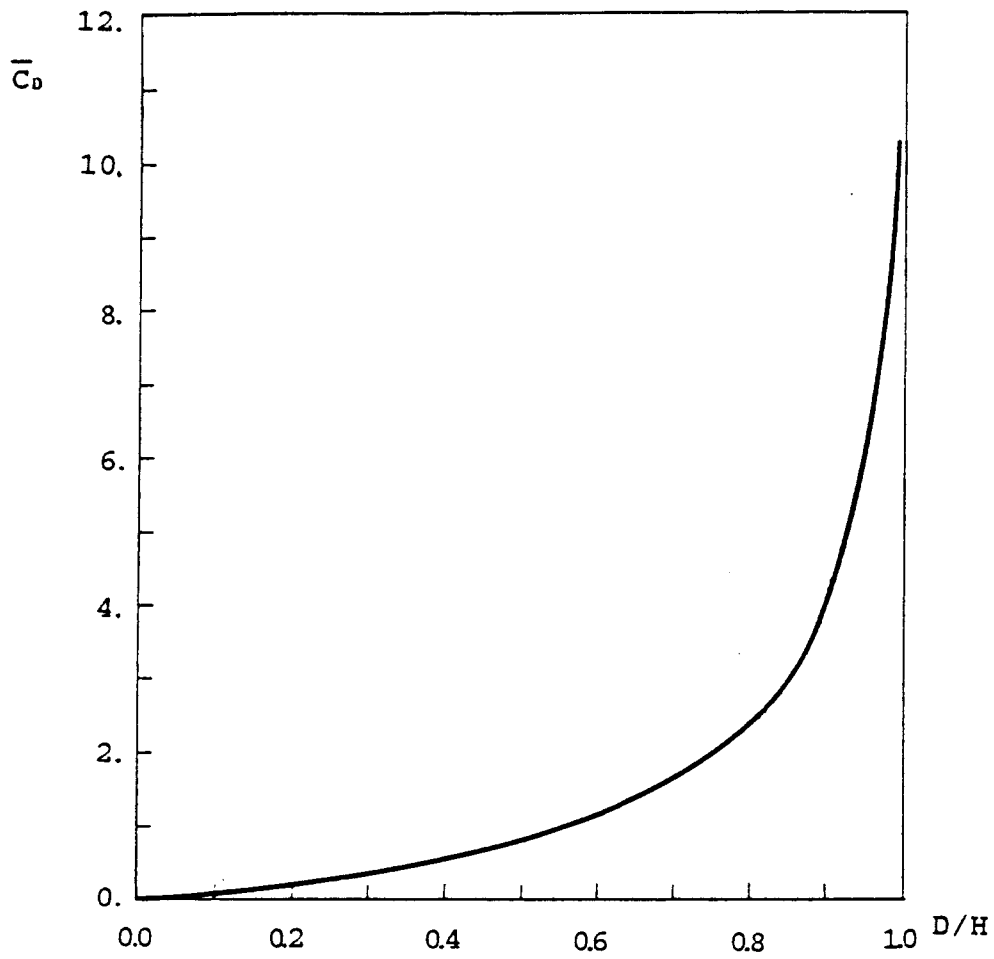


Abb. 4.4 : Mittlerer Querwiderstandsbeiwert in flachem Wasser nach Gleichung (4.12)

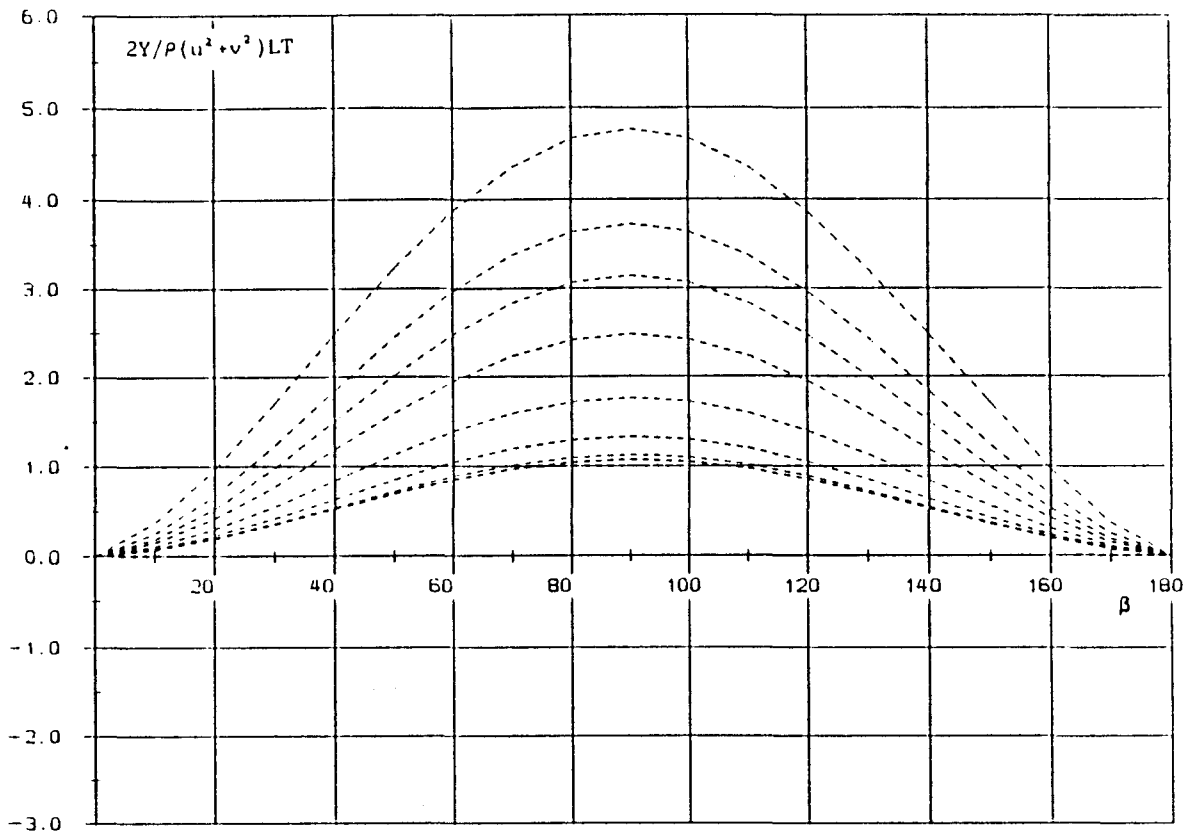


Abb. 4.5 : Dimensionslose Querkraft am Tanker Tokyo-Maru abhängig vom Driftwinkel bei verschiedenen Wassertiefen

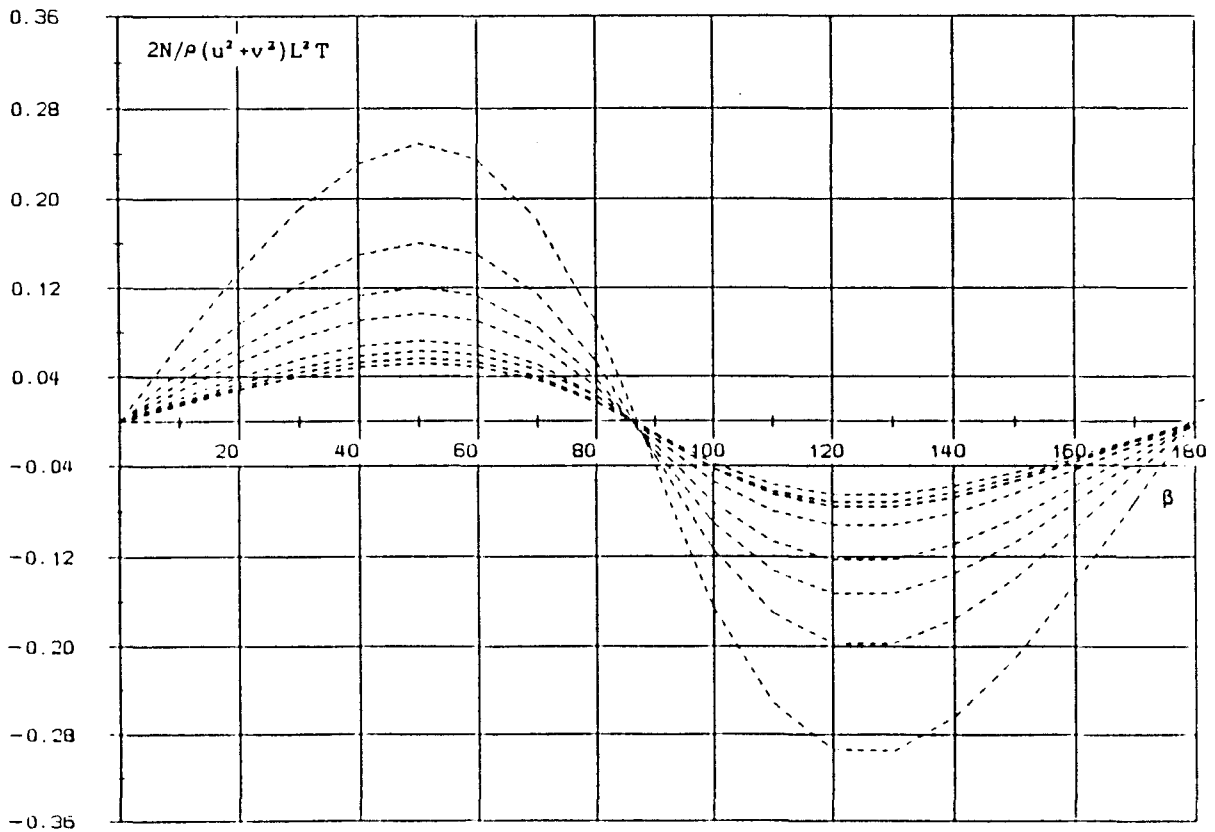


Abb. 4.6 : Dimensionsloses Giermoment am Tanker Tokyo-Maru abhängig vom Driftwinkel bei verschiedenen Wassertiefen

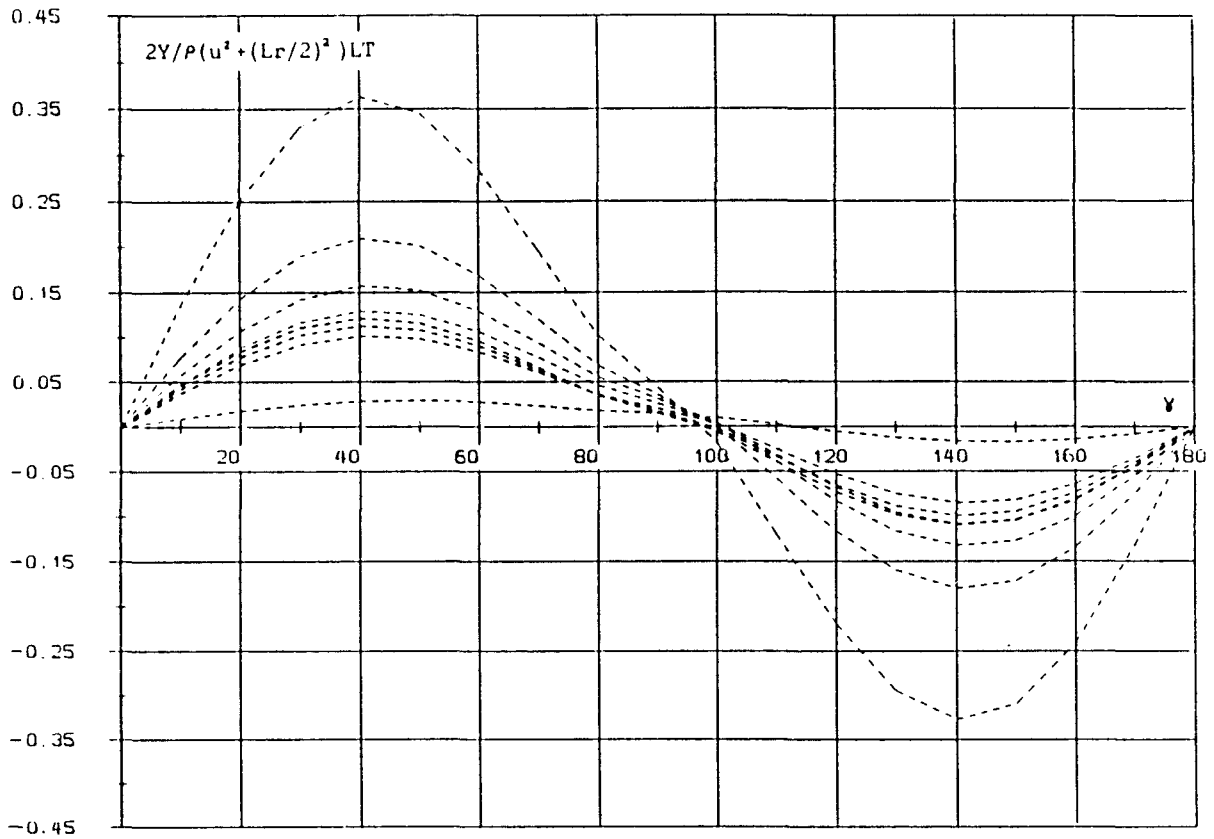


Abb. 4.7 : Dimensionslose Querkraft am Tanker Tokyo-Maru abhängig vom "Gierwinkel" bei verschiedenen Wassertiefen

