

Identifikation der Koeffizienten

Die Bestimmung der hydrodynamischen Kräfte ist unabhängig vom mathematischen Modell. Die Bestimmung der einzelnen Koeffizienten dagegen ist stark abhängig vom gewählten Modell. Da die Koeffizientensätze insgesamt den gleichen physikalischen Vorgang modellieren, ist im Prinzip die Umrechnung von einem Koeffizientensatz zum anderen möglich. Die besonderen Schwerpunkte im Ansatz und in der Detaillierung der verschiedenen mathematischen Modelle lassen jedoch nur den problemlosen Übergang von der umfassenderen mathematischen Beschreibung zu der mit eingeschränktem Gültigkeitsbereich zu und nicht umgekehrt.

Eine bewährte Möglichkeit für Bestimmung der Koeffizienten ist der Planar-Motion-Versuch (Kraftmessung an gefesselten Modellen). Es ist aber auch möglich, die Daten aus frei gefahrenen Manövern in Modell- bzw. Großausführung oder aus theoretischen Berechnungsverfahren zu gewinnen. In diesem Kapitel werden die einzelnen Quellen erläutert und bewertet.

3.1 Kraftmessungen an gefesselten Modellen

3.1.1 Ziele

Zur Bestimmung der Koeffizienten der verschiedenen hier diskutierten mathematischen Modelle nach Abkowitz (2.24)-(2.26), dem modularen Ansatz (2.42) und dem 4-Quadranten-Modell (2.81) können Modellversuche durchgeführt werden. Dabei muß dem Modell eine genau definierte Bewegung aufgezwungen werden, die eine reine Abhängigkeit von der zu untersuchenden Einflußgröße aufweist. Dies gilt auch für die Untersuchung von Komponenten in modularen Modellen, wie z.B. den Ruderkräften in Abhängigkeit vom Ruderwinkel. Auf eine detaillierte Beschreibung von Aufbau und Durchführung der einzelnen Versuche soll hier verzichtet werden, siehe dazu [Gronarz, 1988, 1989, 1990, 1992].

Je nach Art der beeinflussenden Variable kann zwischen statischen und dynamischen Versuchen unterschieden werden. Die statischen Versuche zeichnen sich durch Messen der Kräfte im zeitlichen Mittel aus, da die Größen nur den normalen meß- und versuchstechnisch bedingten Schwankungen unterliegen. Bei den dynamischen Versuchen hingegen muß das Modell eine instationäre Bewegung ausführen, damit die beschleunigungsabhängigen hydrodynamischen Massen und Trägheiten ermittelt werden können. Das Resultat eines dynamischen Versuchs ist eine

Zeitreihe von Meßsignalen, die bei Bekanntsein der zeitlich veränderten Bewegungsvariablen in die Koeffizienten überführt werden kann.

3.1.2 Statische Versuche

Die Auflistung der beeinflussenden Bewegungs- und Steuervariablen in Tabelle 3-1 stellt die Bandbreite der stationären Versuche zusammen. Hierbei wird die Auswahl auf das modulare mathematische Modell beschränkt - für das 4-Quadranten-Modell und den Ansatz nach Abkowitz ist die Liste zu modifizieren bzw. zu reduzieren.

Versuchstyp	Bewegungs- bzw. Steuervariable	Koeffizient bzw. Konstante
Widerstandsversuch	u	$X_u, X_{u u }, X_{uuu}$
Propulsionsversuch	u, n	t
Nachstrommessung		w
Propellerfreifahrt	u	$K_T(J)$ bzw. $C_T^*(\mathbf{e})$
Ruderkraftmessungen	\mathbf{d}_R	$C_L(\mathbf{d}_R)$ und $C_D(\mathbf{d}_R)$
Schrägschleppversuch	\mathbf{b}	$X_{vv}, Y_v, Y_{v v }, N_v, N_{v v }$

Tab. 3-1

Die Widerstandskurve wurde nach ITTC ohne Formfaktor auf die Großausführung umgerechnet, sonst wurde keine Reynoldszahlkorrektur durchgeführt.

Bei einigen Versuchen (Ruderkraftmessungen, Schrägschleppversuch) fällt auf, daß die Längsgeschwindigkeit u nicht als beeinflussende Bewegungsvariable erwähnt ist. Dies deutet darauf hin, daß die zu ermittelnden Koeffizienten von der Schiffsgeschwindigkeit unabhängig sind. Für einen gewissen eingeschränkten Bereich Froude-Zahlen trifft dies auch zu, wie in Kapitel 2 bei der dimensionslosen Darstellung der Kräfte (Gl. 2.47) erläutert wurde. Gerade bei den Schrägschleppversuchen jedoch, bei denen für größere Driftwinkel beachtliche Wirbel im Nachlauf erzeugt werden, kann diese Annahme nicht mehr gelten. Dies wird auch durch die sich bei größeren Werten \mathbf{b} einstellende tiefere Absenkung belegt. Wie in 2.2.1.2 schon dargestellt, ist hierfür die bei breiterer Versperrung beschleunigte Strömung unter dem Schiff verantwortlich zu machen. Hinsichtlich des Geschwindigkeitsbereiches, der für Verdrängungsfahrzeuge üblich ist, reicht der Ansatz der Proportionalität zum Quadrat der Geschwindigkeit jedoch aus, wie in Abb. 3-1 dargestellt ist. Hier ist für verschiedene Werte V die dimensionslosen Seitenkraft $Y(\mathbf{b})$ aufgetragen, und man

3. Identifikation der Koeffizienten

sieht deutlich die Unabhängigkeit der Kraft von der Schiffsgeschwindigkeit - besonders gut bei der größten Wassertiefe.

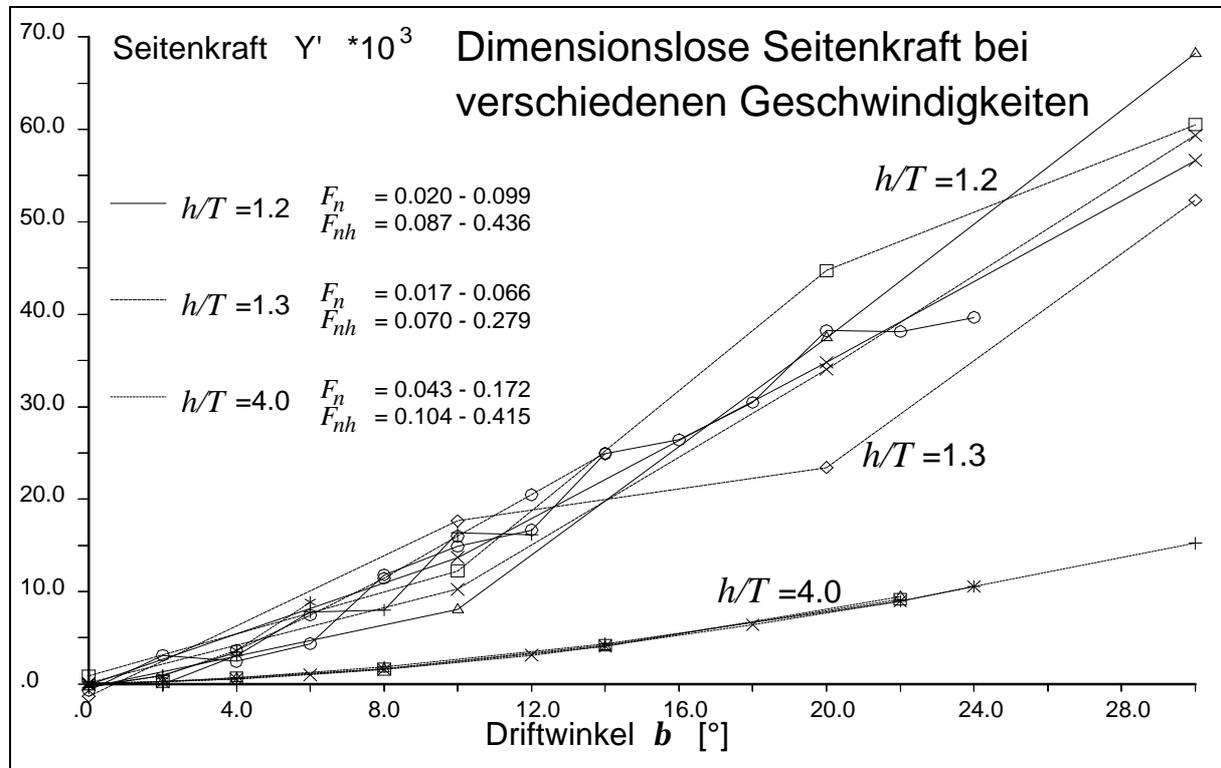


Abb. 3-1

Aus den gemessenen Kräften (die Abb. 3.1 zeigt ein typisches Beispiel), werden durch numerische Approximation die Koeffizienten für eine Funktion gewonnen, die die Abhängigkeit der Kraft von der untersuchten Bewegungsvariablen beschreibt. Üblicherweise wird dabei nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate vorgegangen, um für eine gewählte mathematische Darstellung des funktionalen Zusammenhangs die Beiwerte zu finden.

In bestimmten Fällen ist es sinnvoll, nicht alle Beiwerte einer Funktion - wie z.B. $y = a_1 \cdot x + a_3 \cdot x^3$ - in einem Rechengang zu bestimmen, da in diesem Fall die beiden Koeffizienten gleich gewichtet werden. Man kann den linearen Anteil durch a_1 in einem vorlaufenden Schritt nur für kleine x bestimmen und von den Funktionswerten subtrahieren. Die zweite Regression behandelt dann nur den nichtlinearen Anteil und löst die Gleichung $(y - a_1 \cdot x) = a_3 \cdot x^3$. Ein Beispiel dafür ist in Abb. 2-8 im vorangegangenen Kapitel gegeben. Dabei ist die durchgezogene Kurve durch globale Approximation entstanden und die gestrichelte durch vorherige Bestimmung des linearen Anteils (Steigung im Bereich $x=0$).

3.1.3 Dynamische Versuche

Für die instationären Messungen wird der Planar-Motion-Mechanismus (PMM) eingesetzt. In vielen Fällen wird die Bewegung rein mechanisch erzeugt, d.h. durch eine spezielle Anordnung von Getrieben und Kurbeln wird eine periodische Bewegung erzeugt. Ein solches Gerät ist in der VBD verfügbar [Gronarz, 1986]. Mit ihm wurden die für diese Arbeit verwendeten Messungen durchgeführt. Es existieren auch Geräte, die computergesteuert und somit programmierbar sind und beliebige Bahnen vorgeben können, wie der CPMC der HSVA in Hamburg [Oltmann/Wolff, 1976]. Damit ist ein größerer Spielraum für die Erzeugung von Bewegungen und für die Identifikation von Koeffizienten gegeben. Die Abb. 3-2 gibt einen Überblick über die möglichen Bewegungsarten des PMM der VBD.

