

**Rechnerische Simulation
der Schiffsbewegung beim Manövrieren
unter besonderer Berücksichtigung
der Abhängigkeit von der Wassertiefe**

Vom Fachbereich Maschinenbau der
Gerhard-Mercator-Universität - Gesamthochschule Duisburg
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Andreas Gronarz

aus

Homburg (Niederrhein)

Referent: Prof. Dr. Ing. S.D. Sharma

Korreferent: Prof. Dr. Ing. M. Vantorre

Tag der mündlichen Prüfung: 11.09.1997

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau, e.V. in Duisburg. In den vergangenen Jahren hatte ich Gelegenheit, mich intensiv mit der Planar-Motion-Technologie und der Thematik der Manövriersimulation auseinanderzusetzen. Während der Bearbeitung verschiedener Forschungsvorhaben konnte ich mir die Kenntnisse und das Wissen aneignen, das die Grundlage für die Erstellung der vorliegenden Dissertation bildete.

Mein Dank gebührt dem ehemaligen Direktor, Prof. Dr.-Ing. H. H. Heuser und dem jetzigen Institutsleiter, Prof. Dr.-Ing. E. Müller, die mir die Möglichkeit gaben, an diesem Thema zu arbeiten und über die reine Projektarbeit hinaus vertiefend für meine Dissertation tätig zu sein. Ebenso verbunden bin ich den Mitarbeitern der VBD, die mir mit Rat und Tat zur Seite standen, nicht zuletzt bei der Vorbereitung und Durchführung der umfangreichen Modellversuche, deren Ergebnisse ich hier weiter verarbeitet habe.

Besonderer Dank gilt meinem Referenten, Prof. Dr.-Ing. S. D. Sharma, der als anerkannter Spezialist auf diesem Gebiet viel Zeit und Mühe investiert hat, um der Arbeit den letzten Schliff zu geben.

Prof. Dr.-Ing. M. Vantorre aus Gent hat sich dankenswerterweise bereit gefunden, das Korreferat für dieses seltene Thema zu übernehmen, da er auf allen drei Gebieten (PMM-Technik, Simulation und Flachwasser) über weitreichende Erfahrungen verfügt.

Ebenfalls danken möchte ich den Mitarbeitern des Instituts für Schiffstechnik der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg für Ihre Kooperation und Hilfsbereitschaft, allen voran Dr.-Ing. Tao Jiang, der mich in den vergangenen Jahren äußerst fachkundig beraten und freundschaftlich motiviert hat.

Der wichtigste Dank gilt jedoch meiner Frau Helga und meinen Kindern Tim und Florian. Ohne deren Geduld und Bereitschaft zum Verzicht hätte ich nicht so viele lange Abende hintereinander mit der Abfassung dieser Arbeit verbringen können. Und ohne den Ansporn durch meine Frau hätte ich vielleicht das damals noch so ferne Ziel zu leicht aus den Augen verloren.

Abstract**Zusammenfassung**

0. Übersicht	1
1. Einleitung	2
1.1 Problemstellung	2
1.1.1 Einordnung des Begriffs "Manövrieren"	2
1.1.2 Sicherheitsaspekte beim Manövrieren	3
1.1.3 Wassertiefeneinfluß	4
1.2 Beurteilung der Manöviereigenschaften von Schiffen	5
1.2.1 Fahrversuche	5
1.2.2 Manövrierkenngößen	5
1.2.3 Randbedingungen	5
1.2.4 Simulationstechnik	6
2. Mathematische Modelle	8
2.1 Darstellung der Simulationsmodelle	8
2.1.1 Ebene Bewegungsgleichungen	8
2.1.2 Ansatz nach Abkowitz	11
2.1.3 Modularisierung des mathematischen Modells	21
2.1.3.1 Rumpfkkräfte	23
2.1.3.2 Propellerkräfte	26
2.1.3.3 Ruderkräfte	28
2.1.4 Modularisierung im 4-Quadranten-Modell	37
2.1.4.1 Strömungskräfte am Schiffskörper	38
2.1.4.2 Propellerkräfte	40
2.1.4.3 Ruderkräfte	40
2.2 Einfluß der begrenzten Wassertiefe	41
2.2.1 Allgemeine Betrachtung	42
2.2.1.1 Definitionen und Darstellungsmöglichkeiten	42
2.2.1.2 Physikalische Beschreibung	43
2.2.2 Ansätze für die Bewegungsgleichungen	45
2.2.2.1 Zusatzwirkungen	46
2.2.2.2 Wassertiefenabhängige Koeffizienten	47
2.2.2.3 Zusatzterme für jeden Koeffizienten	47