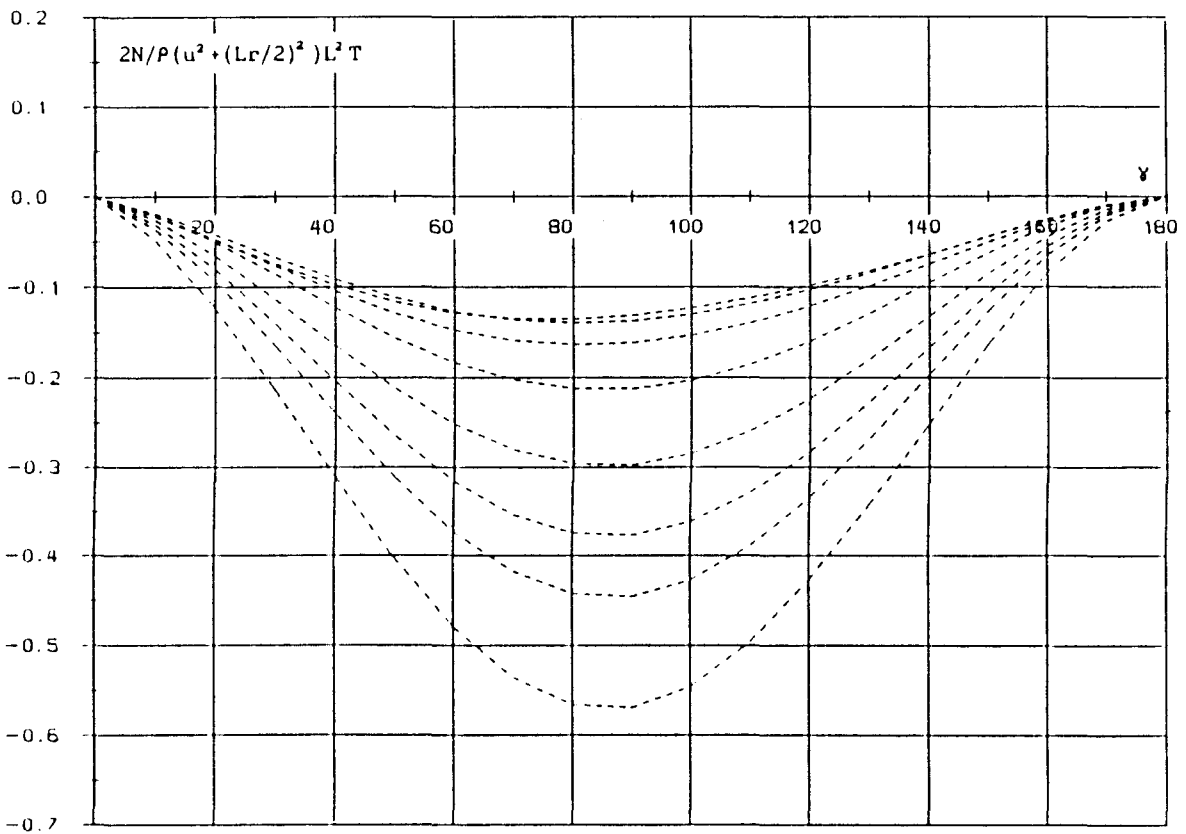


Abb. 4.8 : Dimensionsloses Giermoment am Tanker Tokyo-Maru abhängig vom "Gierwinkel" bei verschiedenen Wassertiefen

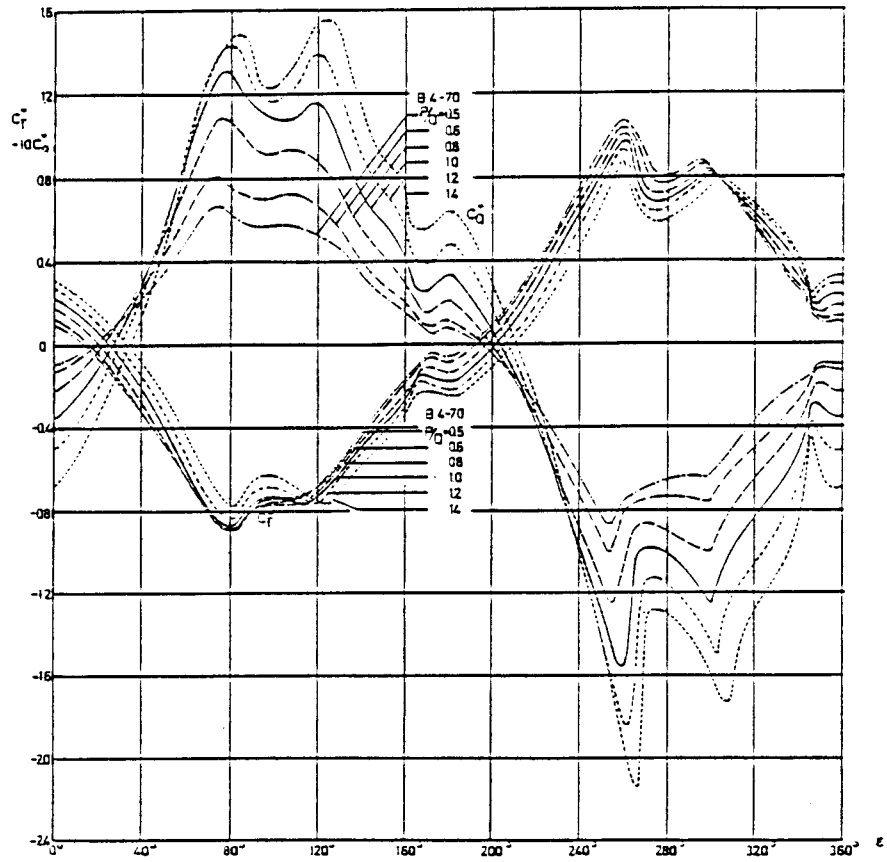


Abb. 5.1 : Vier-Quadranten-Propellerdiagramm eines B4-70 Propellers, Versuchsergebnisse von LAMMEREN et al. (1969)

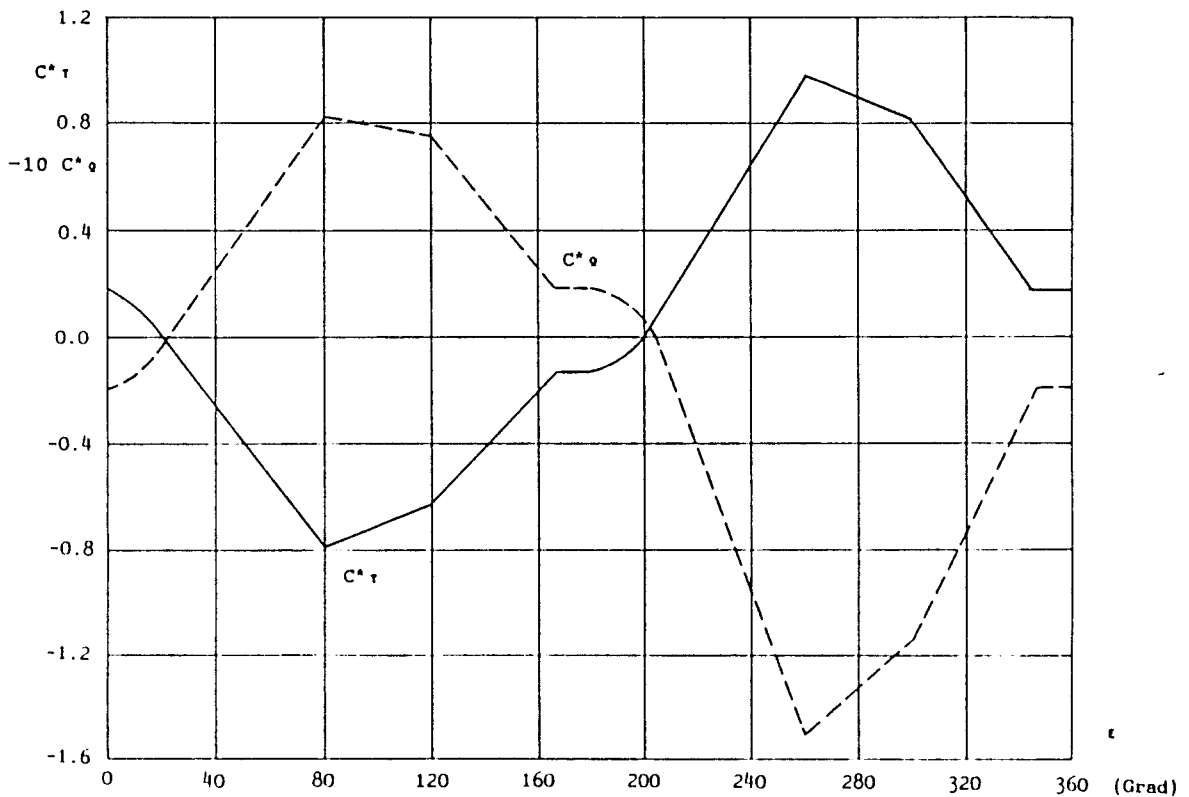


Abb. 5.2 :
Rechnerisches Propellerdiagramm in vier Quadranten für einen Propeller mit $P = 5.893 \text{ m}$, $D_p = 7.91 \text{ m}$, $A_E/A_0 = 0.6$ und $Z_p = 5$