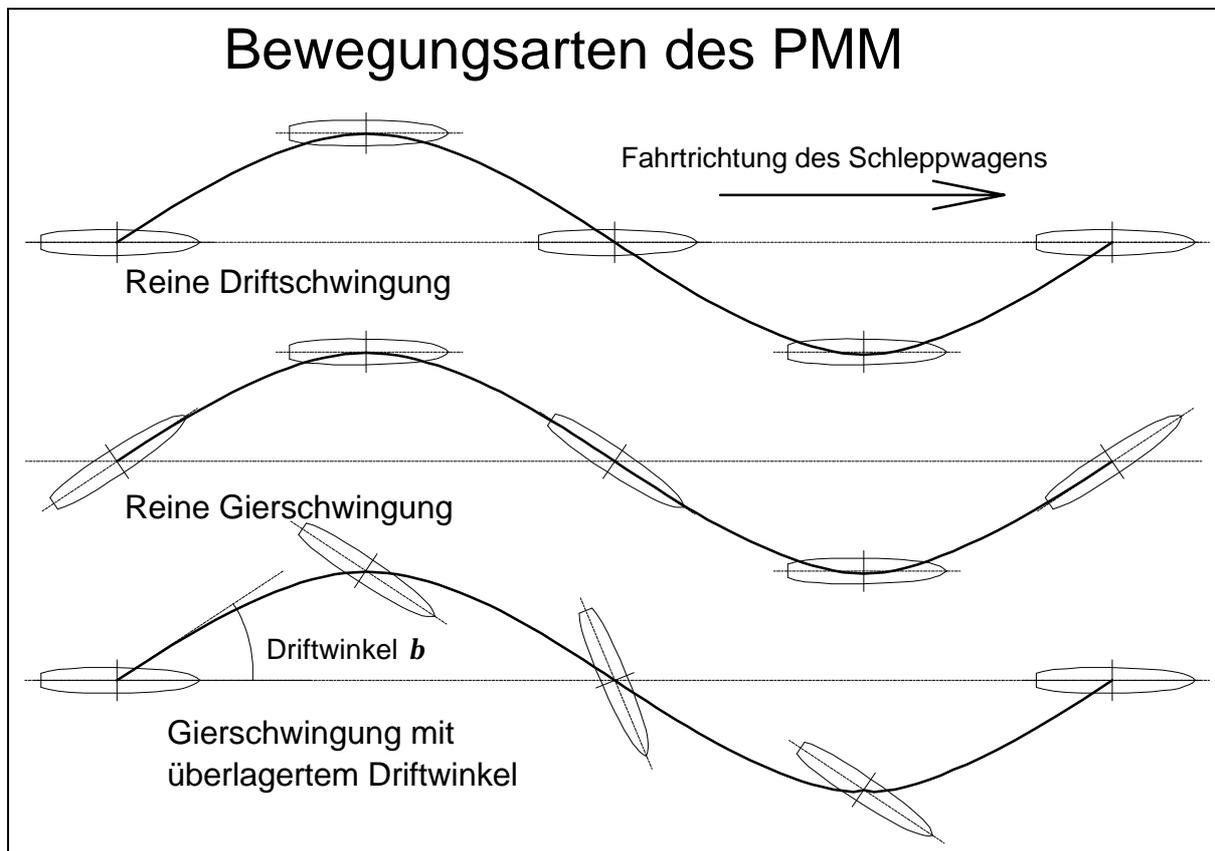


Abb. 3-2

In der Tabelle 3-2, die das Versuchsspektrum wiedergibt, sind nicht nur beschleunigungs-, sondern auch geschwindigkeitsabhängige Terme zu finden. Gerade beim Driftschwingversuch fällt auf, daß Koeffizienten, die schon in Tabelle 3-1 enthalten sind, aufgeführt werden. Es ist in der Tat möglich, mit dem PMM bei sich zeitlich ändernden Bewegungsvariablen u , v und r Informationen über Koeffizienten zu

3. Identifikation der Koeffizienten

erhalten, die Kräfte bei konstanten Geschwindigkeiten beschreiben. Dafür werden die Zeitsignale analysiert und die Maximalwerte für die Bewegungsvariablen aus den mechanischen Vorgaben mit den Werten der zerlegten Meßreihen verarbeitet. Genauere Informationen dazu finden sich in [Strøm-Tejsen/Chislett, 1966], [Booth/Bishop, 1973] und [Chislett/Smitt, 1973], [Gronarz, 1986].

Versuchstyp	Bewegungsvariable	Koeffizient
Längsschwingversuch (Surge)	\dot{u}	$X_{\dot{u}}$
Driftschwingversuch (Sway)	v, \dot{v}	$Y_{\dot{v}}, N_{\dot{v}}$ evtl. $Y_v, Y_{v v}, N_v, N_{v v}$
Gierschwingversuch (Yaw)	r, \dot{r}	$Y_{\dot{r}}, N_{\dot{r}}$ auch Y_r, Y_{rr}, N_r, N_{rr} und X_{rr}
kombinierter Drift- und Gierversuch (Yaw und Drift)	v, r \dot{v}, \dot{r}	X_{rr}, Y_{vrr}, Y_{rvv} und N_{vrr}, N_{rvv}

Tab. 3-2

Genau wie es für die Bestimmung der Koeffizienten zur Darstellung der Abhängigkeit von der Quergeschwindigkeit $Y_v, Y_{v|v}, N_v, N_{v|v}$ etc. die stationäre Alternative des Schrägschleppversuchs gibt, existiert eine Möglichkeit, die Koeffizienten für die Kräfte und Momente in Abhängigkeit von der Drehgeschwindigkeit zu bestimmen. Es handelt sich um das Rundlaufgerät (rotating arm), das in der VBD ebenfalls vorhanden ist. Sein Einsatz ist im Gegensatz zum Schrägschleppversuch begrenzt. Es lassen sich nur relativ große Drehgeschwindigkeiten realisieren, da der Radius begrenzt ist. Dies führt zwangsläufig zu Problemen bei der Ermittlung der linearen Anteile der Funktionen $Y(r)$ und $N(r)$.

In der Konstruktion des PMM liegen jedoch auch Grenzen hinsichtlich seines Bewegungsumfangs. Durch die Limitierung der Amplitude der Mechanik und durch die vorhandene Breite des Schlepptanks ist der PMM nur für die geringere bis mittlere Drehgeschwindigkeit geeignet. Insbesondere folgende Aspekte sind maßgeblich für die Entscheidung, den PMM dem Rundlaufgerät vorzuziehen.

1. Sowohl die Koeffizienten in Abhängigkeit von r als auch die von \dot{r} können während eines PMM-Versuchs bestimmt werden. Beim Rundlaufgerät ist eine Messung von \dot{r} nicht möglich.
2. Bei dem in der VBD vorhandenen PMM handelt es sich um eine Ausführung mit großer Amplitude ($\pm 0,75$ m). Mit ihm können sowohl lineare als auch nichtlineare Abhängigkeiten der Kräfte von r und \dot{r} ermittelt werden. Eine Erhöhung der

Schwingungsfrequenz ist eine weitere Möglichkeit, den Bewegungsumfang des PMM zu erweitern.

3.1.4 Fehlerbetrachtung

Die Gegenüberstellung von Sway- und Schrägschleppversuch ermöglicht den Vergleich der verschiedenen Meßverfahren. Es hat sich gezeigt, daß die Ermittlung der hydrodynamischen Koeffizienten beim direkten Verfahren (Schrägschlepp) zu deutlich genaueren Ergebnissen für die Koeffizienten führt. Dies hat seinen Grund in der Summe der systembedingten Ungenauigkeiten, mit denen die dynamischen Messungen behaftet sind.

Eine Fehlerbetrachtung anhand des problematischsten Falles, der kombinierten Koeffizienten X_{rr} , Y_{vrr} , Y_{rvv} und N_{vrr} , N_{rvv} , zeigt die Schwierigkeiten auf, die in abgestufter Folge für alle Versuche gültig sind. Die Kette der Verarbeitung für den Yaw-und-Drift-Versuch wird in den folgenden Absätzen anhand des Ablaufs von der physikalischen Messung bis hin zur letzten Verarbeitung der Daten analysiert.

1. In der Meßtechnik werden die Kräfte über Dehnungsmeßstreifen in Spannungssignale umgewandelt. Die durch lineare Regression ermittelten Skalierungsfaktoren sind einer Streuung unterworfen, die die Genauigkeit auf maximal 4 signifikante Stellen reduziert.
2. Das Spannungssignal wird bei dynamischen Messungen gefiltert, um Störungen durch Rauschen und externe Schwingungen zu reduzieren. Falsche Einstellung der Filter kann zum Durchdringen von Störpulsen führen, die den diskreten Meßwert verfälschen oder bei zu hoher Filtergrenzfrequenz zur Abdämpfung und damit Verfälschung des Signals führen.
3. Die Übergabe der gemessenen Spannungen erfolgt über Analog-Digital-Wandler, deren Genauigkeit von der maximalen Anzahl binärer Stellen im Zähler abhängt. Die durchschnittliche Auflösung kann mit 12 Bit angegeben werden. Dies führt zu einer Teilung des Meßbereichs von ± 10 V in 4096 Stufen von knapp 5 mV. Bei Signalen, die im Bereich von 500 mV liegen, kann eine falsche Einstellung des Meßverstärkers auf ± 10 V Maximalbereich die Auflösung um den Faktor 20 verschlechtern.

3. Identifikation der Koeffizienten

4. Unvermeidliche niederfrequente Schwingungen des Schleppwagens beeinflussen die Amplituden der Signale und führen selbst bei größerer Anzahl von durchgeführten Meßperioden zu statistisch bedingten Ungenauigkeiten der mittleren Amplituden.
5. Die dynamischen Signale der Kraftmeßglieder werden in die Sinus- und Kosinusanteile der erzeugenden Schwingung zerlegt, um so die geschwindigkeits- und beschleunigungsabhängigen Komponenten zu trennen. Fehler in der Synchronisation des PMM-Kontrollsignals mit den Zeitreihen der Kraftmeßglieder können zu Verschiebungen der Perioden und damit zu einem Fehler bei der Trennung der Komponenten führen.
6. Die Bestimmung der kombinierten Koeffizienten (Kopplungsterme) ist erst möglich, wenn die Kräfte, die durch die reine Drift- und die reine Drehbewegung hervorgerufen werden, schon bekannt sind. Die "reinen" Kräfte werden vom verarbeiteten Meßsignal abgezogen und die Restkräfte zur Approximation der gesuchten Koeffizienten verwendet. Da die Relation zwischen reinen und kombinierten Kräften im Bereich von unter 10:1 liegt, ist eine Verschlechterung der Genauigkeit um mindestens eine signifikante Stelle die Folge. Bei ungünstiger Summation von Fehlern kann dies dazu führen, daß die ermittelten Restkräfte in Abhängigkeit von den Variationsgrößen extrem schwanken und somit eine verlässliche Regression unmöglich machen.
7. Wie in 6. dargestellt, werden bei der Bildung der Differenz zwischen reinen Kräften und den im Yaw-und-Drift-Versuch gemessenen Gesamtwirkungen die schon bestimmten linearen und nichtlinearen Anteile in Abhängigkeit von v und r verwendet. Ungenauigkeiten bei diesen vorlaufenden Operationen haben direkten Einfluß auf die Bestimmung der Kopplungsterme. Falls die Bewegungsvariablen beim Yaw-und-Drift-Versuch nicht exakt erfaßt oder vorgegeben werden, sind die rechnerisch in Ansatz gebrachten Kräfte und Momente ungenau, und damit ist das Ergebnis aufgrund der Subtraktion in erhöhtem Maße mit Fehlern behaftet.

Fazit dieser Analyse ist, daß für eine erfolgreiche Bestimmung der hydrodynamischen Koeffizienten äußerste Sorgfalt bei den Modellversuchen und bei der weiteren Verarbeitung der Daten angezeigt ist. Da die Kette des Ablaufs nicht nur von einer Summation, sondern sogar von einer Vervielfachung von Fehlern bedroht ist, ist in der Praxis die Angabe von hydrodynamischen Koeffizienten mit mehr als drei signifikanten Stellen kaum möglich.

3.2 Frei gefahrene Modellversuche

Ein frei gefahrener Modellversuch unterscheidet sich von den bisher behandelten Versuchen durch die volle Bewegungsfreiheit des Modells. Durch Funkfernsteuerung und Meßwertrückübertragung über PCM-Funkstrecken wird das unter Eigenantrieb fahrende Modell untersucht.