3. Identifikation der Koeffizienten	50
3.1 Kraftmessungen an gefesselten Modellen	50
3.1.1 Ziele	50
3.1.2 Statische Versuche	51
3.1.3 Dynamische Versuche	53
3.1.4 Fehlerbetrachtung	55
3.2 Frei gefahrene Modellversuche	57
3.2.1 Meßgrößen und -probleme	57
3.2.2 Systemidentifikationen	58
3.3 Großversuche	59
3.3.1 Meßgrößen und -probleme	59
3.4 Theoretische Berechnungsverfahren	61
3.4.1 Finite-Volumen-Verfahren	61
3.4.1.1 Testrechnungen	62
3.4.1.2 Durchgeführte Berechnungen	72
3.4.1.3 Diskussion der Ergebnisse	77
3.4.2 Paneel-Verfahren	84
3.4.2.1 Durchgeführte Berechnungen	84
3.4.2.2 Diskussion der Ergebnisse	87
4. Simulationen mit Berücksichtigung des Flachwassereinflusses	91
4.1 Grundlagen des Programmablaufs	91
4.1.1 Einzelsimulationen	93
4.1.2 Ansatz durch hydrodynamische Zusatzwirkungen	93
4.1.3 Interpolation der hydrodynamischen Kräfte	94
4.1.4 Potenzdarstellung für die hydrodynamischen Koeffizienten	95
4.1.5 Anwendung des Potenzansatzes auf das 4-Quadranten-Modell	101
4.2 Anwendung in der Simulation	103
4.2.1 Instationäre und stationäre Phasen des Manövers	105
4.2.2 Nichtlineares Verhalten	108
4.2.3 Simulation von speziellen Versuchen	109
4.3 Analyse der Simulationsrechnungen	112
4.3.1 Darstellung des mathematischen Modells	113
4.3.2 Kräfte im Drehkreis	117
4.3.3 Kräfte im Z-Manöver	120
4.3.4 Weitergehende Analyse	123

5	Vergleichsrechnungen nach den verschiedenen Verfahren	126
5.1	Beschreibung des Beispielschiffes	126
5.2	Simulationsrechnungen	127
5.2.1	Einzelsimulationen	127
5.2.2	Interpolation der Kräfte	130
5.2.3	Potenzdarstellung für die Koeffizienten	133
5.3	Gegenüberstellung der Verfahren	134
6	Anwendungen	141
6.1	Simulationsziele	141
6.1.1	Umgebungsmodellierung	141
6.1.2	Mathematische Modellierung	142
6.2	Anwendung des Ansatzes für die Wassertiefe	143
6.2.1	Hydrodynamische Einflußgrößen	145
6.2.1.1	Starker Flachwassereinfluß	145
6.2.1.2	Schwacher Flachwassereinfluß	147
6.2.2	Beispiele	149
6.2.2.1	Numerische Darstellung	150
6.2.2.2	Graphische Darstellung	155
6.2.2.3	Vereinfachungen	159
7	Schlußfolgerungen und Ausblick	165
Anhang A :	Symbolverzeichnis	
Anhang B :	Literaturverzeichnis	
Anhang C :	Tabellenverzeichnis	
Anhang D :	Abbildungsverzeichnis	
Anhang E :	Bewegungsgleichungen	
Anhang F :	Eingabedaten und Koeffizienten	

Abstract

The methods nowadays used for the simulation of ship manoeuvres are based on the equations of motion, which can be derived from the center-of-mass law and the principle of angular momentum. In this work three different approaches for the formulation of the external forces and moments are *used*.

The hydrodynamic coefficients of these mathematical models have a significant dependency of the water depth. For the derivation of the coefficients numerous model tests have been carried out at the VBD. Further on modern computational methods were used the RANSE-solver PHOENICS for the calculation of the oblique flow case and the potential flow code WAMIT for the calculation of hydrodynamic masses and moments of inertia. It could be found, that some coefficients can be computed with good results, but for the determination of all values for a simulation still model tests are needed.

In order to describe the alteration of the ships motion with decreasing water depth different approaches were investigated. Within the simulation the best results can be achieved using the "formulation of a dependency of each coefficient of the mathematical model from the water depth". The motions calculated with this method are very close to those simulated with a set of coefficients derived for a single water depth. The formulation of an exponential equation build up of a constant term and a term describing the dependency from the water depth

$$f = \underbrace{c_0}_{\text{deep water}} + \underbrace{c_n \cdot (T/h)^n}_{\text{shallow water correction}} \quad \begin{array}{l} T = \text{draught} \\ h = \text{depth} \end{array}$$

was found to be the most appropriate way to follow the alterations of a coefficient. Using this formula the dependency from the water depth is expressed by only three parameters: the base value, the shallow water value and the exponent.

The application of the exponential function is demonstrated using sets of coefficients from former manoeuvring investigations and it is tested by simulations with the different mathematical models. In this work a simple and in easy usable approach for the consideration of the water depth in the manoeuvring simulation is presented.

Zusammenfassung

Die heute übliche Rechnersimulation von Schiffsmanövern beruht auf der Integration von aus dem Schwerpunkts- und Drallsatz abgeleiteten Bewegungsgleichungen. Die darin maßgeblich vorkommenden hydrodynamischen Kräfte und Momente wurden in dieser Arbeit nach drei verschiedenen Ansätzen modelliert.