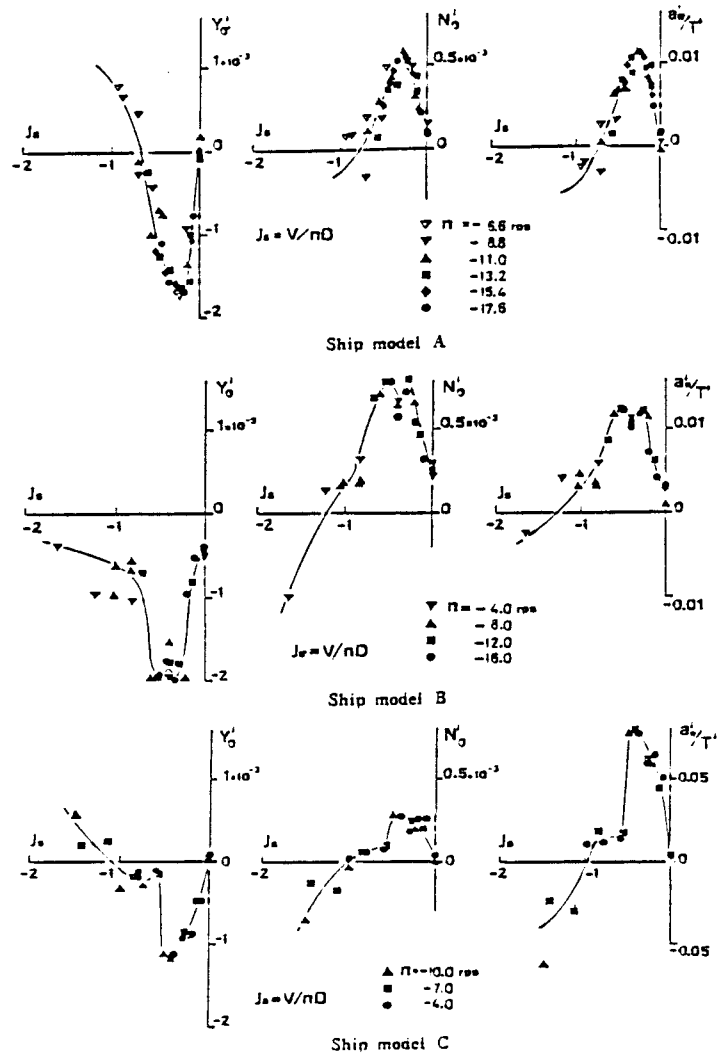


Abb. 5.3 : Die vom Propeller herrührenden hydrodynamischen Kräfte bei Rückwärtsdrehung des Propellers von NOMOTO (1978)

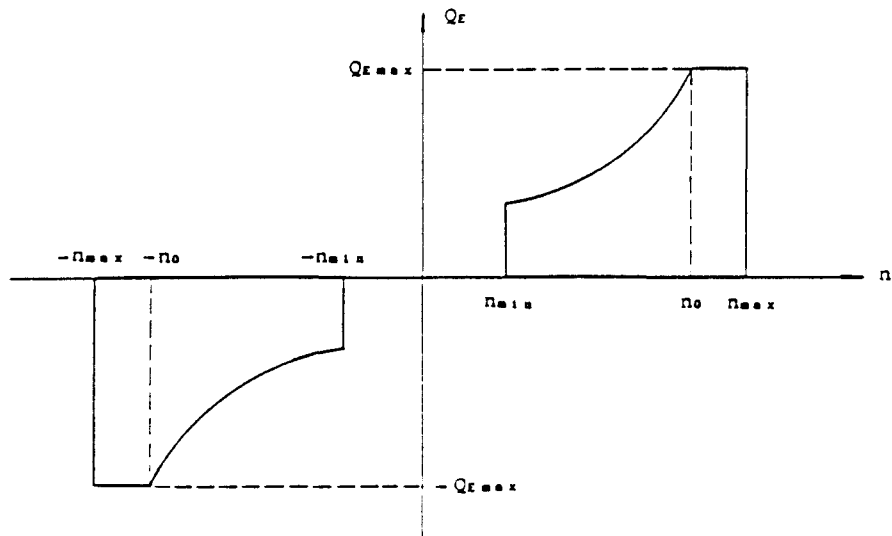


Abb. 5.4 : Kennfeld einer Schiffsantriebsmaschine

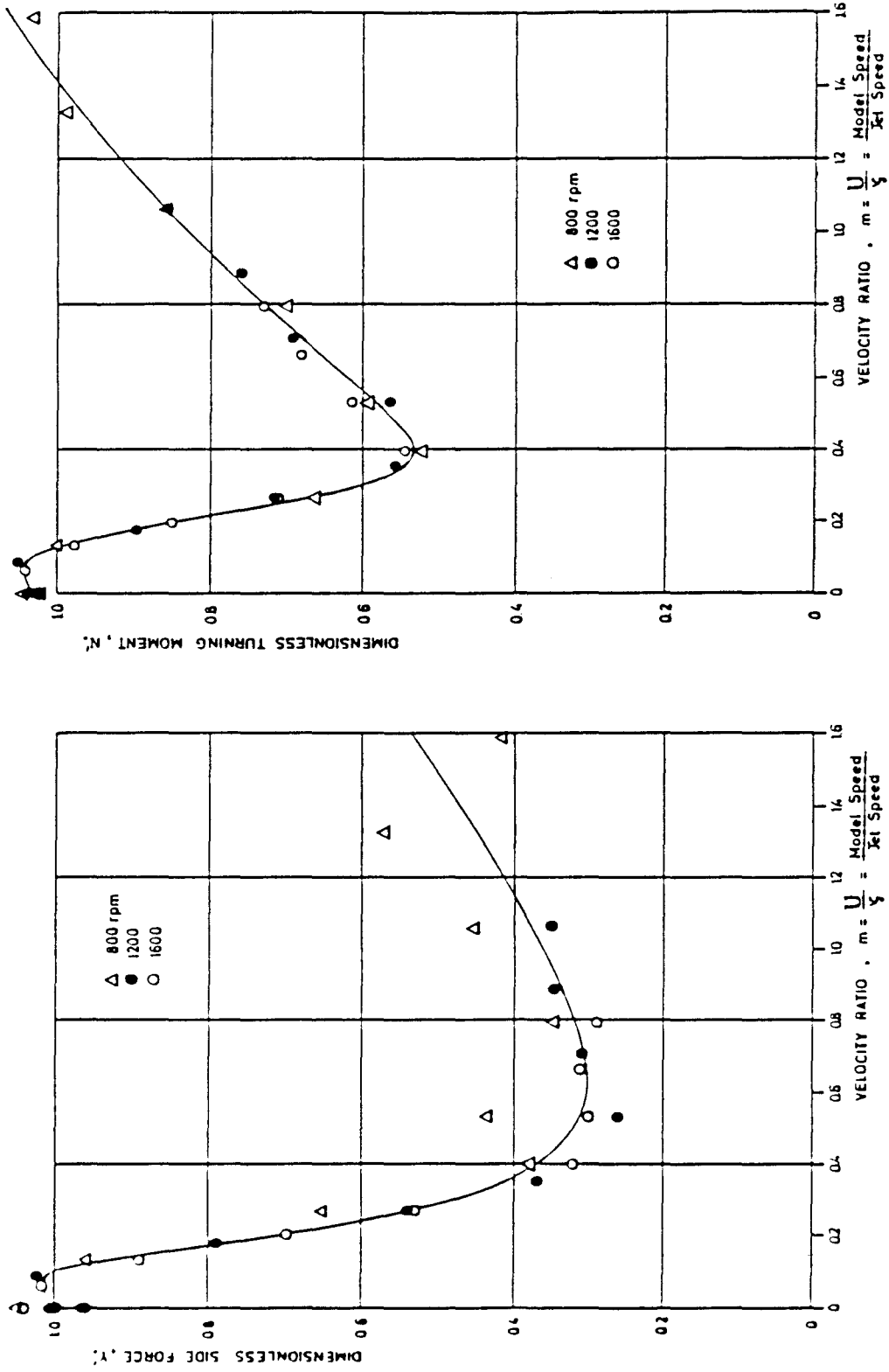


Abb. 6.1 : Dimensionslose Querkraft und dimensionsloses Giermoment infolge eines Querstrahlers als Funktion des Geschwindigkeitsverhältnisses, nach CHISLETT et al. (1966)

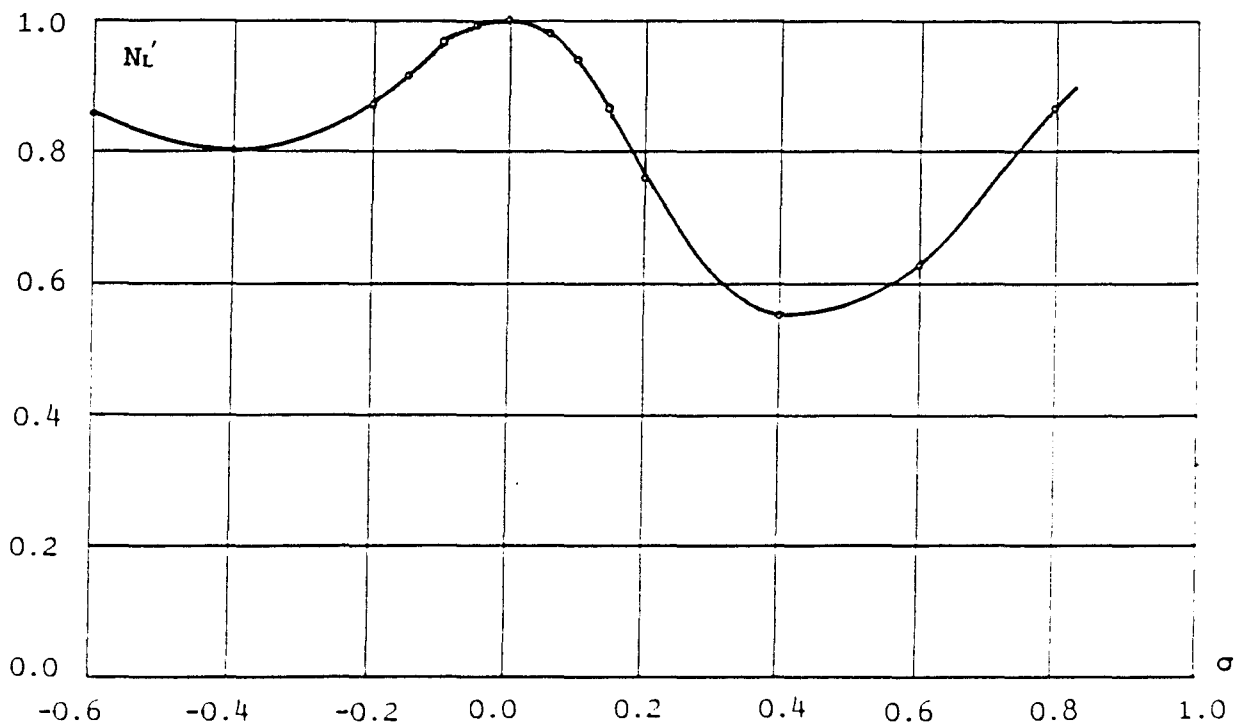
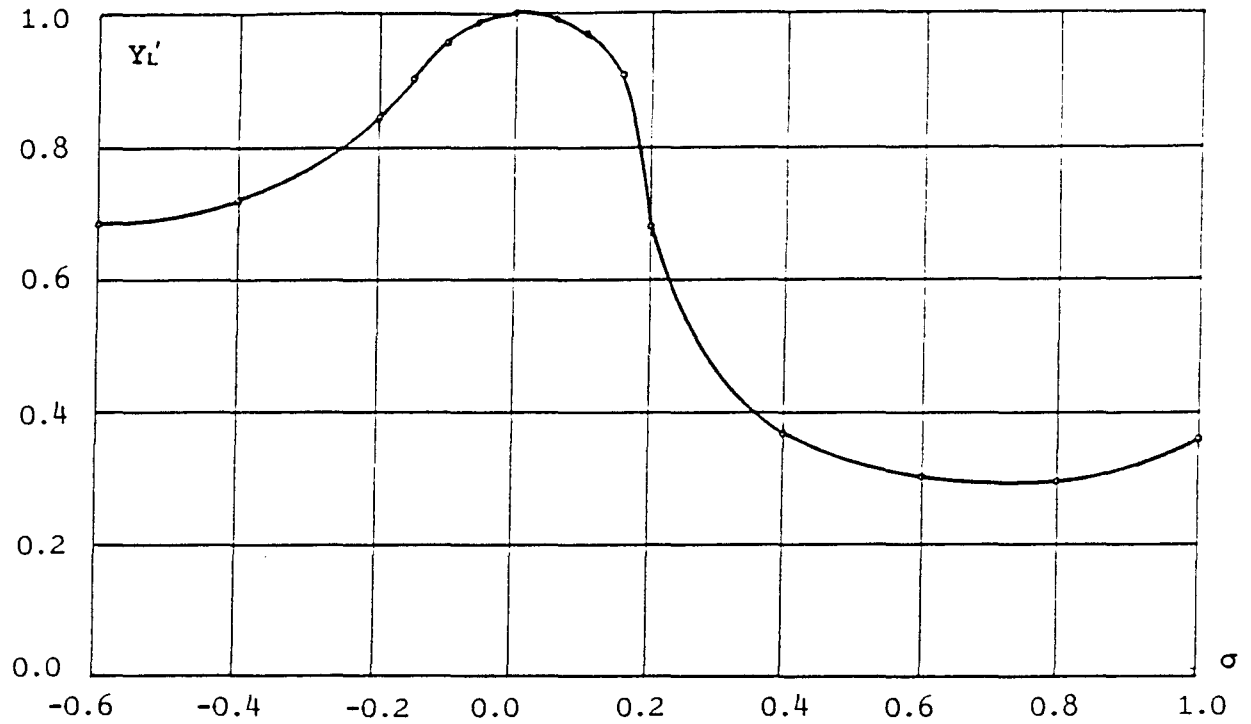