3.2.1 Meßgrößen und -probleme

Es muß zwischen modellinternen und -externen Meßgrößen unterschieden werden. Im Modell können die aktuellen Zustandswerte von Steuerung und Antrieb sowie die über Trägheitsmeßsysteme erfaßbaren Größen aufgenommen werden. Aus Gründen der Praktikabilität ist es am sinnvollsten, diese Daten über Funkstrecken direkt dem zentralen Erfassungssystem zuzuführen. Außer der Ist-Ruderlage und der aktuellen Drehzahl werden Kurs und Drehgeschwindigkeit, die über einen Kreisel gemessen werden, übertragen. Diese Daten allein reichen jedoch für eine Beurteilung der Manövrierleistungen nicht aus.

Die externe Messung ist die Erfassung der Position und der Orientierung des Modells. (Diese zweifache Messung des Kurses dient der Kontrolle und auch der Synchronisation der zwei verschiedenen Systeme.) Verschiedene Methoden stehen für die Bahnvermessung zur Verfügung. In den meisten Fällen handelt es sich um berührungsfreie optische Systeme. Eine Ausnahme bildet dabei der CPMC der HSVA [Oltmann/Wolff, 1976], bei dem der Versuchsträger über einen Fühler dem Modell folgt und die Position und den Kurs aufzeichnet. Die optischen Systeme arbeiten nach dem Prinzip der indirekten Winkelmessung mittels eines Laserstrahls und rotierender Spiegel (SVA Potsdam) oder auf der Basis der direkten Messung des Winkels eines Lichtstrahls auf der Bildebene von Kameras (VBD). In der VBD wird seit neuestem eine elektronische Variante der Kameramethode verwendet, die auf der Basis von CCD-Arrays statt fotografischem Film die Winkel der einfallenden Strahlen mit hoher Präzision erfassen kann. Der Einsatz von Elektronik und sehr hochwertigen optischen Instrumenten führt zum einen zu hohen Datenraten und zum anderen zu genauen Meßergebnissen.

Die größte Schwierigkeit beim frei gefahrenen Modellversuch ist die genaue Definition der Anfangsbedingungen. Da ein Manöver aus dem stationären Zustand der Geradeausfahrt bei konstanter Geschwindigkeit begonnen werden soll, muß dieser

3. Identifikation der Koeffizienten

Zustand so gut wie möglich realisiert werden. Dazu ist das Modell frei geradeaus zu steuern, was mit ziemlichen Schwierigkeiten verbunden ist. Außerdem soll es eine definierte, konstante Geschwindigkeit besitzen. Dies ist durch Anschieben mit dem Schleppwagen gut erreichbar.

Bezüglich der Voraugeschwindigkeit ist folgende Maßstabsproblematik zu bedenken: Wegen des höheren Reibungsbeiwertes am Modell im Vergleich zur Großausführung sind im selbstangetriebenen Zustand weder die Propellerbelastung noch die Ruderwirkung genau dynamisch ähnlich.

Für die Erzielung einer beschleunigungsfreien Fahrt zu Beginn des Manövers ist im langen Schlepptank bei Z-Manövern genügend Vorlauf und die Möglichkeit der Geradföhrung durch den Schleppwagen gegeben. In einem Manövrierbecken mit deutlichen Platzbeschränkungen und Problemen der Föhrung des Modells hat man mit großen Schwierigkeiten bei der Einhaltung vorgegebener Randbedingungen zu rechnen.

Die Messung von Ort und Kurs des Modells ist relativ genau. Probleme tauchen jedoch bei der Bestimmung von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen auf. Die Differentiation der rohen Meßwerte föhrt zu einer Vervielfachung des "Rauschens", so daß eine Glättung unumgänglich ist. Die in einem zweiten Schritt erforderliche Differentiation der Geschwindigkeiten für die Berechnung der Beschleunigungen setzt besonders hohe Anforderungen an die Glättung, da die Bahnkurve straken muß, um die Krümmung, der im Zeitbereich die Beschleunigung entspricht, bestimmen zu können.

3.2.2 Systemidentifikationen

Die Methode, aus den Bahnen frei fahrender Modelle die Koeffizienten für die Kraftansätze der mathematischen Bewegungsmodelle zu bestimmen, wird als indirekte Systemidentifikation bezeichnet. Hierbei werden die Bewegungsdaten eines Manövrierversuchs (die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen) dem mathematischen Bewegungsmodell gegenübergestellt. Durch geeignete Algorithmen werden die Koeffizienten so berechnet, daß die Bewegung optimal wiedergeben werden kann. Hierbei sind einerseits die Auswahl der mathematischen Beschreibung und die zur Identifikation herangezogenen Manöver entscheidend für die Qualität der Ergebnisse. Andererseits ist es erforderlich, eine Zuordnung bestimmter Elemente des Rechenmodells zu bestimmten Phasen zu berücksichtigen und unter Umständen

den Weg über Teillösungen zu gehen mit dem Ziel einer brauchbaren Gesamtlösung für die Bewegungsgleichungen.

Werden zum Beispiel nur Drehkreisversuche zur Identifikation herangezogen, dann darf nicht erwartet werden, daß ein Z-Manöver mit einer gleichen Qualität simuliert werden kann, da die Instationarität beim Z-Manöver eine deutlich größere Rolle spielt als im Drehkreis, der ja bis auf die Einleitungsphase hauptsächlich aus einer stationären Bewegung besteht. Eine gute Kenntnis des Verhaltens der verschiedenen Koeffizienten in den verschiedenen Bewegungszuständen ist also unumgänglich, um die unterschiedliche Wichtigkeit der Beiwerte richtig bei der Identifikation berücksichtigen zu können.

Bisher war die Arbeit an diesem Teilgebiet in der VBD nicht möglich, da die Qualität der Bahnvermessung dies nicht zuließ. Die neue elektronisch-optische Bahnverfolgungsanlage dagegen bietet für die Zukunft die notwendigen Voraussetzungen für eine erfolgreiche Anwendung der indirekten Systemidentifikation.

3.3 Großversuche

Manövrierversuche in der Großausführung können ebenfalls zur Bestimmung der hydrodynamischen Koeffizienten herangezogen werden. Die Unterschiede zum Modellversuch werden im folgenden Abschnitt dargelegt.

3.3.1 Meßgrößen und -probleme

Der entscheidende Vorteil von Großversuchen liegt in der Unabhängigkeit von Maßstabseinflüssen. Die Umrechnung von Modellversuchen zur genauen Vorhersage des Bewegungsverhaltens stößt auf verschiedene Schwierigkeiten. Das Hauptproblem ist die Unmöglichkeit, im Modellversuch vollkommene dynamische Ähnlichkeit mit der Großausführung zu verwirklichen.

Die Untersuchungen mit Schiffsmodellen werden nach der Froude'schen Ähnlichkeit ausgeführt. Sie erlaubt eine bequeme Versuchsdurchführung und einfache Umrechnung der physikalischen Größen in Abhängigkeit vom Modellmaßstab. Das zweite für die Beschreibung der Schiffsumströmung relevante Ähnlichkeitsgesetz ist das nach Reynolds. Die Reynolds'sche Ähnlichkeitsbedingung wäre erfüllt, wenn es gelänge, die Versuchsbedingungen so einzustellen, daß die Reynoldszahl

$$R_n = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (3.1)$$

im Modellversuch mit der der Großausführung identisch ist. Dies ist jedoch praktisch nicht möglich, und schon gar nicht gleichzeitig mit der Froudeschen Ähnlichkeit. Die Reynoldszahl des Schiffsmodells ist gewöhnlich zwei Zehnerpotenzen niedriger als die der Großausführung. Die Nichteinhaltung der Reynolds'schen Ähnlichkeit führt zu Problemen bei der Übertragung. Diese reichen von den Schiffskräften über die Propellerkräfte bis hin zum Ruder, das im Modell infolge der Zähigkeitseffekte in einer anderen Strömungsumgebung befindet als in der Großausführung. Da die von der unterschiedlichen Reynoldszahl abhängigen Einflüsse insgesamt die Manövrierbarkeit sowohl in der einen als auch in der anderen Richtung beeinflussen, ist es schwer, eine einfache Korrektur vorzunehmen, und die Korrelation bleibt immer mit Problemen behaftet.

Die eigentliche Schwierigkeit, aus dem Großversuch brauchbare Daten für die Bestimmung hydrodynamischer Koeffizienten durch die indirekte Systemidentifikation zu erhalten, liegt in der ungenauen Meßtechnik und in den unsicheren Randbedingungen.

Die erforderlichen Daten über den Ort des Schiffes, aus dem sich durch Differentiation die Geschwindigkeiten und in einem weiteren Schritt die Beschleunigungen gewinnen lassen, können nur über moderne Navigationssysteme in der erforderlichen Genauigkeit gewonnen werden. Das beste zur Zeit für den kommerziellen Bereich verfügbare System ist "Differential GPS", welches Genauigkeiten im Bereich von unter 10 m liefern kann, sofern sich das Schiff in Reichweite eines entsprechenden Korrektursenders befindet. Dennoch kommt es auch bei diesem System durch die noch eingeschränkte Verfügbarkeit der Satelliten zu gelegentlichen Sprüngen im angegebenen Ort, so daß nachträgliche Verschiebungen der gemessenen Positionen erforderlich werden können.

Die Randbedingungen, unter denen der Manövrierversuch mit dem originalgroßen Schiff durchgeführt wird, müssen genau protokolliert werden, um später entsprechende Korrekturen vornehmen zu können. Das Problem hierbei ist jedoch schon die Messung der Umwelteinflüsse wie Wind, Strömung, Seegang oder Wassertiefe. Da die Meßplattform "Schiff" selbst eine Bewegung im Wasser ausführt, kann die Strömung z.B. nur als Differenz zwischen der globalen Lageveränderung, die mit dem Navigationssystem gemessen wurde, und der Relativbewegung des Schiffes im

Wasser bestimmt werden. Diese jedoch ist kaum genau meßbar, da alle Sensoren vom Strömungsfeld um das Schiff selbst beeinflusst werden.

Weitere Schwierigkeiten bei den Randbedingungen sind die mangelnde Reproduzierbarkeit der Versuche und die nicht vorhersehbaren Schwankungen des Wetters. Im allgemeinen können nur grobe Bereiche angegeben werden, die die Umweltverhältnisse zur Zeit des Experiments eingrenzen. Nicht zu vernachlässigende Aspekte sind schließlich die Kosten und die Probleme der Verfügbarkeit, die mit einem Großversuch verbunden sind. All diese Gründe sprechen gegen diese Untersuchungen, auch wenn sie die einzige Möglichkeit sind, Aussagen über das Manövrierverhalten des originalgroßen Schiffes unabhängig vom Modellmaßstab zu gewinnen.

3.4 Theoretische Berechnungsverfahren

Neben dem Experiment besteht heute auch die Möglichkeit, auf rein rechnerischem Wege zu brauchbaren Daten für die numerische Simulation zu kommen. Es muß jedoch bedacht werden, daß bei allen theoretischen Verfahren nicht nur die Beschreibung der komplexen physikalischen Realität durch partielle Differentialgleichungen eine Näherung darstellt, sondern darüber hinaus analytische oder numerische Lösungen derselben zumeist nur unter drastischen mathematischen Vereinfachungen gelingen.