Die Koeffizienten dieser mathematischen Modelle hängen stark von der Wassertiefe ab. Zur Bestimmung dieser Beiwerte wurden in der VBD zahlreiche Modellversuche durchgeführt. Darüber hinaus wurden moderne Rechenverfahren verwendet, der RANSE-Löser PHOENICS zur Berechnung der Kräfte und Momente bei Schräganströmung und das potentialtheoretische Programm WAMIT zur Bestimmung der hydrodynamischen Massen und Trägheiten. Es zeigt sich, daß manche Koeffizienten durch CFD gut berechnet werden können, aber um alle für die Simulation erforderlichen Beiwerte zu ermitteln, ist man heute immer noch auf Modellversuche angewiesen.

Für die Beschreibung der Änderung des Bewegungsverhaltens bei geringer werdender Bodenfreiheit wurden verschiedene Ansätze untersucht. Bei der Simulation können die besten Ergebnisse unter Anwendung der *"Formulierung einer Abhängigkeit jedes einzelnen Koeffizienten des mathematischen Modells von der Wassertiefe"* erzielt werden. Dabei werden Berechnungen der Manöverkennwerte mit Koeffizientensätzen, die speziell für eine einzelne Wassertiefe ermittelt wurden, sehr gut angenähert. Die Formulierung durch eine Potenzfunktion, bestehend aus einem konstanten und einem wassertiefenabhängigen Anteil

$$f = \underbrace{c_0}_{\text{Tiefwasser}} + \underbrace{c_n \cdot (T/h)^n}_{\text{Flachwasserkorrektur}} \quad \begin{array}{l} T = \text{Tiefgang} \\ h = \text{Wassertiefe} \end{array}$$

erwies sich als geeignete Darstellung, um die Änderung eines Beiwertes zu erfassen. Bei Verwendung dieser Formulierung wird der hydrodynamische Koeffizient als Funktion der Wassertiefe durch nur drei Parameter beschrieben: den Basiswert, den Flachwasserwert sowie den Exponenten.

Anhand von Koeffizientensätzen durchgeführter Manövrieruntersuchungen wird die Anwendung des Potenzansatzes demonstriert und durch vergleichende Simulationsrechnungen mit verschiedenen mathematischen Modellen belegt.

Übersicht

Durch *mathematische Modelle* kann das Bewegungsverhalten von Schiffen analytisch beschrieben werden. Aus den Newton'schen Bewegungsgleichungen wird die Darstellung der hydrodynamischen Kräfte in Abhängigkeit von den Bewegungsgrößen abgeleitet. Dabei werden drei unterschiedliche Ansätze vorgestellt und im Detail beschrieben. Der wichtige Parameter "Wassertiefe" wird diskutiert und verschiedene Ansätze für die Berücksichtigung im mathematischen Modell vorgestellt.

Im dritten Kapitel werden verschiedene Methoden zur *Identifikation der Koeffizienten* für die analytische Beschreibung der Schiffsbewegungen beschrieben. Dazu zählen Kraftmessungen an gefesselten Modellen oder frei gefahrene Manövrierversuche im Modellmaßstab und in Großausführung. Die Möglichkeit der theoretischen Berechnung einzelner Beiwerte wird anhand von zwei Rechenverfahren vorgestellt. Diesem sehr aktuellen Teilgebiet wird durch genaue Beschreibung der Vorgehensweise sowie der Zwischen- und Endergebnisse ein breiter Raum gewidmet, da es noch nicht dem gesicherten Stand der Technik zugeordnet werden kann.

Aufbauend auf den Grundlagen der mathematischen Formulierung und der Ermittlung der erforderlichen Beiwerte für die Modelldarstellung wird die numerische *Simulation mit Berücksichtigung des Flachwassereinflusses* beschrieben. Hier wird der besondere Schwerpunkt auf die Einbringung der Wassertiefenabhängigkeit in die verschiedenen mathematischen Modelle gelegt. Der Ablauf der Berechnung von Schiffsmanövern wird in einzelnen Schritten dargestellt und analysiert.

An einem ausgewählten Beispiel wird die Simulation durch *Vergleichsrechnungen nach den verschiedenen Verfahren* durchgeführt, wobei sowohl die unterschiedlichen mathematischen Modelle als auch die vorgestellten Ansätze zur Berücksichtigung der Wassertiefe verwendet werden. In einem Vergleich werden die Unterschiede diskutiert und die Vor- bzw. Nachteile bewertet.

Unterschiedliche *Anwendungen* werden durch die verschiedenen Simulationsziele beschrieben. Durch eine Unterteilung in von einer Änderung der Wassertiefe besonders und nur gering beeinflusste Kräfte kann die numerische Simulation des Bewegungsverhaltens vereinfacht werden. Aus zurückliegenden Manövrierveruntersuchungen der VBD¹, bei denen die Wassertiefe den Hauptschwerpunkt darstellte, liegen umfangreiche Daten für verschiedene Schiffstypen vor. Mit diesen Beispielen wird die Anwendung des vorgestellten Ansatzes für die Berücksichtigung der Wassertiefe bei den hydrodynamischen Koeffizienten angewendet und die Ergebnisse diskutiert.

¹ Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V., Duisburg