Abb. 6.2 : Dimensionslose Kräfte infolge eines Querstrahlers als Funktion des Geschwindigkeitsverhältnisses nach Regressionsformeln

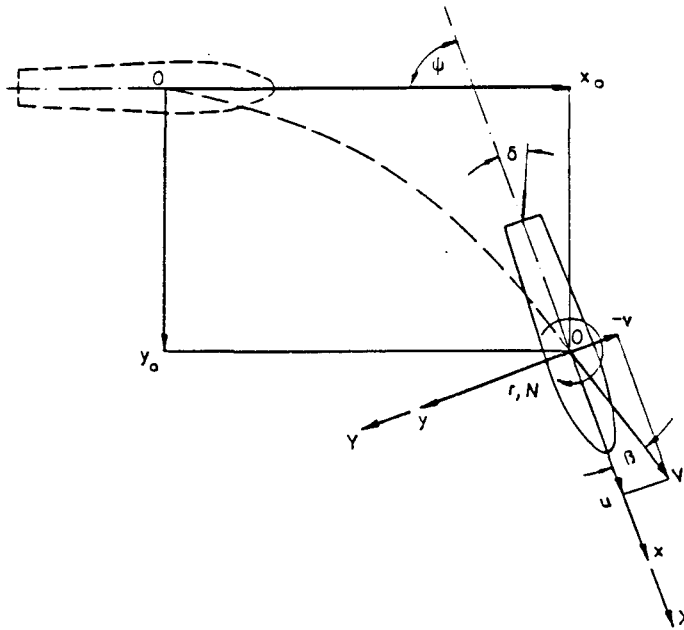


Abb. 7.1 : Koordinatensystem eines manövrierenden Schiffes

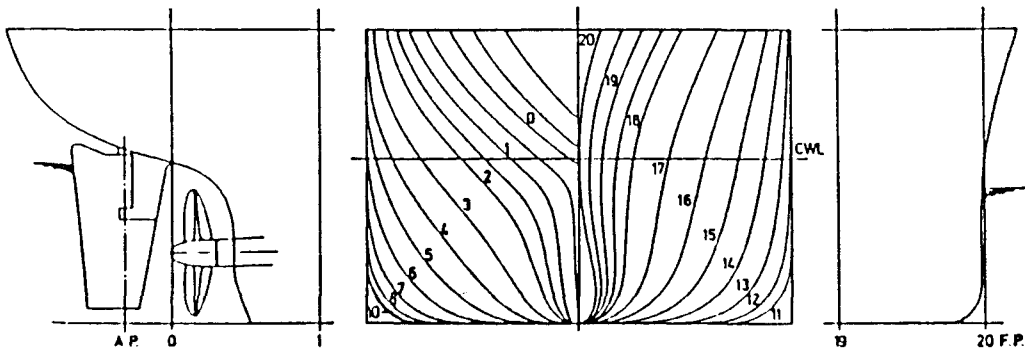


Abb. 7.2 : Spantenriß und Seitenansicht für das Mariner-Schiff

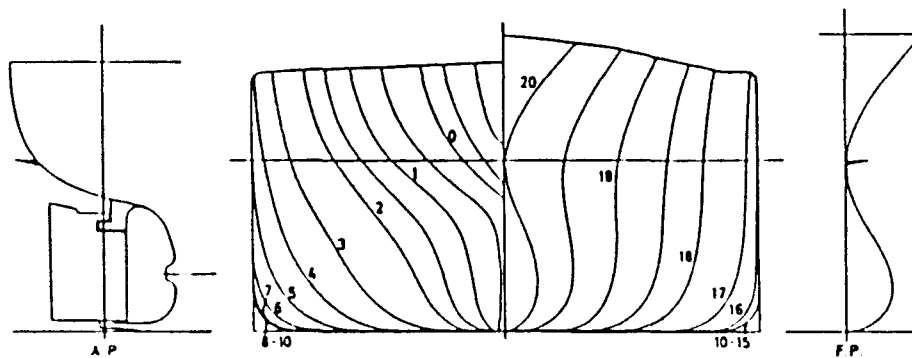


Abb. 7.3 : Spantenriß und Seitenansicht für den Tanker Tokyo-Mar

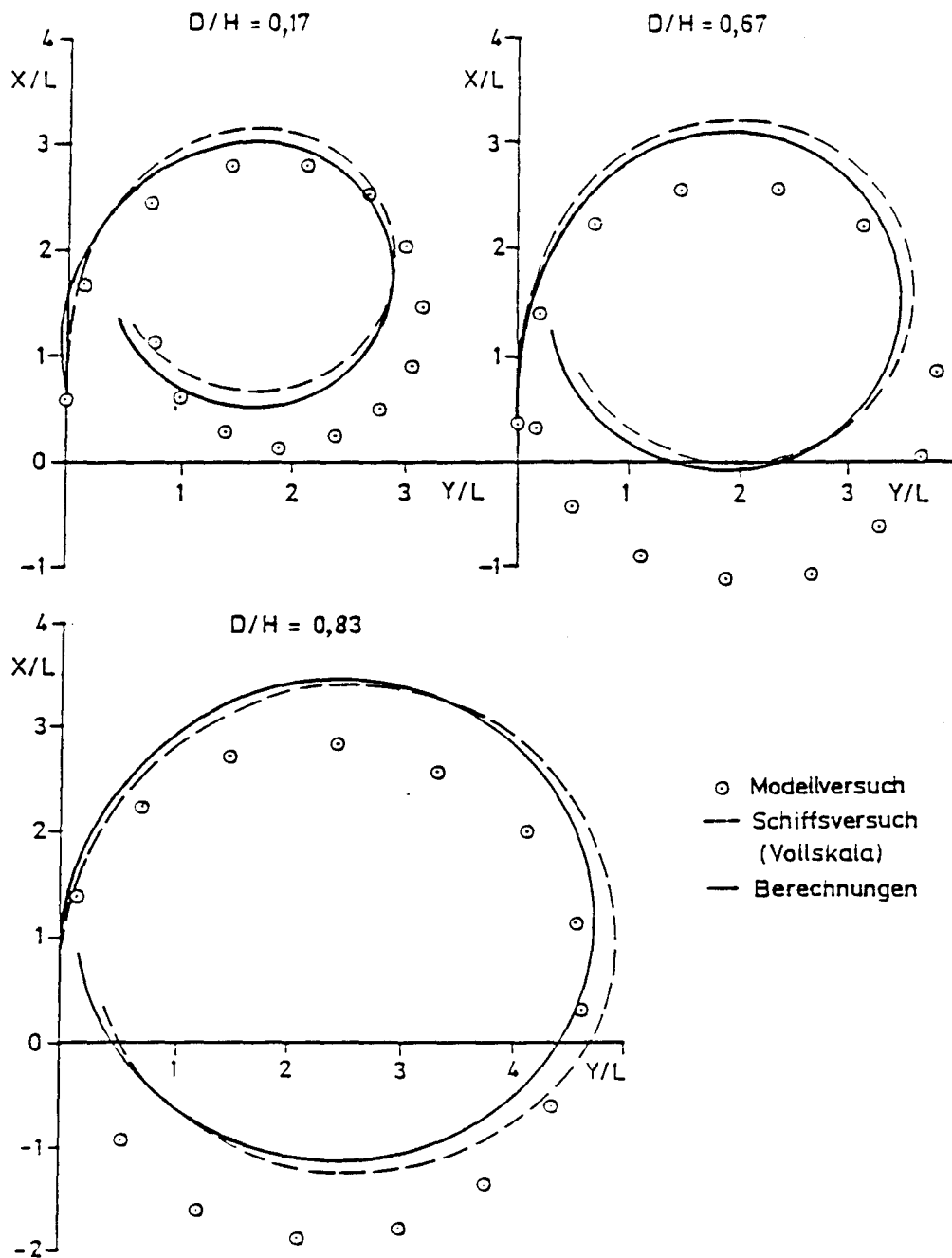


Abb. 7.4 : Drehkreis des Tankers "Esso Osaka" bei 35 Grad Ruderwinkel mit Anfangsgeschwindigkeit von 7.2 kn in tiefem und in flachem Wasser. Manöverbeginn am Ursprungspunkt.