3.4.1 Finite-Volumen-Verfahren

Die Verfahren nach der Methode der finiten Volumen basieren auf der Diskretisierung des Strömungsraumes in eine Vielzahl einzelner Kontrollvolumen. In vielen Fällen handelt es sich um schiefwinklige Verzerrungen von Quadern. Diese füllen das gesamte betrachtete Strömungsgebiet aus. Für jedes finite Volumen werden die Strömungsgleichungen gelöst und ein Ausgleich der Bilanzen von Masse und Impuls (Fluß) iterativ berechnet. Je nach Art des Rechenprogramms können die Gleichungen einen mehr oder weniger großen Umfang annehmen. Angefangen von der Formulierung der reinen Potentialströmung über die Hinzufügung viskoser Einflüsse, die Berücksichtigung der Turbulenz, der Temperatur, der Kompressibilität bis hin zu Mehrphasenströmungen können die Berechnungen mit den Navier-Stokes-Gleichungen durch Hinzufügen bestimmter Terme und Bedingungen für jedes fluid-dynamische Problem angepaßt werden.

3.4.1.1 Testrechnungen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das in der VBD vorhandene Programmsystem PHOENICS [Spalding/Pantakar, 1974] [Spalding, 1991] für die Untersuchung der Schräganströmung eines Schiffes auf flachem Wasser verwendet. Die Berechnungen verwenden die Ansätze für eine viskose, inkompressible und temperaturunabhängige Einphasenströmung, um die Verteilung der Geschwindigkeit und des Drucks im Strömungsfeld zu bestimmen. Zur Lösung der Gleichungen wird der sogenannte SIMPLE-Algorithmus verwendet. Bei den Berechnungen wurde die Turbulenz ausgeschaltet. Die Reynoldszahl betrug ca. $8 \cdot 10^6$.

Bisher wurde mit RANSE-Lösern (Reynolds Averaged Navier Stokes Equations) meistens die Geradeausfahrt auf tiefem Wasser für symmetrische Schiffe berechnet. In dieser Arbeit wird das Verfahren auf die Schräganströmung auf flachem Wasser angewendet. Dazu wird das Strömungsgebiet auf beiden Seiten des Schiffskörpers dargestellt. Das Gitter ist dabei starr. Vor den Berechnungen für einen realen Schiffskörper wurde es einer Reihe von Tests an einem sehr einfachen Beispiel unterzogen, um die Einflüsse verschiedener Parameter auf die Lösung zu untersuchen. Dazu wurde ein idealisierter durch mathematische Formeln exakt beschriebener Körper generiert, das Strömungsfeld um ihn berechnet und in allen Details untersucht.

Die Randbedingungen für den Strömungszustand sind:

- 1) Haftbedingung am Schiffskörper
- 2) Ungestörte Zuströmung und freie Abströmung
- 3) Wasseroberfläche und Boden horizontal und reibungsfrei

Der Boden des Testschiffs ist eben und die Seitenwände senkrecht. Die Wasserlinien haben die Form von quadratischen Parabeln. Die größte Breite liegt bei 60% der Länge hinter dem Vorsteven. Die Kimm ist ein Viertelkreis, dessen Radius 10% der lokalen Breite beträgt. Genau bei der Hälfte des Kimmkreises findet der Übergang vom Boden zur Seite statt. Zur Generierung der Paneele auf der Körperoberfläche wurde ein Programm geschrieben, welches die Knoten auf der Außenhaut in Abhängigkeit von den Eingabeparametern berechnet. Die Abbildung 3-3 zeigt eine räumliche Ansicht des Testschiffs mit 15 Zellen in der Länge, 5 Zellen auf der halben Breite und 5 Zellen in der Höhe.

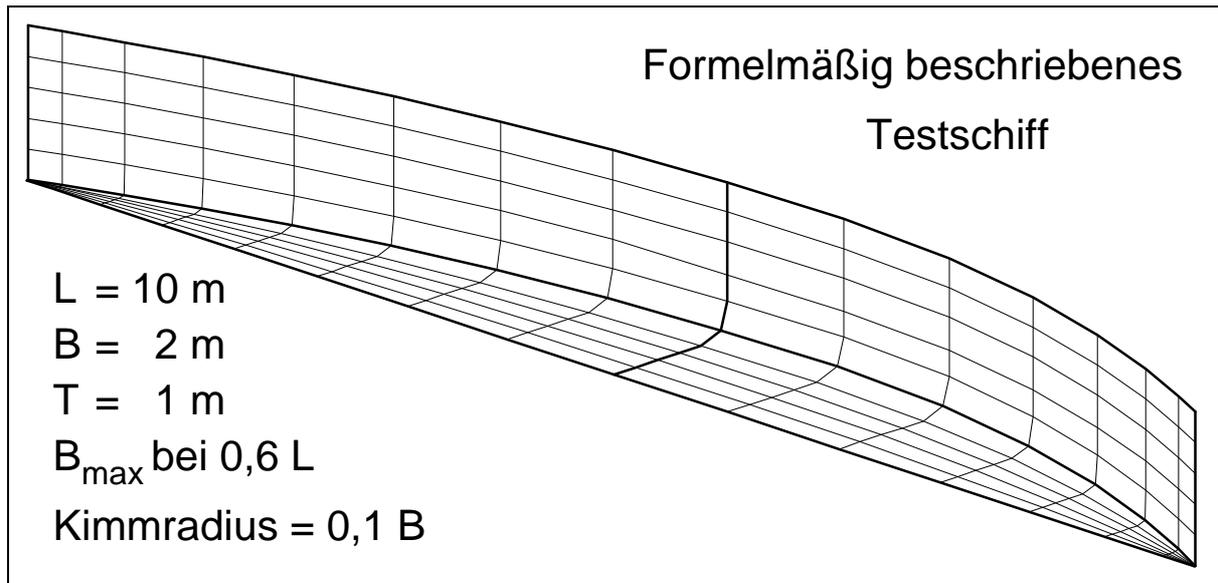


Abb. 3-3

Der gesamte durchströmte Raum erstreckt sich über 30 m mit 35 Zellen (10 vor, 15 auf und 10 hinter dem Schiff) in Längsrichtung und 20 m mit 30 Zellen (10 an Backbord, 10 auf dem Schiff und 10 an Steuerbord) in der Breite. Das Verhältnis h/T wurde zu 1.3 festgelegt und der vertikale Bereich in 10 Schichten (5 für das Wasser unter dem Schiff und 5 für den Körper) unterteilt. Die gesamte Zellenzahl beträgt 10500.

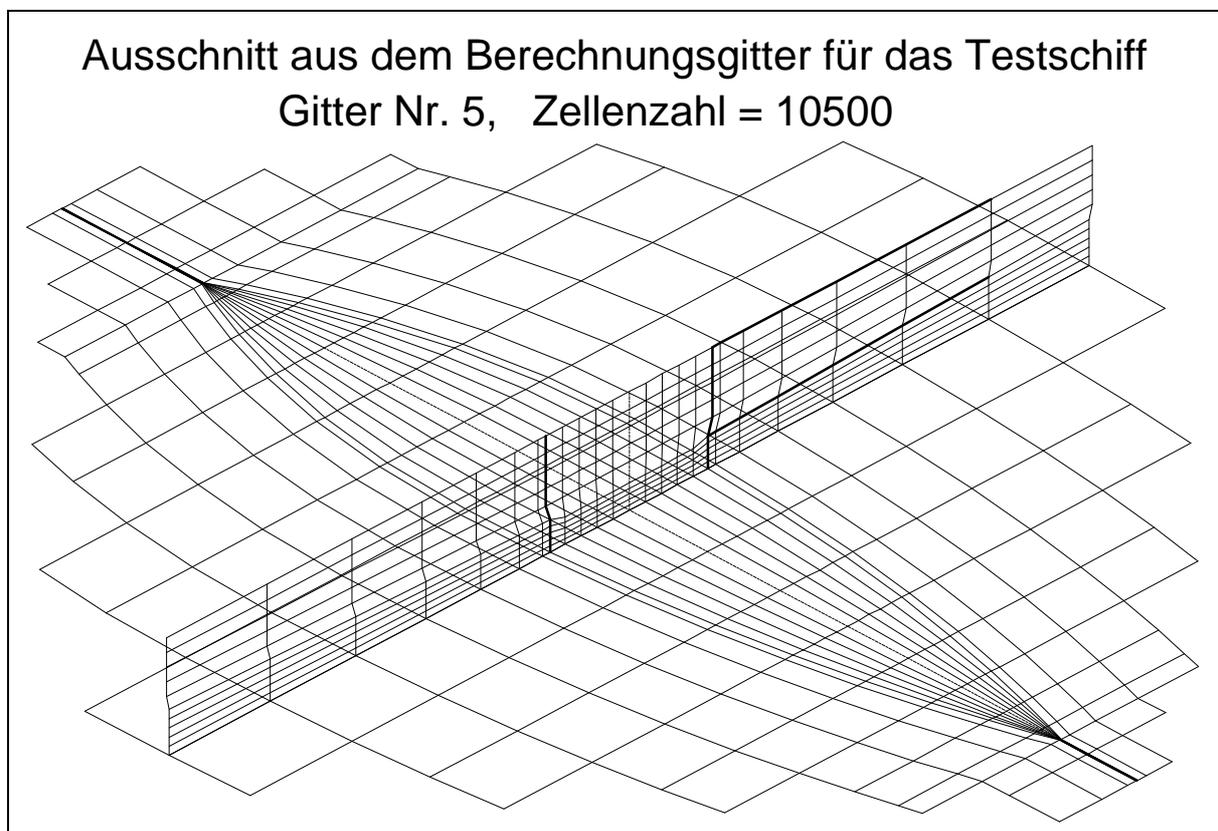


Abb. 3-4

3. Identifikation der Koeffizienten

Die Abbildung 3-4 gibt einen Einblick in das Rechengitter. Genauere Ausführungen zu seiner Struktur werden im nächsten Kapitel (3.4.1.2) gegeben.

Es wurden zwei verschiedene Parameter variiert, um das Lösungsverhalten des Programms zu untersuchen:

- A** Veränderung der Zellenzahl und
- B** Anzahl der Iterationsschritte

In allen Fällen wurden die Randbedingungen für den Strömungszustand konstant gehalten. An der Backbordseite und am Bug fließt das Wasser mit 1 m/s und einem Winkel von 30° gegen die Längsachse in den Berechnungsraum ein.

- A** Für eine Untersuchung des Einflusses der Feinheit der Diskretisierung wurden die Intervalle des Berechnungsraums in Abstufungen (Tab. 3-3) gröber bzw. feiner aufgelöst. Bei konstanter Anzahl von 500 Iterationsschritten (sweeps) wurde dann der Strömungszustand für diese 10 Gitter bestimmt.

Gitter Nr.	X Vor dem Schiff	X Schiffskörper	X Hinter dem Schiff	Summe X	Y Backbord	Y Schiffskörper	Y Steuerbord	Summe Y	Z Schiffskörper	Z Flottwasser	Summe Z	Zellenzahl	Knotenzahl
1	2	3	2	7	2	2	2	6	1	1	2	84	168
2	4	6	4	14	4	4	4	12	2	2	4	672	975
3	6	9	6	21	6	6	6	18	3	3	6	2268	2926
4	8	12	8	28	8	8	8	24	4	4	8	5376	6525
5	10	15	10	35	10	10	10	30	5	5	10	10500	12276
6	12	18	12	42	12	12	12	36	6	6	12	18144	20683
7	14	21	14	49	14	14	14	42	7	7	14	28812	32250
8	16	24	16	56	16	16	16	48	8	8	16	43008	47481
9	18	27	18	63	18	18	18	54	9	9	18	61236	66880
10	20	30	20	70	20	20	20	60	10	10	20	84000	90951

Tab. 3-3

Der Verlauf der Rechnung wird an den Residuen deutlich. Sie sind ein Maß für die Konvergenz des Rechengangs. In Abb. 3-5 sind diese Kenngrößen für eine Geschwindigkeit und den Druck dargestellt. Es wird deutlich, daß mit höherer Zellenzahl die Anzahl der erforderlichen Iterationsschritte deutlich ansteigt (geringere Abfallrate der Residuen bzw. stärkere Schwankungen). Dies führt zu der Aussage, daß bei hohen Zellenzahlen der Berechnungsaufwand nicht nur

linear mit der Zellenzahl wächst, sondern auch die Anzahl der Iterationen erhöht werden muß, um eine gute Lösung zu erzielen.

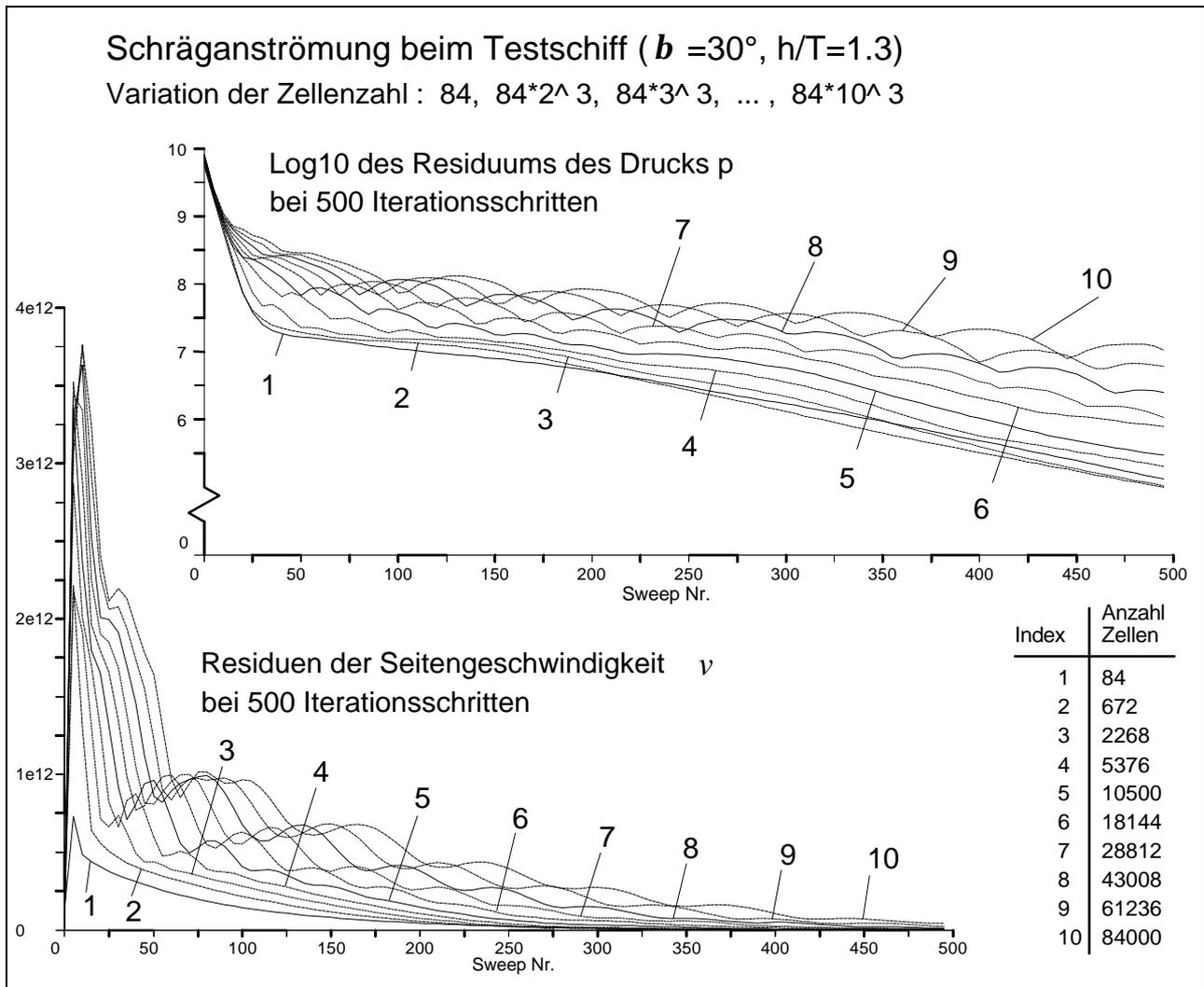


Abb. 3-5

Für einen Vergleich der Berechnungsergebnisse bei Variation der Zellenzahl wurde daher die Iteration erst nach der sehr großen Anzahl von 9999 Schritten abgebrochen. Selbst beim Gitter Nr. 10 änderten sich die Ergebnisse danach nur noch minimal.

Der hydrodynamische Druck auf der Außenhaut als Folge der inhomogenen Geschwindigkeitsverteilung wird als Kenngröße für die Qualität des Strömungsfeldes herangezogen. Die Ergebnisse der Berechnung mit der CFD-Software wurden dazu in ein selbstgeschriebenes Programm FDRUCK eingelesen, da die mit PHOENICS gelieferten Post-Prozessoren eine Berechnung der Druckkräfte nicht ermöglichen. Nach Angabe der an der Schiffskontur anliegenden Zellen und deren die Außenhaut beschreibenden Stirnflächen können für die

3. Identifikation der Koeffizienten

einzelnen Paneele die Kräfte aus den Normalenvektoren und den Drücken in den Zellen bestimmt werden. Durch Aufsummierung der Komponenten und deren Hebelarme werden die Längs-, Seiten- und Vertikalkräfte sowie die Gier-, Roll- und Trimmomente berechnet.

In Abbildung 3-6 sind die Ergebnisse der Rechnungen mit maximaler Anzahl Iterationen (9999 Schritte) über der Gitternummer aufgetragen. Man erkennt, daß die Verbesserung durch eine feinere Diskretisierung ab etwa 10.000 Zellen nicht mehr deutlich hervortritt. Die feinere Auflösung wird nicht etwa durch lineare Interpolation des Gitters Nr. 1 (siehe Tabelle 3-3) erzeugt, sondern in allen Fällen werden die Gitterpunkte exakt auf der mathematisch beschriebenen Außenhautfläche berechnet. Ungenauigkeiten, wie sie durch das Darstellen der Parabeln durch einen Polygonzug entstehen, nehmen also bei zunehmender Verfeinerung der Paneelierung ab und führen zu einer Verbesserung der Ergebnisse.

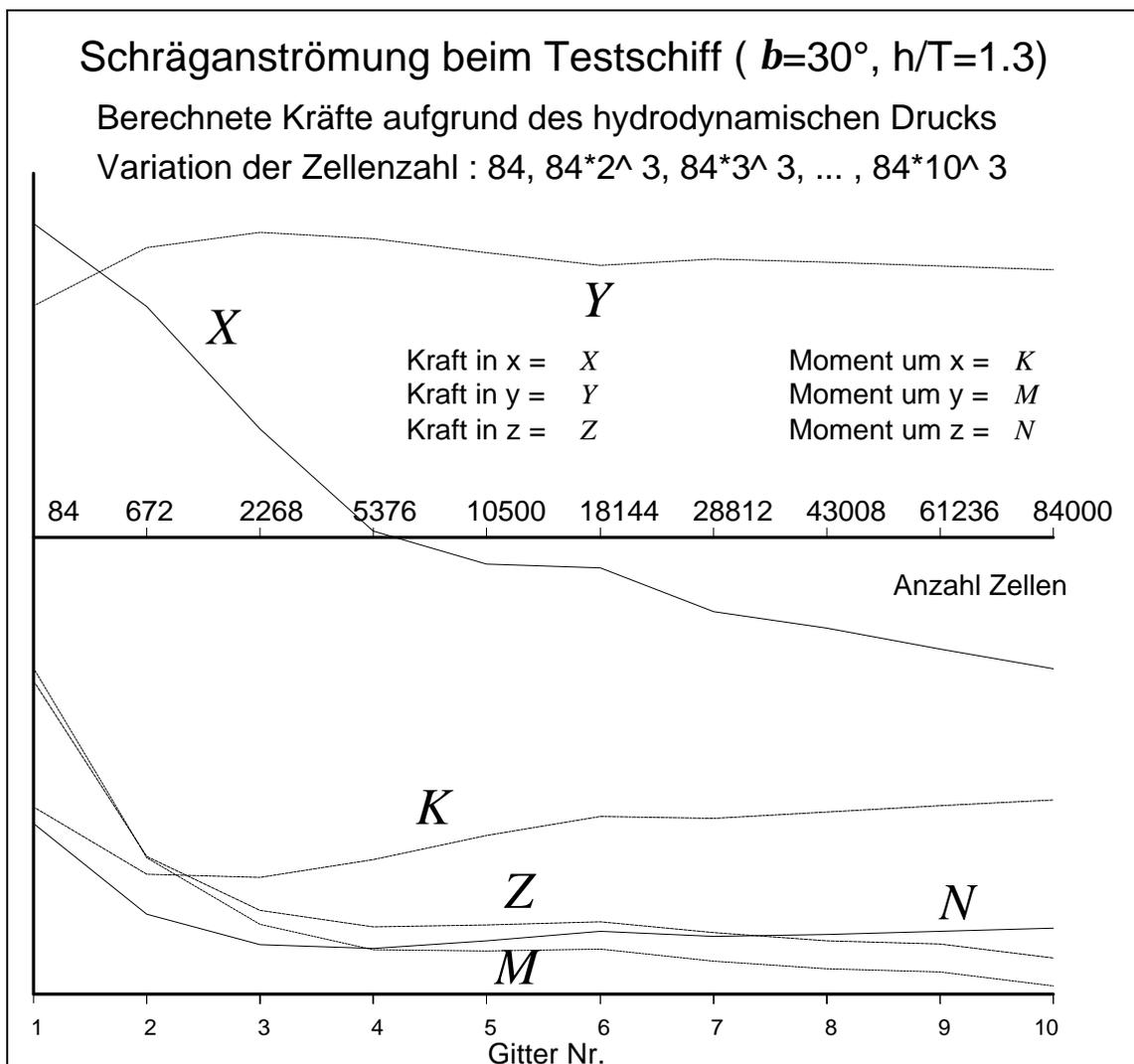


Abb. 3-6

- B** Die Konvergenz bei der Berechnung des Strömungsfeldes kann nicht nur durch die Residuen (siehe Abb. 3-5), sondern sollte auch anhand der Zwischenergebnisse nach einer gewissen Anzahl Iterationsschritten beurteilt werden. Alle Gitter wurden mit einer maximalen Anzahl von 9999 Schritten ausiteriert.

Während der Rechnung wurde die Iteration in 16 Stufen unterbrochen, und aus den Zwischenergebnissen wurden die Kräfte und Momente bestimmt. Die Änderung der für das Manövrieren wichtigen Größen X , Y und N wird in den Abbildungen 3-7, 3-8 und 3-9 sowohl über der Iterationstiefe (durchgezogene Linien) als auch über der Zellenzahl (gestrichelt) aufgetragen. Bedingt durch die exponentiell abnehmende Änderung des Strömungsfeldes bei hohen Iterationszahlen wurde eine logarithmische Darstellung gewählt.