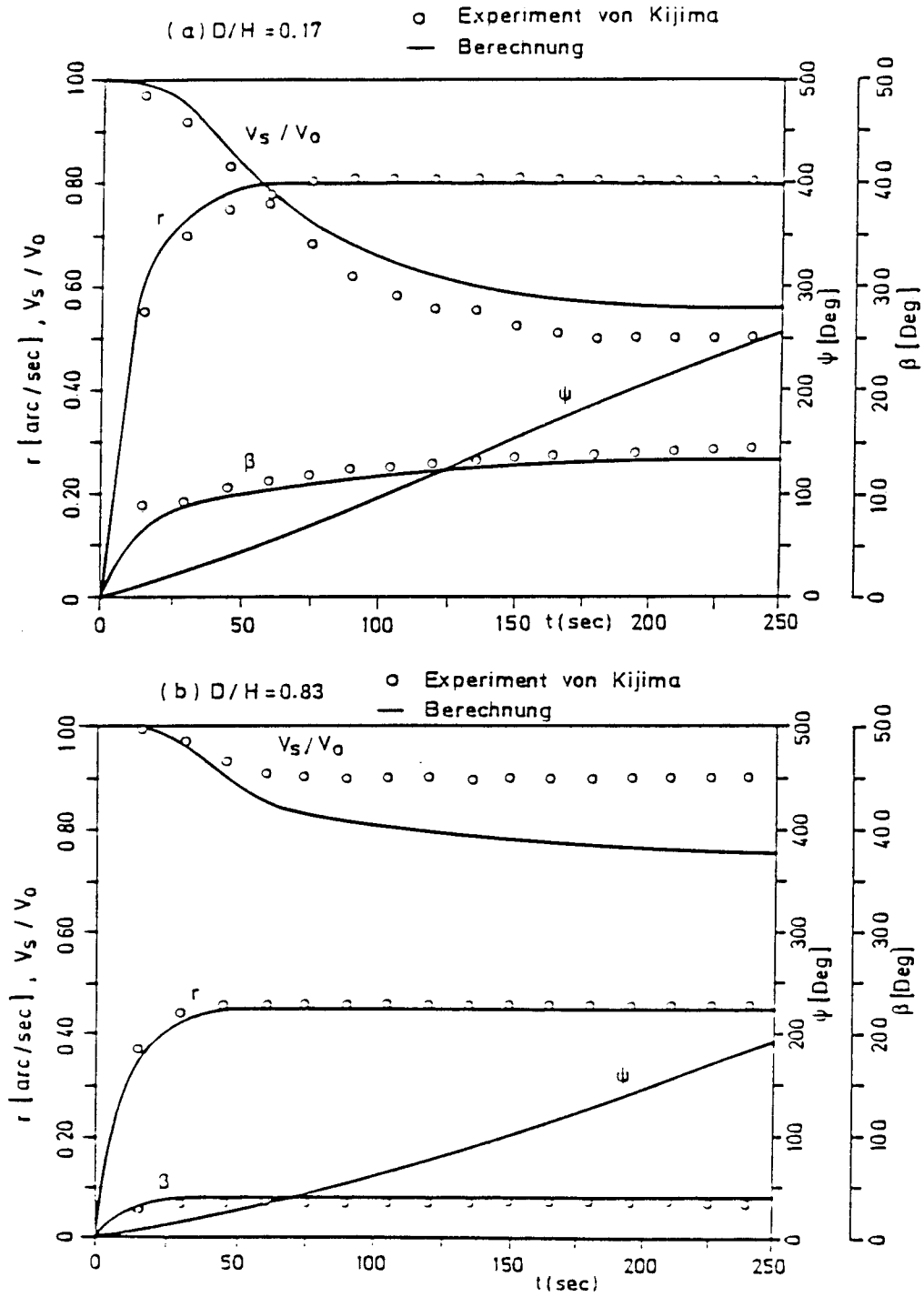


Abb. 7.5 : Drehgeschwindigkeit r , Geschwindigkeitsverlust V_s/V_0 , Gierwinkel ψ und Driftwinkel β bei Kreismanövern des Tankers "Esso Osaka" auf tiefem und auf flachem Wasser in Abhängigkeit von der Zeit t

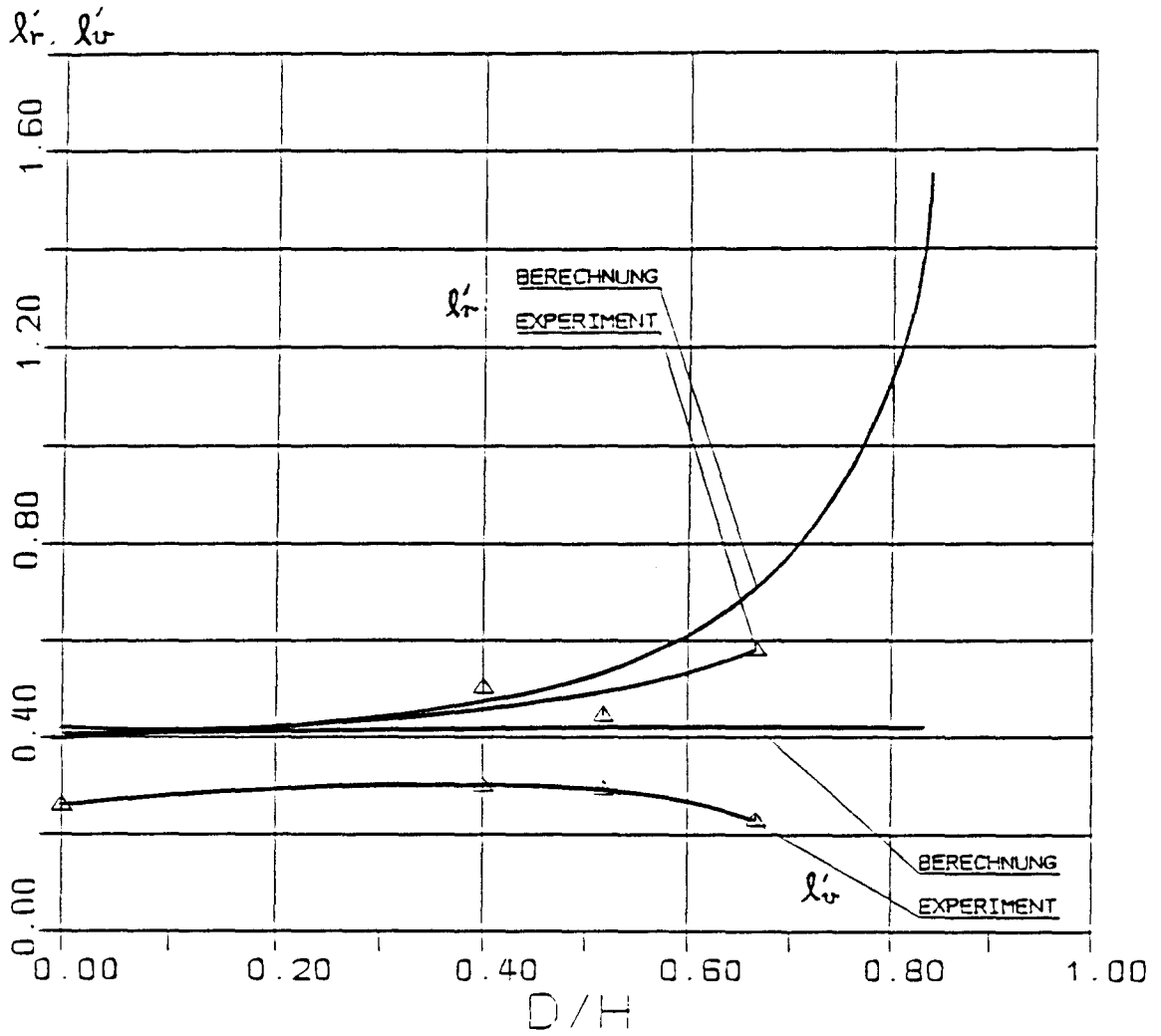
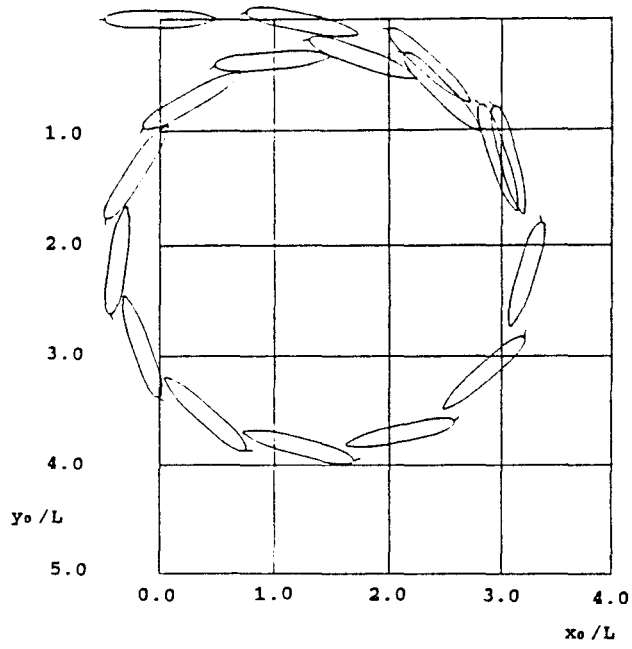
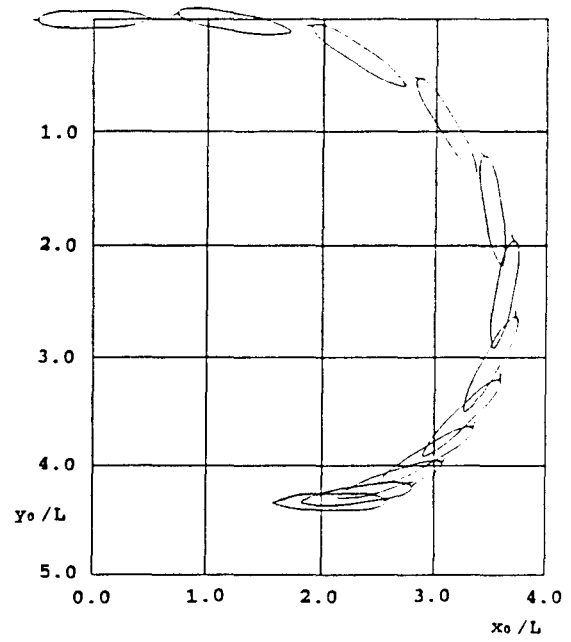


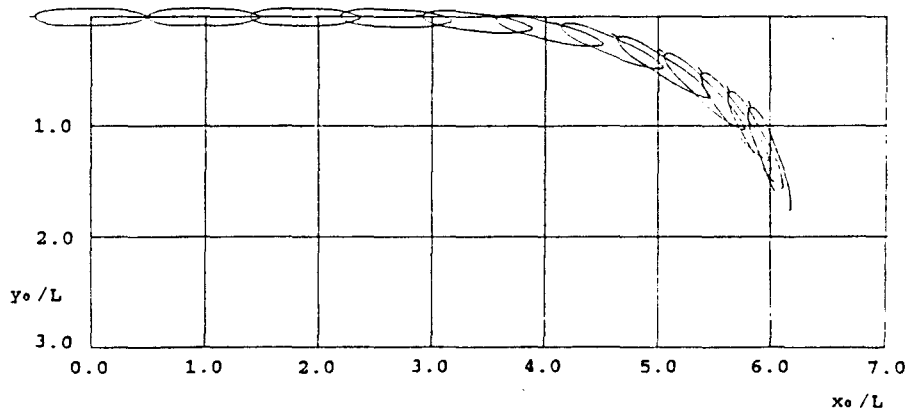
Abb. 7.6 : l'_v und l'_r in Abhängigkeit von der Wassertiefe für das Mariner-Schiff