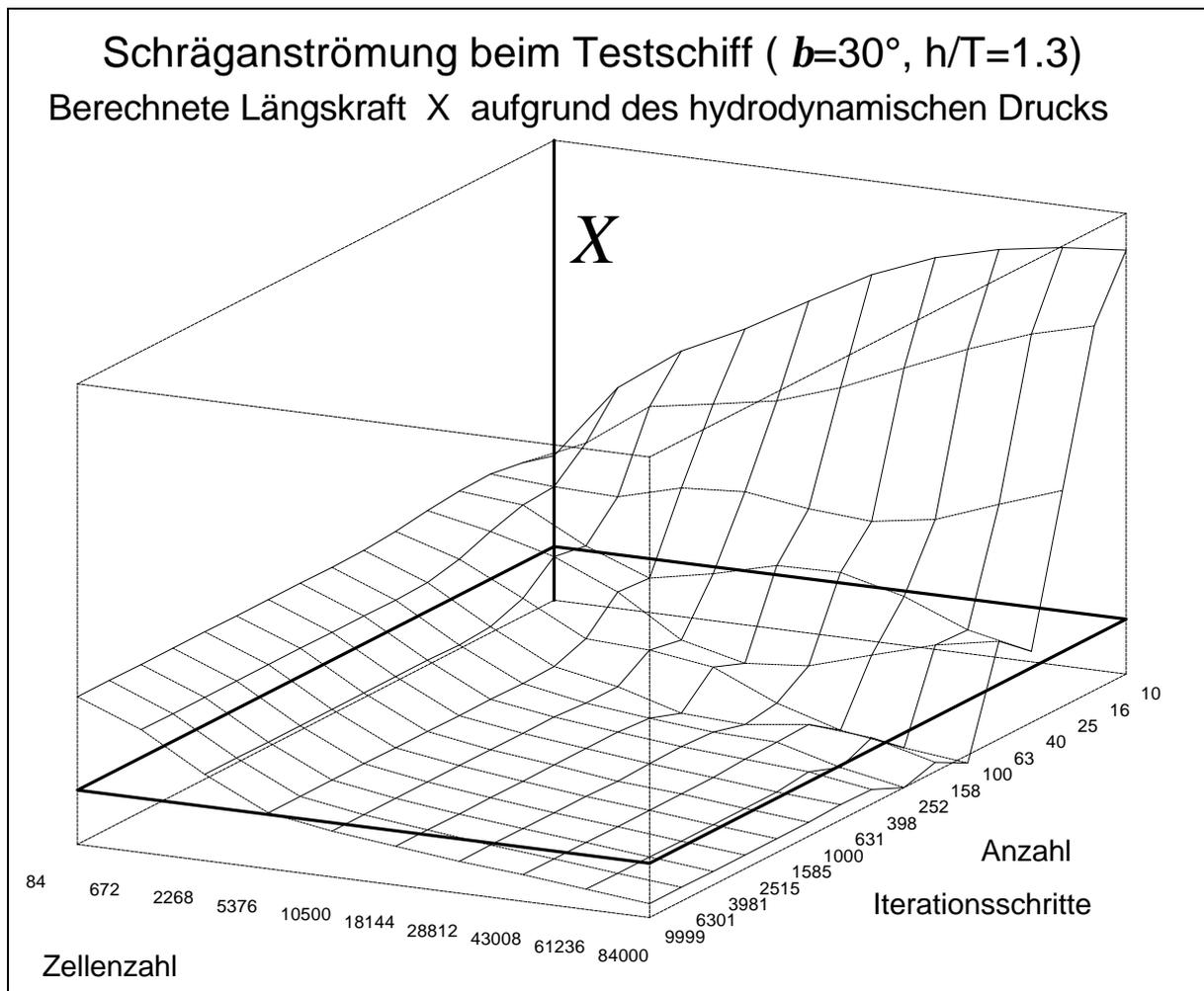


Abb. 3-7

Nach starken Schwankungen im Anfangsbereich stabilisiert sich der Zustand ab ca. 400 Iterationsschritten. Für dieses langsame Einpendeln auf einen stabili-

3. Identifikation der Koeffizienten

len Zustand ist das Druckfeld verantwortlich, welches bei der Iteration deutlich empfindlicher ist als die Geschwindigkeiten. Obwohl die Strömungsvektoren ziemlich bald konstante Werte annehmen, dauert es geraume Zeit, bis sich eine Konvergenz in der Druckverteilung einstellt. Da die Kräfte und Momente ausschließlich aus den Drücken berechnet werden, sind diese ein besonders guter Indikator für das Erreichen eines stabilen Endzustandes der Berechnung.

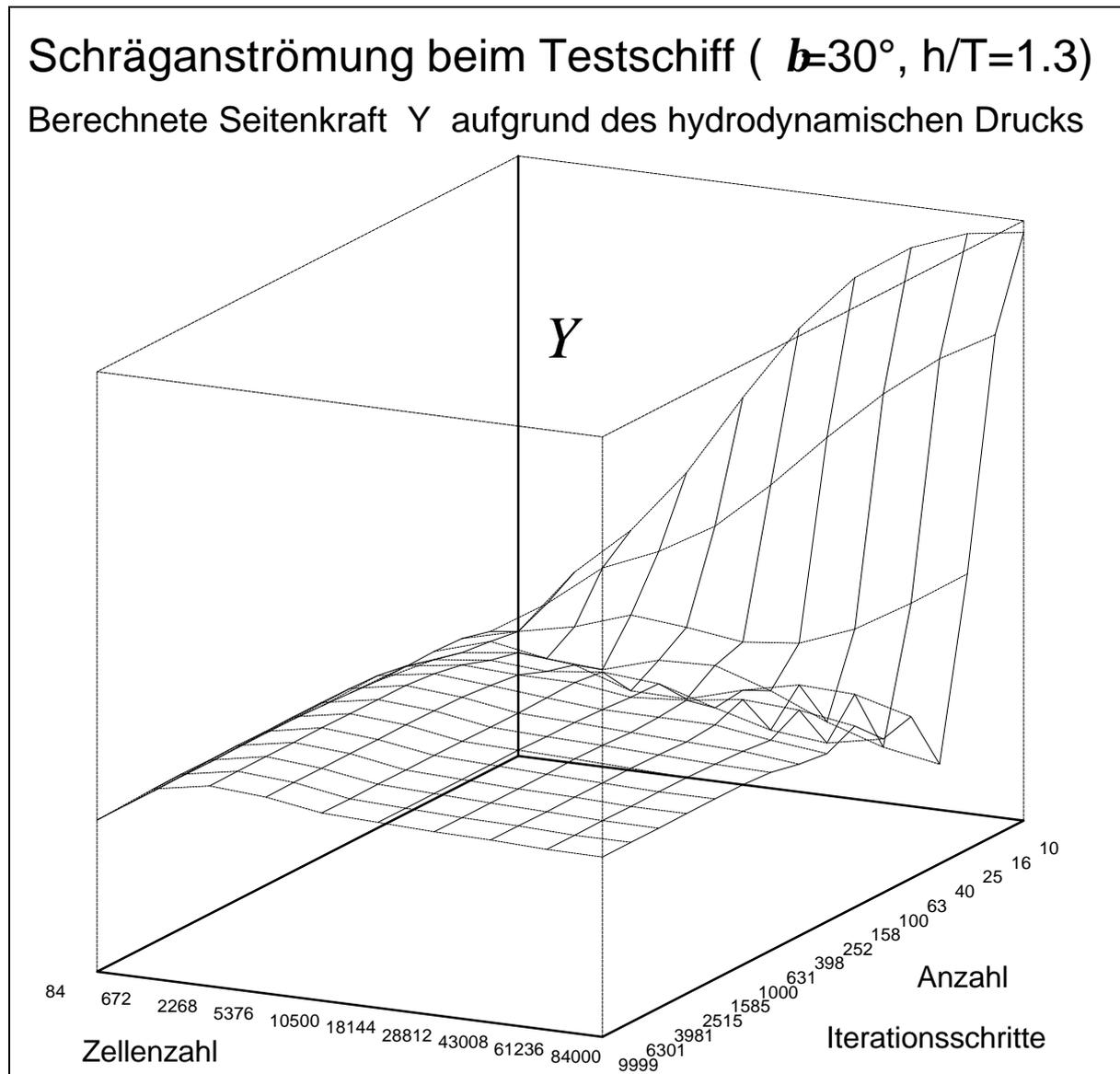


Abb. 3-8

Direkt nach dem Start der Berechnungen ist das Druckfeld noch sehr ungeordnet, was zu den großen Werten für die Kräfte und Momente führt. Im Laufe der Iterationen formen sich die Drücke und bilden den Staubereich in Stromrichtung am Bug und den Unterdruckbereich an der Abstromseite am Heck. Dabei wird auch die Randbedingung "Druck an den Ausströmebenen = 0" erfüllt. Dies ist mit Schwankungen in den Kräften verbunden, die sich im Laufe der Berech-

nung stabilisieren. Ein unerwartetes, aber sehr aufschlußreiches Ergebnis dieser Untersuchungen ist, daß unabhängig von der Zellenzahl die Konvergenz nach fast der gleichen Anzahl Iterationsschritten (ca. 500) einsetzt. Die 3-D-Darstellung der Kräfte bzw. Momente über die beiden Parameter "Anzahl Iterationen" und "Zellenzahl" zeigt außerdem einen nahezu quadratischen "ebenen" Bereich bei hohen Zellenzahlen und langen Iterationen. Sieht man von der sehr empfindlichen Längskraft ab, so kann gefolgert werden, daß für das Testschiff eine Erhöhung der Zellenzahl über ca. 10000 und eine Berechnung mit mehr als 500 Schritten nur noch eine relativ geringe Verbesserung der Ergebnisse erwarten läßt.