a. Drehkreis, $\delta = -35$ Grad



b. Stoppmanöver, $\delta = -35$ Grad



c. Stoppmanöver, $\delta = 0$ Grad

Abb. 7.7 : Vergleich der Stoppmanöver mit dem Drehkreis für den Tanker Tokyo-Mar

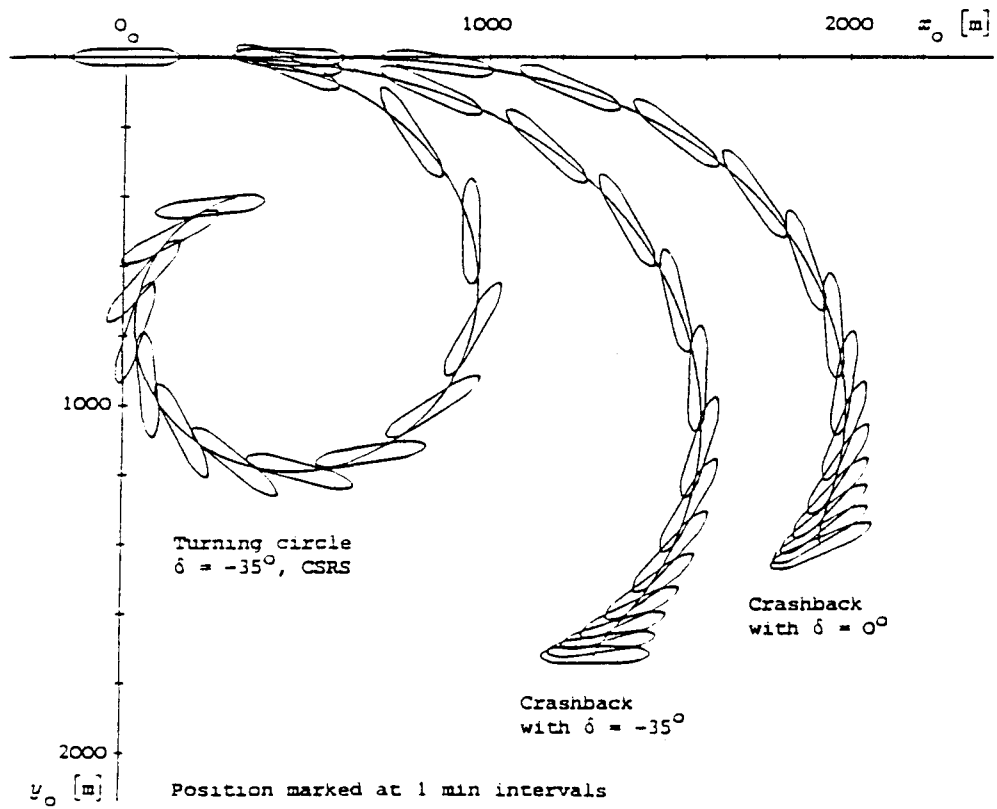
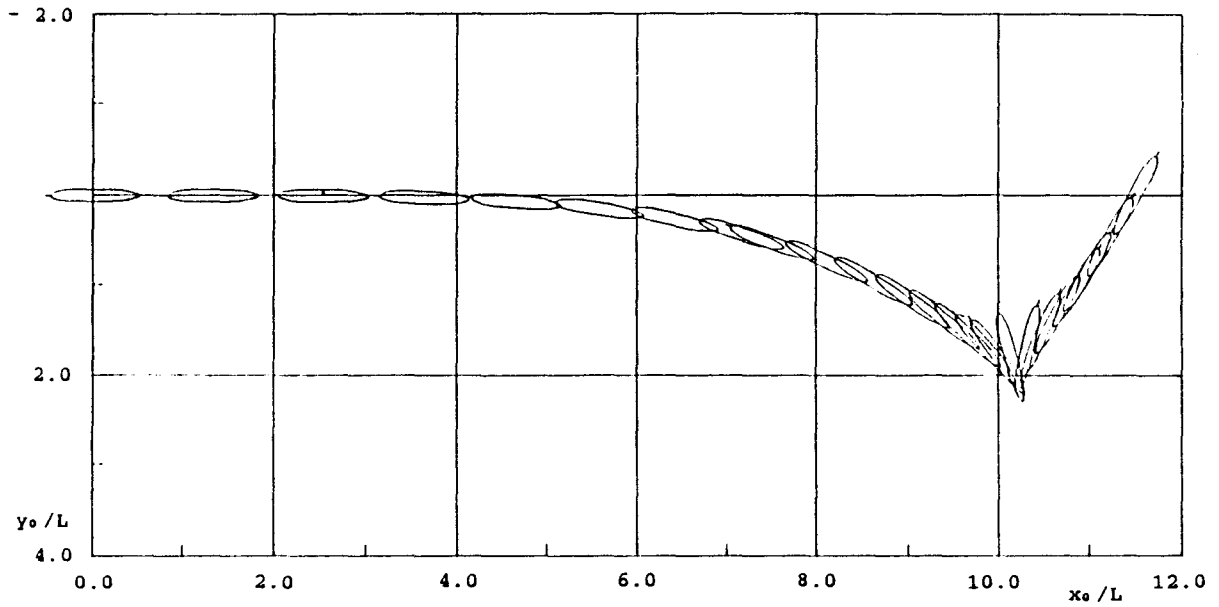
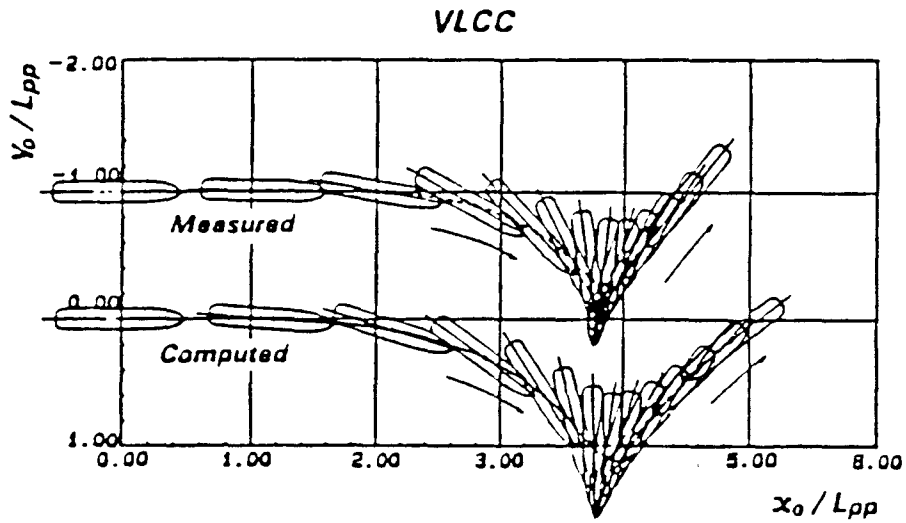


Abb. 7.8 : Vergleich der Stoppmanöver mit dem Drehkreisbewegung für einen Tanker nach SHARMA (1984)



a. Rechenergebnis



b. Versuchsergebnis

Abb. 7.9 : Vergleich des rechnerischen Ergebnisses mit dem Modellversuchsergebnis von KOBAYASHI (1987) für Stoppmanöver und Rückwärtsbewegung des Schiffes

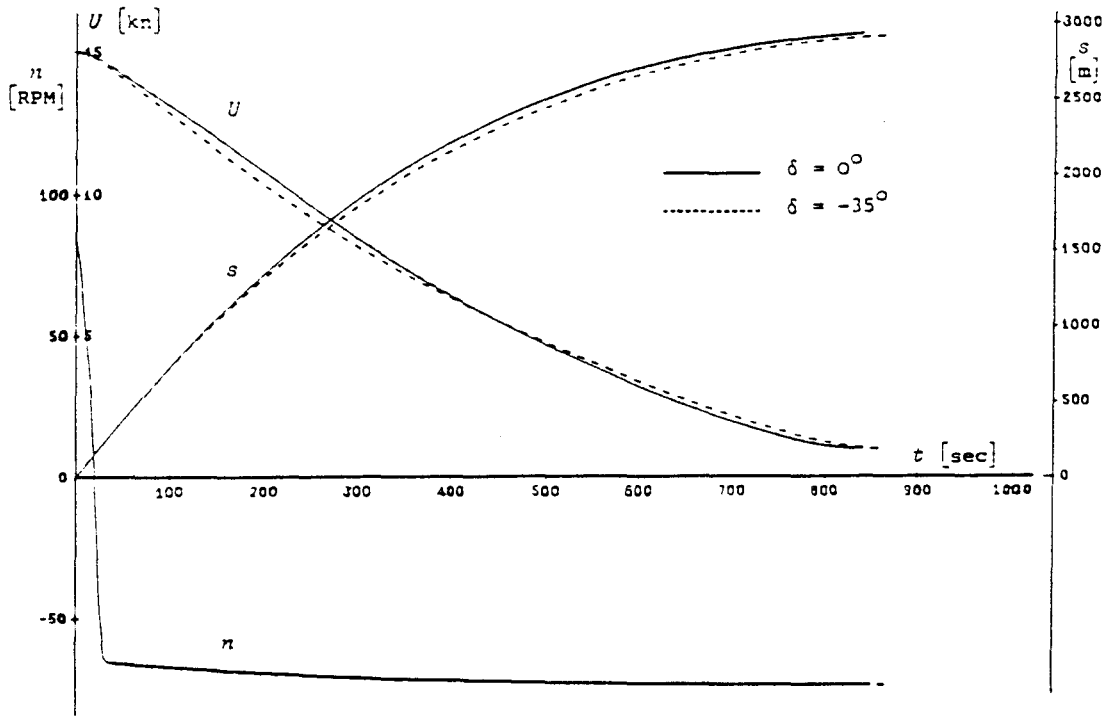


Abb. 7.10: Geschwindigkeit des Schiffes und Propellerdrehzahl bei Stoppmanövern des Tankers Tokyo-Maru in Abhängigkeit von der Zeit t nach SHARMA (1984)

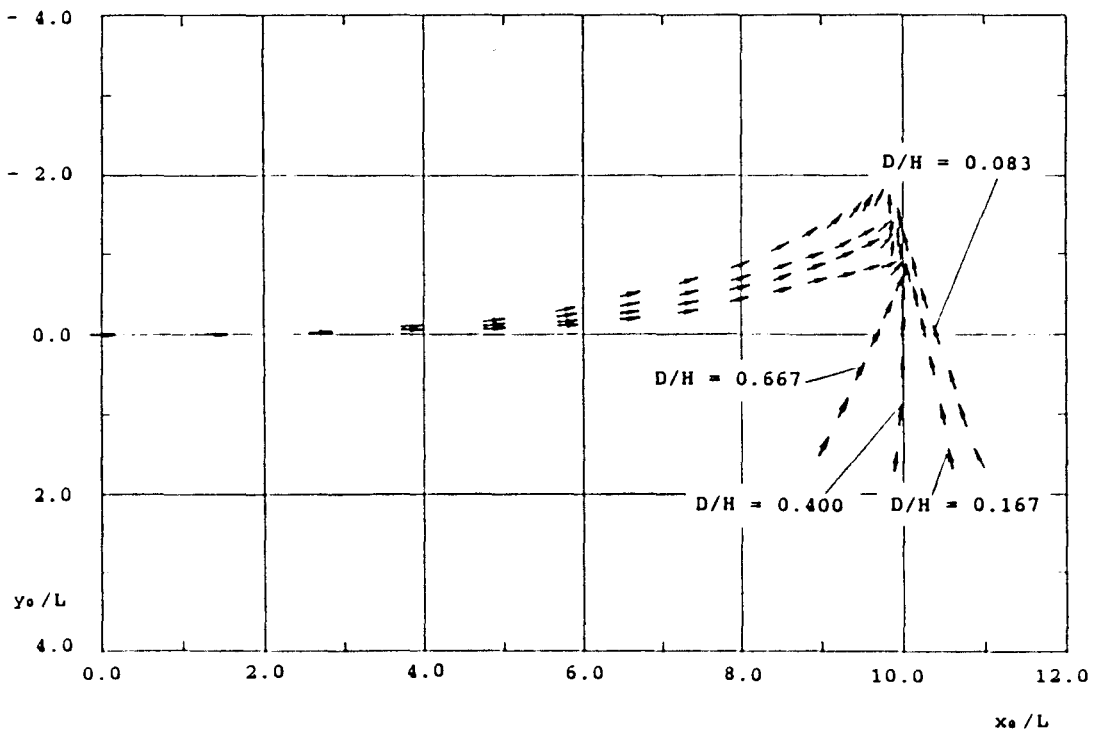


Abb. 7.11: Stoppmanöver und Rückwärtsbewegung in flachem Wasser

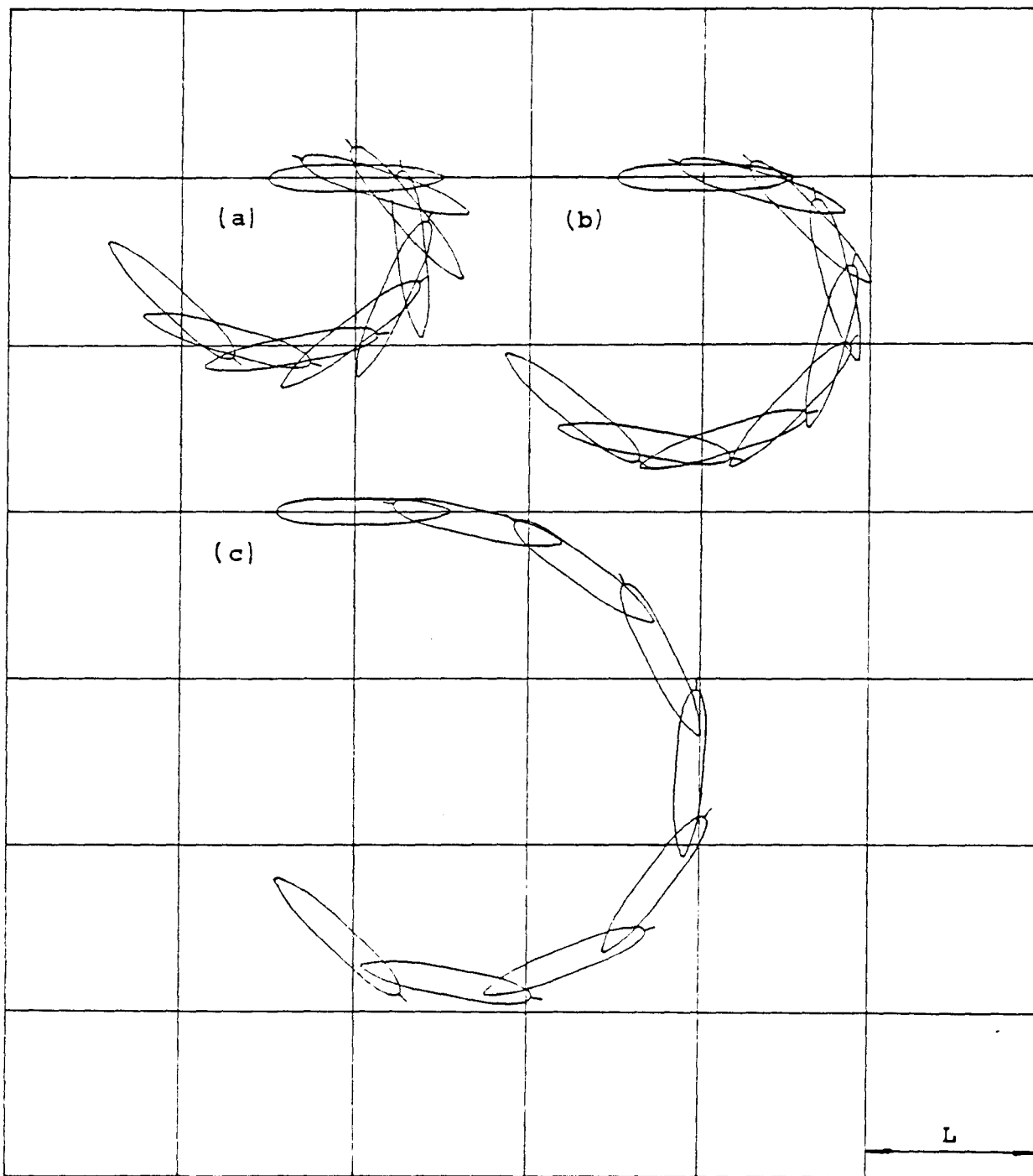


Abb. 7.12: Drehkreis eines Tankers mit geringer Anfangsgeschwindigkeit bei Benutzung eines Bugquerstrahlers

a. $V_0 = 0.5$ m/s

b. $V_0 = 1.0$ m/s

c. $V_0 = 2.0$ m/s

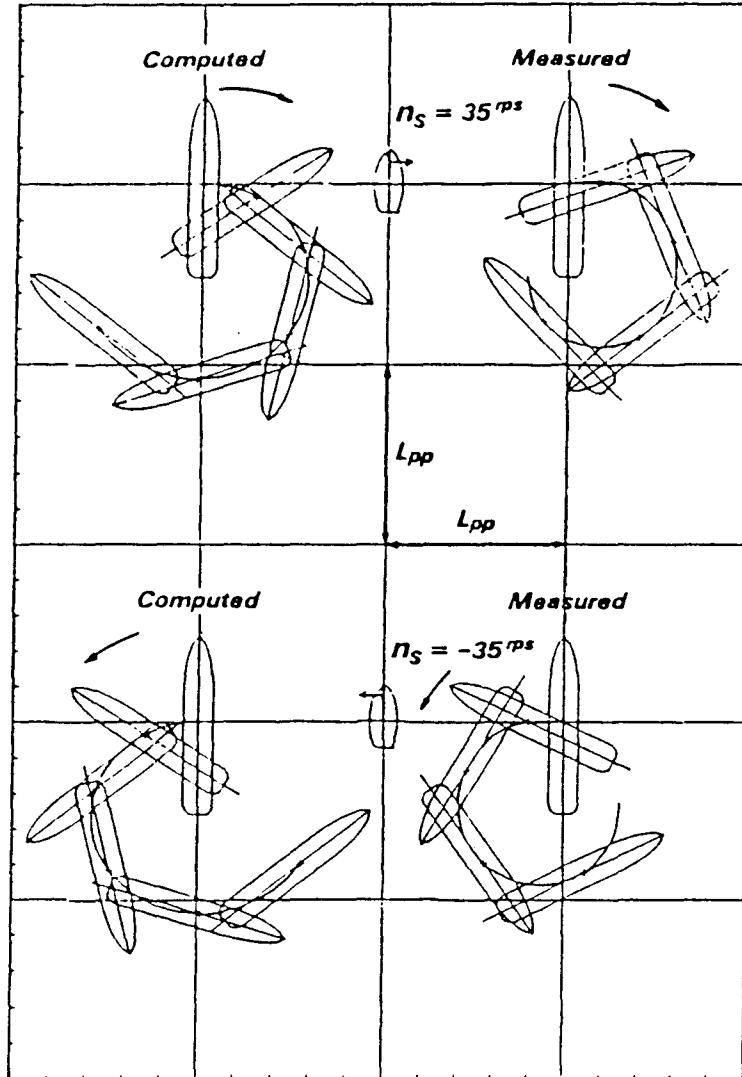


Abb. 7.13: Vergleich der rechnerischen Ergebnisse mit den Modellversuchsergebnissen für ein LNGC Modell. Drehkreisbewegungen bei Benutzung eines Bugquerstrahlers mit geringer Anfangsgeschwindigkeit von KOBAYASHI (1987)

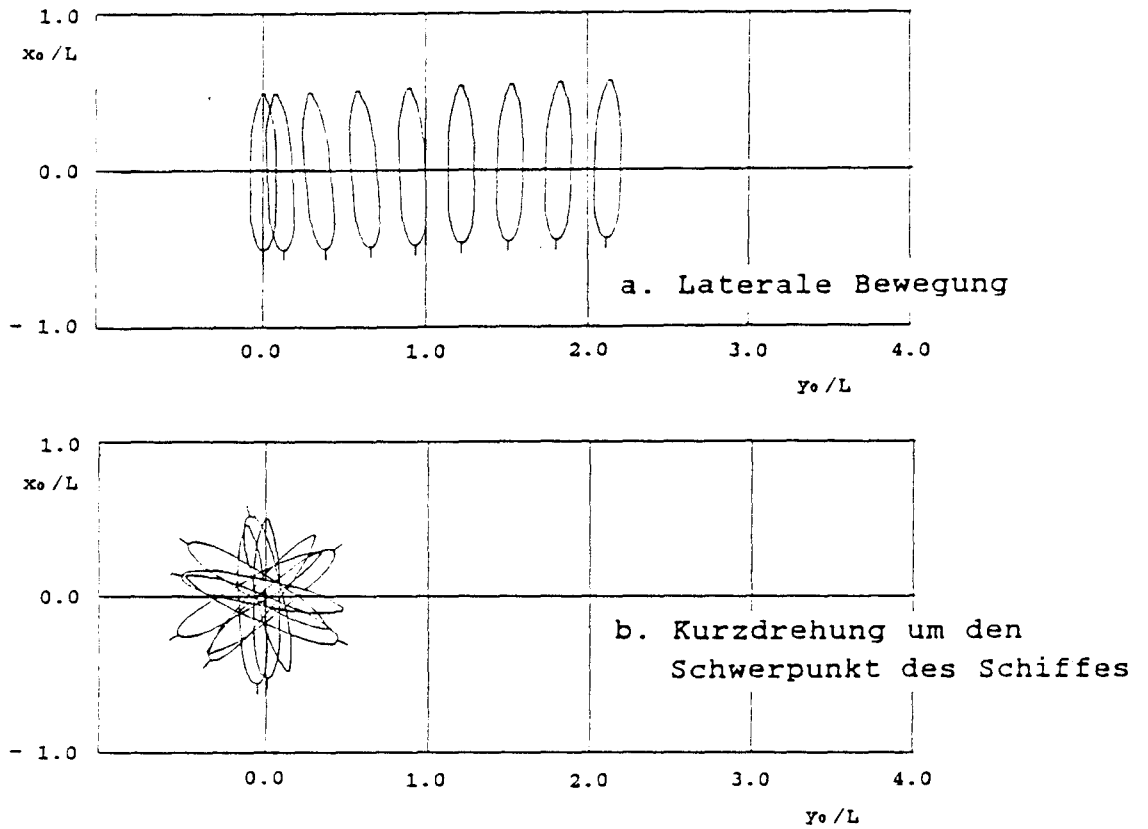
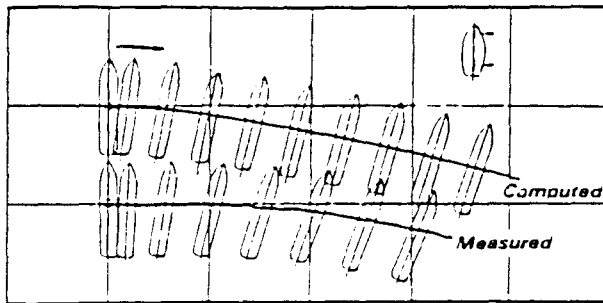
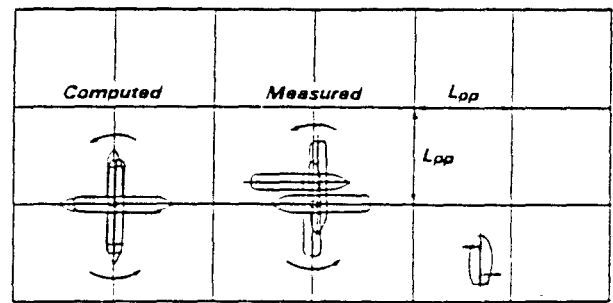


Abb. 7.14: Benutzung eines Bug- und eines Heckquerstrahlers



a. Laterale Bewegung



b. Kurzdrehung um den Schwerpunkt des Schiffes

Abb. 7.15: Vergleich der rechnerischen Ergebnisse mit den Modellversuchsergebnissen für ein Schiffmodell bei Benutzung eines Bug- und eines Heckquerstrahlers von KOBAYASHI (1987)