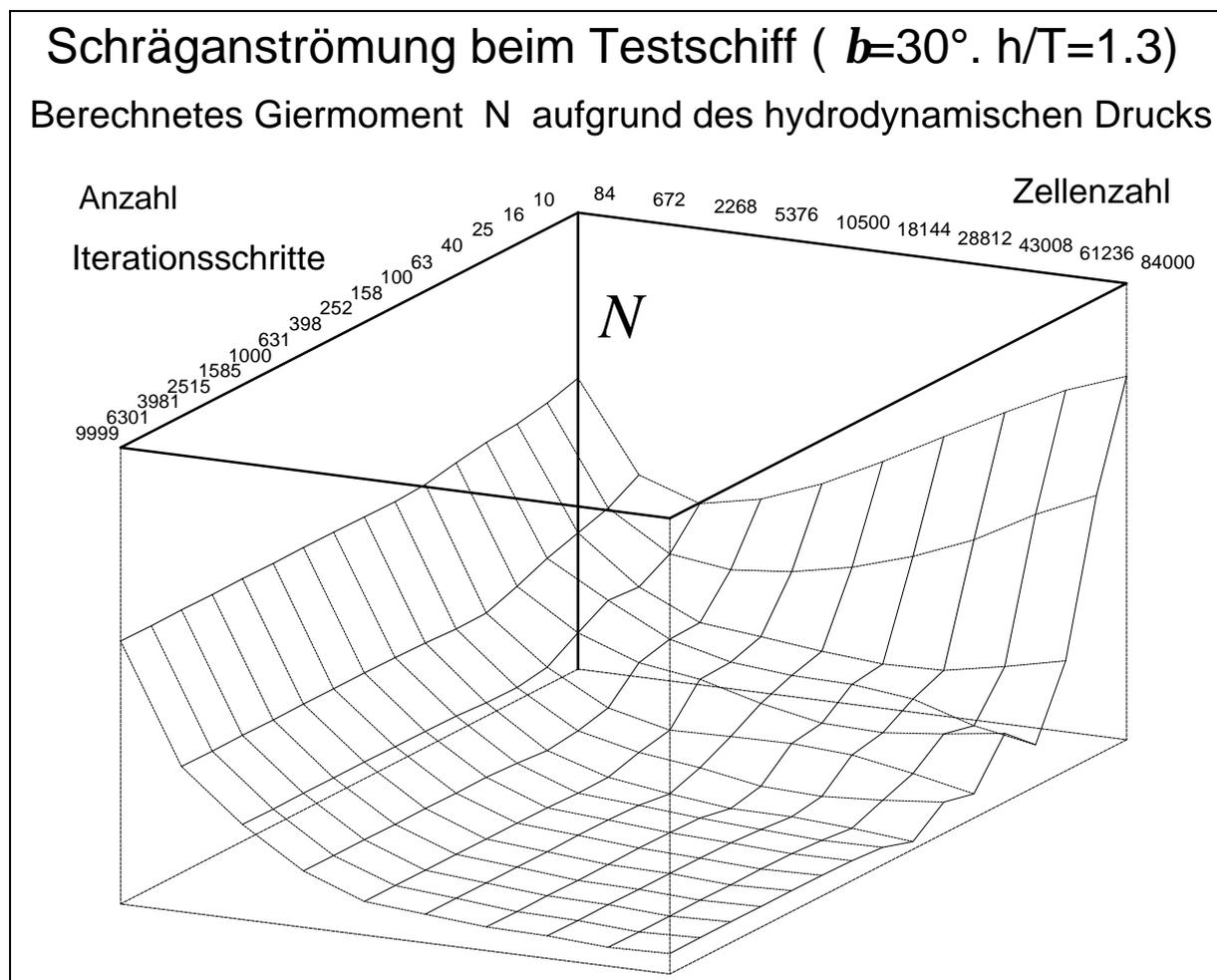


Abb. 3-9

Bei großen Zellenzahlen ist zwar die Schwankung des Strömungsfeldes während des Rechengangs größer als bei kleinen Gittern, erstaunlicherweise wird der Beginn der Konvergenz aber nach annähernd gleicher Iterationstiefe erreicht. Hier ergibt sich ein Widerspruch zu den Ausführungen über die Residuen (Abb. 3-3). Es ist tatsächlich der Fall, daß die Schwankungen bei geringen Zellenzahlen geringer sind, und zwar sowohl bei den Residuen als auch

3. Identifikation der Koeffizienten

bei den Kräften (besonders deutlich zu sehen beim Giermoment in Abb. 3-9). Bei der logarithmischen Darstellung der Iterationstiefe ist jedoch der instabile Bereich zu Beginn des Rechengangs stark gedehnt und der Zeitpunkt der Stabilisierung nicht exakt lokalisierbar. Eine genaue Betrachtung der Ergebnisse während der Iterationen zeigt dann auch, daß bei feiner diskretisierten Gittern die Annäherung an den Endwert später erfolgt. Es ist jedoch keine Proportionalität von Zellenzahl und Iterationstiefe festzustellen, aus der man einen Richtwert für den Rechenaufwand bis hin zur Konvergenz ableiten könnte.

Eine weitere Untersuchung befaßte sich mit der Wahl der Randbedingungen an den Begrenzungen des Strömungsgebietes. Es sollte die Frage geklärt werden, ob die mittlere Strömungsgeschwindigkeit und der hydrodynamische Druck am Schiffskörper von den am Gewässerboden vorgegebenen Bedingungen beeinflusst werden.

Hierfür ist eine 3-dimensionale Berechnung nicht erforderlich, wohl aber eine sehr feine Diskretisierung des Strömungsgebietes. In Abbildung 3-10 ist das erzeugte 2-D-Gitter für den Fall der Querströmung an einem Hauptspant ausschnittsweise wiedergegeben. Im gesamten Berechnungsgebiet wurden 4800 Zellen angeordnet, wobei der Bereich unter dem Schiff mit 20 Zellen in der Vertikalrichtung so ausgefüllt wurde, daß die Volumina an den Berandungen deutlich kleiner als in der Mitte des Strömungsgebietes waren.

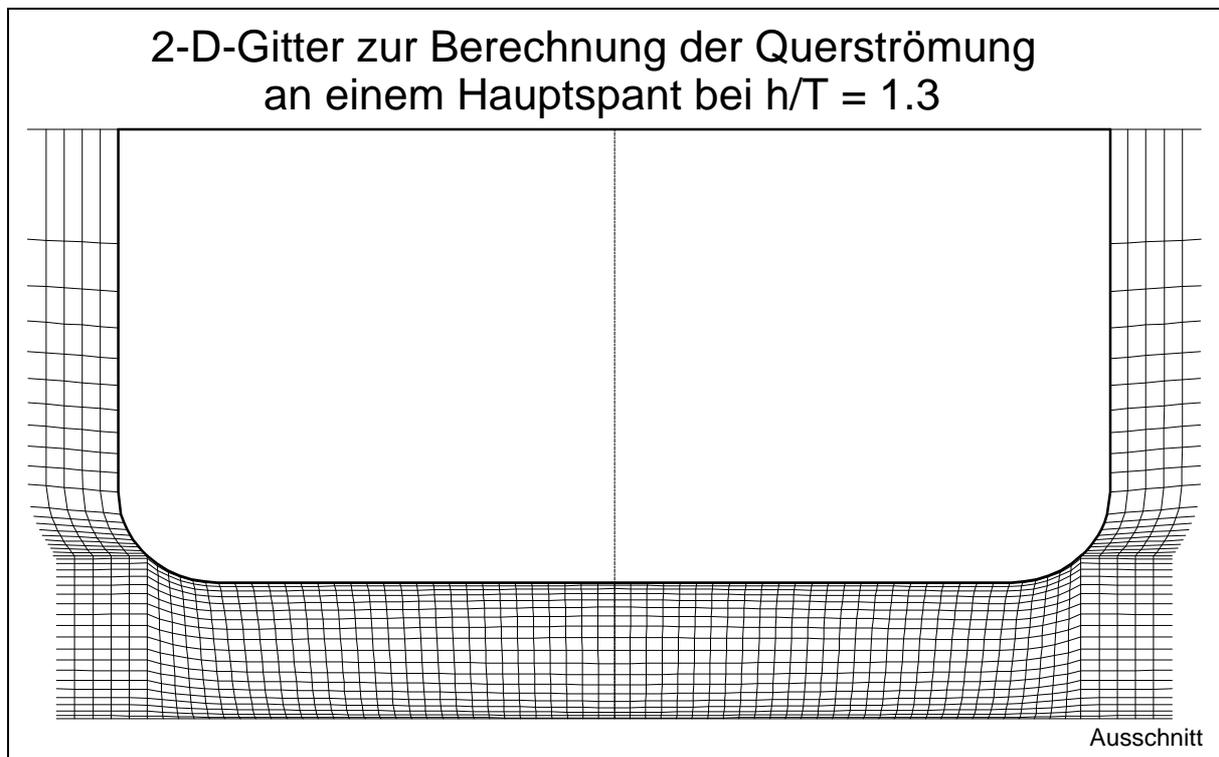


Abb. 3-10

An der Schiffsaußenhaut herrscht die Haftbedingung, d.h. an der die Außenhaut des Schiffes beschreibenden oberen Zellwand wurde die Geschwindigkeit zu Null gesetzt. Der Zustand am Gewässerboden wurde in den folgenden drei Varianten untersucht:

1) *Reibungsloser Boden*

Die Normalgeschwindigkeit am Boden ist Null, die Tangentialgeschwindigkeit ist frei.

2) *Mitbewegter Boden*

Die Geschwindigkeit am Gewässerboden ist gleich der Anströmgeschwindigkeit im Unendlichen.

3) *Ruhender Boden*

Wie am Schiff ist die Geschwindigkeit am Gewässerboden gleich Null.

Fall 3) entspricht dem Umlauftank, bei dem das Wasser über einem festen Boden strömt, der Fall 2) simuliert den Schlepptank, wobei durch den Übergang vom erdfesten zum schiffsfesten Koordinatensystem die Schleppwagengeschwindigkeit auf den mitbewegten Boden übertragen wird. Die berechneten Geschwindigkeitsprofile sind trotz der hohen Zellauflösung noch eckig. Aus diesem Grund ist der Verlauf der Profile in Abbildung 3-11 schematisch dargestellt.

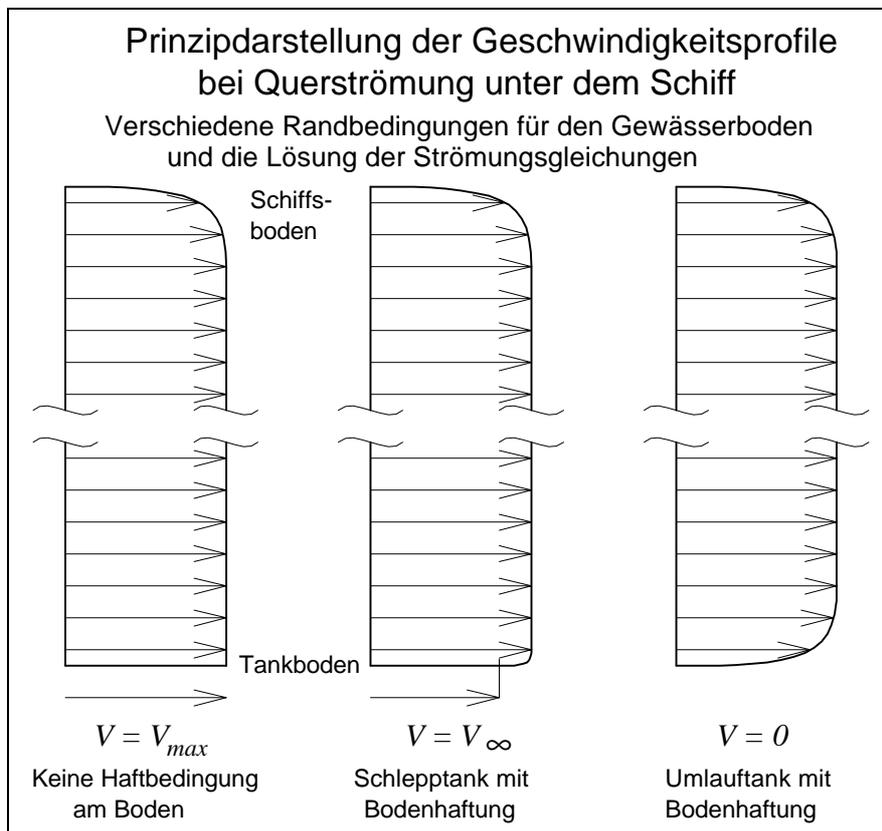


Abb. 3-11

3. Identifikation der Koeffizienten

Das Geschwindigkeitsprofil wird kaum von den Randbedingungen am Gewässerboden beeinflusst. An der Oberseite des Strömungsgebietes ist ein Unterschied in der Art der Bodengrenzschicht praktisch nicht mehr nachweisbar. Ein Vergleich der durch den hydrodynamischen Druck bedingten Kräfte am Hauptspant für die drei untersuchten Fälle bestätigt diese Beobachtung. In Tabelle 3-4 sind die durch die Querströmung verursachten Seitenkraft Y und die Vertikalkraft Z angegeben. Die Werte wurden dabei auf den Fall 1) als 100% bezogen.

	Seitenkraft Y	Vertikalkraft Z	Geschwindigkeit v_{Boden}
Fall 1)	100,00 %	100,00 %	$v_{\text{Boden}} > v_{\infty}$
Fall 2)	99,14 %	100,47 %	$v_{\text{Boden}} = v_{\infty}$
Fall 3)	98,88 %	100,77 %	$v_{\text{Boden}} = 0 < v_{\infty}$

Tab. 3-4

Die Veränderung der Ergebnisse geht einher mit der Änderung der Geschwindigkeit, die durch die Randbedingung am Boden festgelegt wurde. Die in Abbildung 3-11 nicht erkennbare Änderung der mittleren Geschwindigkeit im Spalt zwischen Schiff und Boden hat (wenn auch sehr geringe) Änderungen der Kraftwirkungen zur Folge.