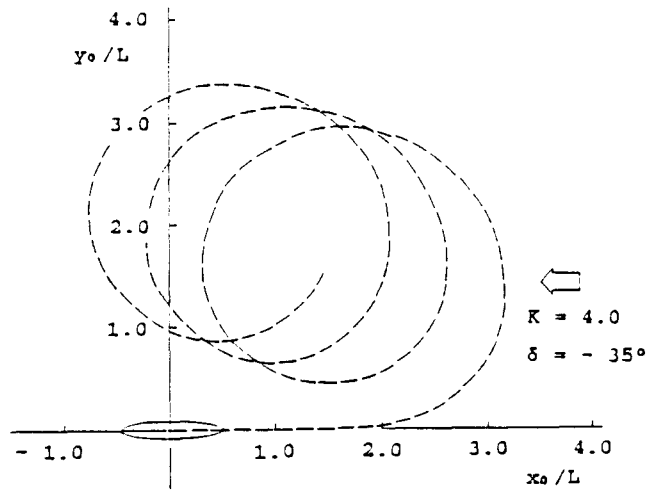


Abb. 7.16(a) : Drehkreisbewegung in Wind $K = 4.0$

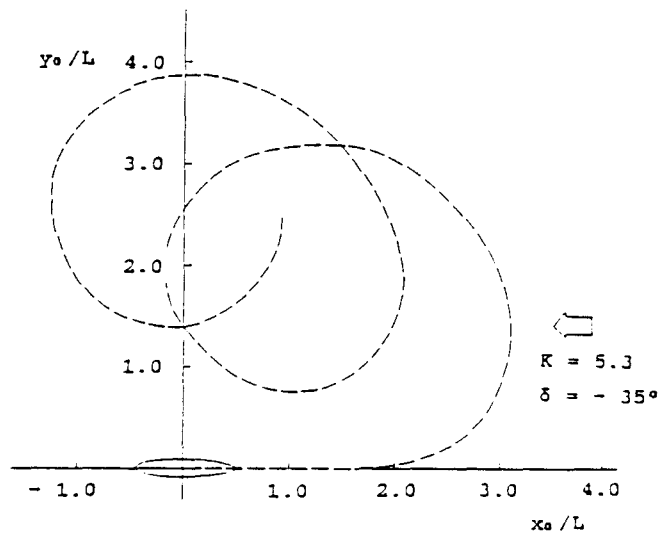


Abb. 7.16(b) : Drehkreisbewegung in Wind $K = 5.3$

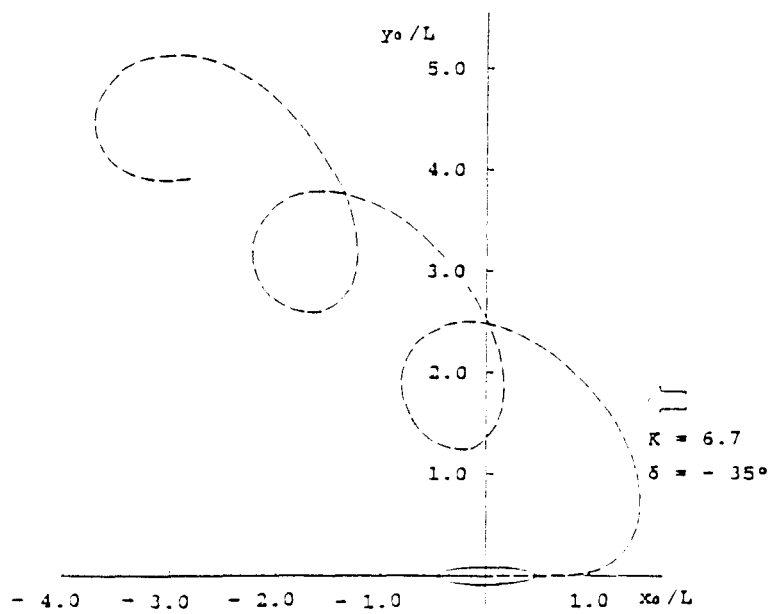


Abb. 7.16(c) : Drehkreisbewegung in Wind $K = 6.7$

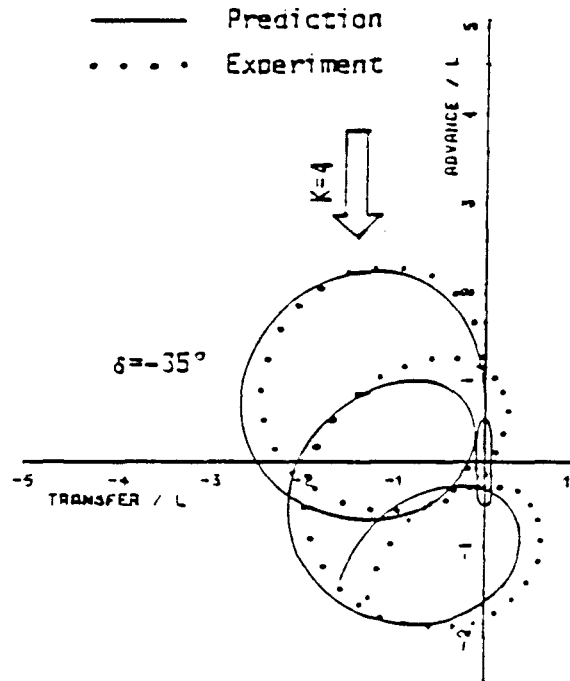
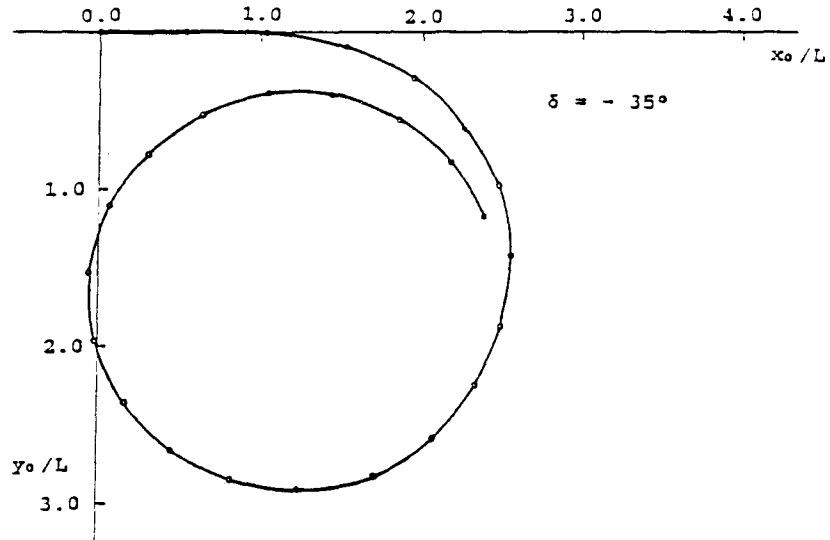
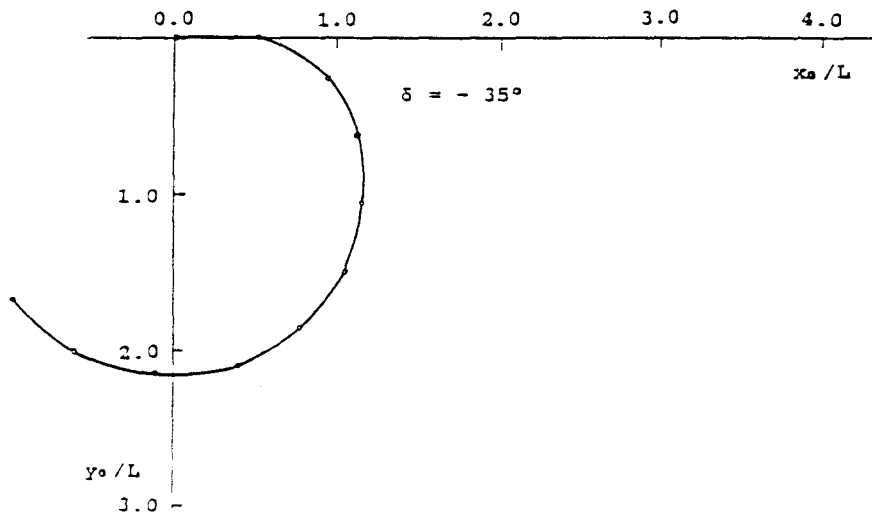


Abb. 7.17:

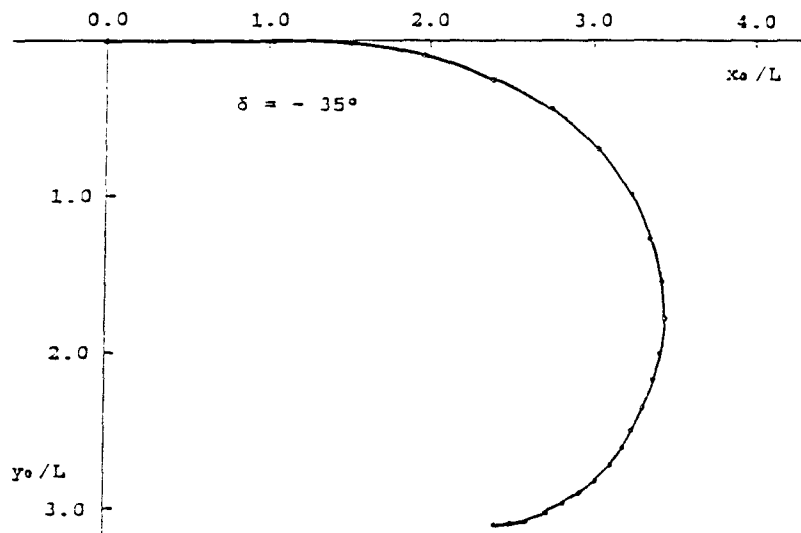
Drehkreisbewegung in Wind nach HIRANO (1987)



a. Konventionelle Drehkreisbewegung



b. Beschleunigte Drehkreisbewegung



c. Verzögerte Drehkreisbewegung

Abb. 7.18: Drei verschiedenen Zustände der Drehkreisbewegung des Tankers Tokyo-Maru

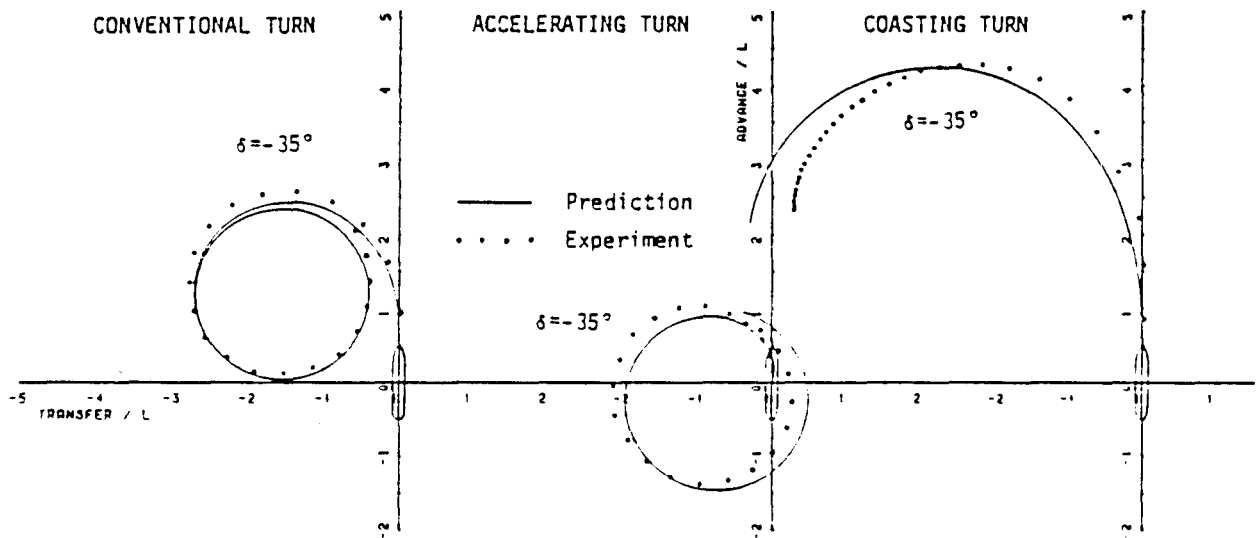


Abb. 7.19: Drei verschiedenen Zustände der Drehkreisbewegung eines LNGC Modells nach HIRANO (1987)