Der praktische Schiffsbetrieb (Fahrt durch ruhendes Gewässer) entspricht am ehesten Fall 2), der den auch Schlepptank simuliert. Wegen der geringen Unterschiede zwischen Fall 1) und 2) wurden die folgenden Berechnungen jedoch aus Gründen der Einfachheit mit der Randbedingung "Reibungsloser Boden" ausgeführt.

3.4.1.2 Durchgeführte Berechnungen

Als Untersuchungsobjekt wurde ein Schiff verwendet, für das in der VBD im Rahmen eines BMFT-Forschungsvorhabens umfangreiche PMM-Untersuchungen auf 6 verschiedenen Wassertiefen durchgeführt wurden. Es handelt sich um ein modernes Containerschiff, dessen Spantenriß in Abb. 3-12 wiedergegeben ist. Detaillierte Angaben zu diesem Schiff sind bei der Beschreibung der Simulationsrechnungen in Kapitel 5.1 zu finden.

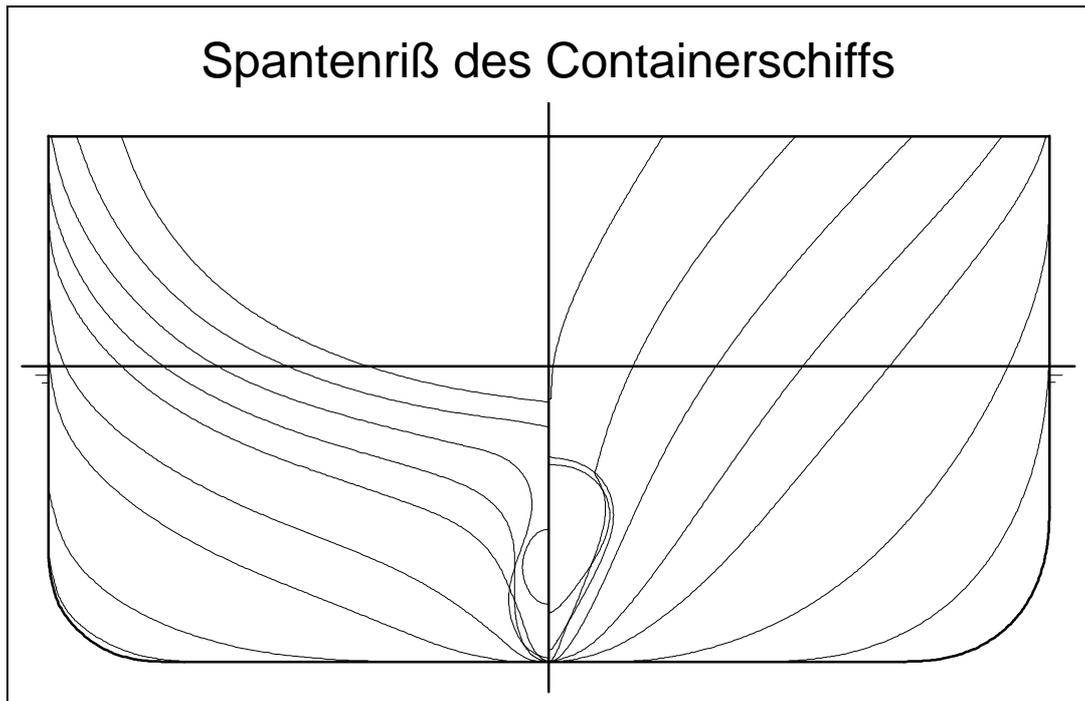


Abb. 3-12

Als Berechnungsraum wurde der Bereich von 3 Schiffslängen in der Länge und 2 Schiffslängen in der Breite festgelegt. Dies erschien als weit genug vom Schiff entfernt, um die Randbedingungen von dem Strömungsfeld um das Schiff zu entkoppeln. Folgende einschränkende Annahmen wurden vorgenommen:

- Die Wasseroberfläche ist starr und eben, es werden keine Oberflächenverformungen zugelassen.
- Das Schiff ändert seine Schwimmelage nicht, d.h. Tauchen, Trimmen und Krängen werden nicht berücksichtigt.
- Die Schwerkraft wird vernachlässigt, d.h. nur der hydrodynamische Druck wird berechnet. Dies ist für den Fall der nicht verformten Wasseroberfläche zulässig.
- Der Reibungseinfluß wird an der Schiffsoberfläche berücksichtigt, eine genaue Betrachtung der Grenzschicht wird hier wegen der begrenzten Zellenzahl nicht vorgenommen.
- Der Gewässerboden ist reibungsfrei, d.h. die Beeinflussung der unter dem Schiff beschleunigten Strömung durch den Gewässerboden wird nicht berücksichtigt. Dies mindert den prinzipiellen Nachteil des Umlauftanks (große Bodengrenzschicht), simuliert aber nicht genau die realen Bedingungen im Schlepptank.
- Lokale Einflüsse wie Wirbelablösungen werden nicht erfaßt, da die Diskretisierung für diese Effekte zu grob ist.

Der Schiffskörper wurde durch 31 Spanten, die an den Schiffsenden stärker konzentriert waren, beschrieben. Auf jedem Spant wurden 10 Intervalle je Schiffseite definiert.

3. Identifikation der Koeffizienten

niert. Dies führte zu einer Paneelierung mit 620 teilweise windschiefen Vierecken. Dabei fand der Netzgenerator PATRAN Anwendung, der sich zwar für die Aufteilung einer Oberfläche in Flächenelemente als brauchbar erwies, bei der Generierung der Volumenelemente im gesamten Strömungsraum jedoch nicht zu befriedigenden Ergebnissen führte. Die Diskretisierung der Schiffsaußenhaut ist in den Abbildungen 3-13 und 3-14 für Bug und Heck getrennt dargestellt.

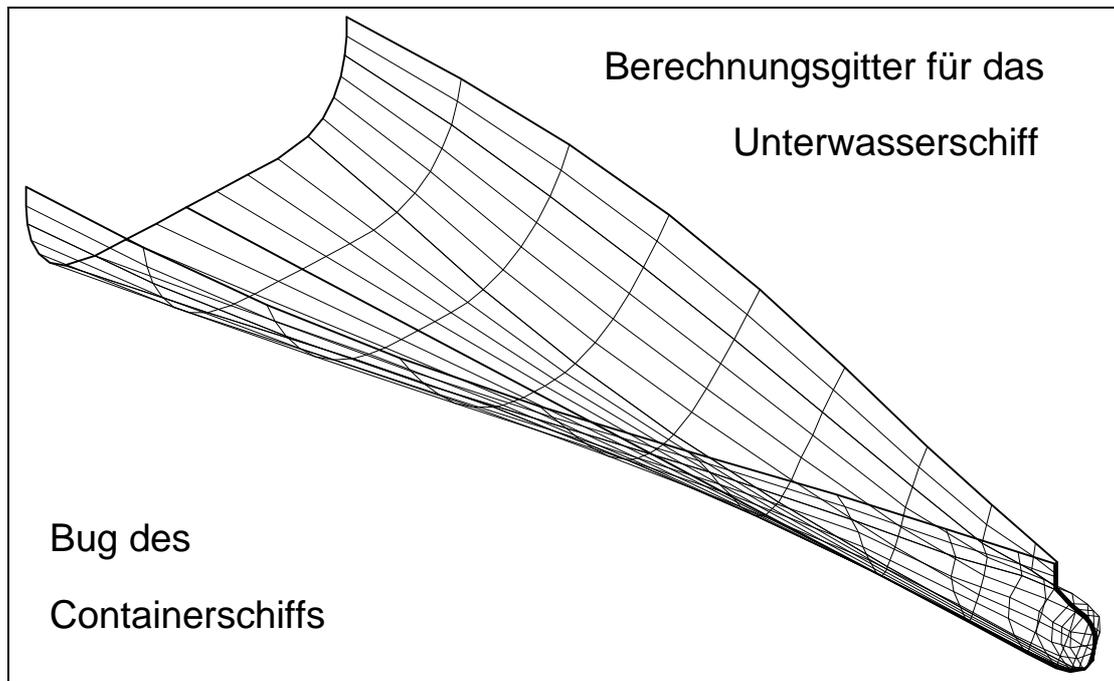


Abb. 3-13

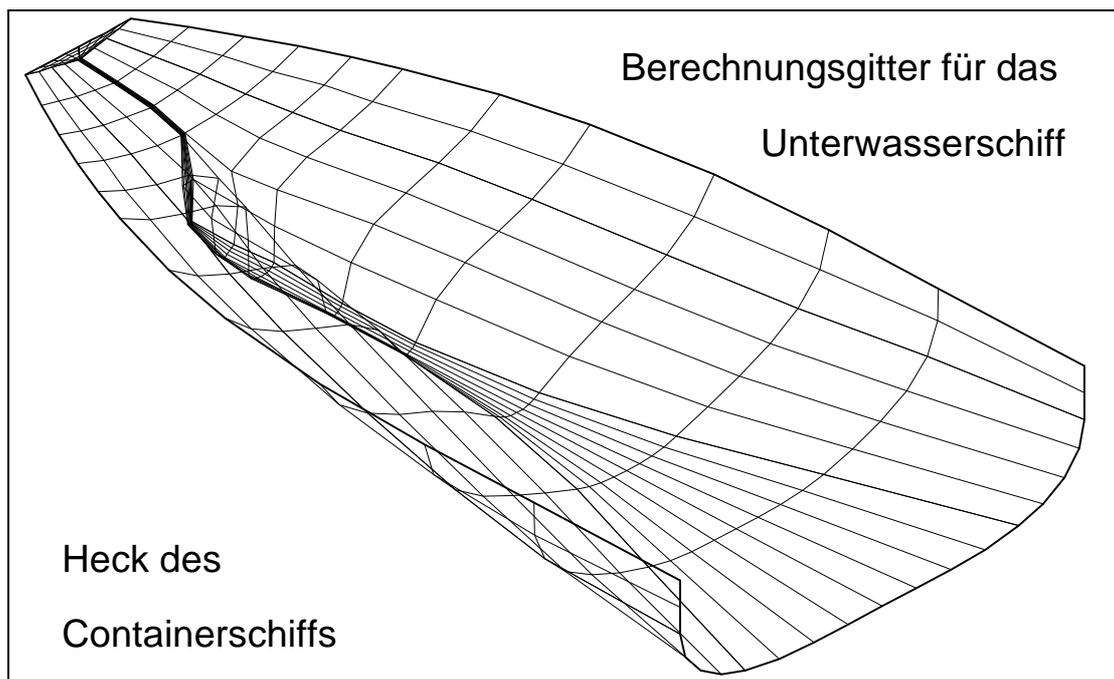


Abb. 3-14

Für die Aufteilung des gesamten Strömungsgebietes in diskrete Volumen wurde ein sogenanntes Blockgitter entwickelt. Dabei wird das Schiff als nicht durchströmbarer Block in einem homogenen orthogonalen Gitter betrachtet. Boden, Seiten- und Stirnflächen dieses Blocks werden bestimmten Bereichen auf der Schiffsoberfläche zugeordnet, die z.B. durch die Kimm, die Kanten des Spiegels oder eines gedachten schmalen Stevens dargestellt werden. Eine Verzerrung des regelmäßigen Ausgangsgitters auf die diskretisierte Schiffsoberfläche mit entsprechender Verdichtung der Zellen in der Nähe des Schiffskörpers führt zu einem für die numerische Berechnung brauchbaren Gitter. Die Skizze in Abb. 3-15 zeigt das Prinzip des Blockgitters an einem Spant.

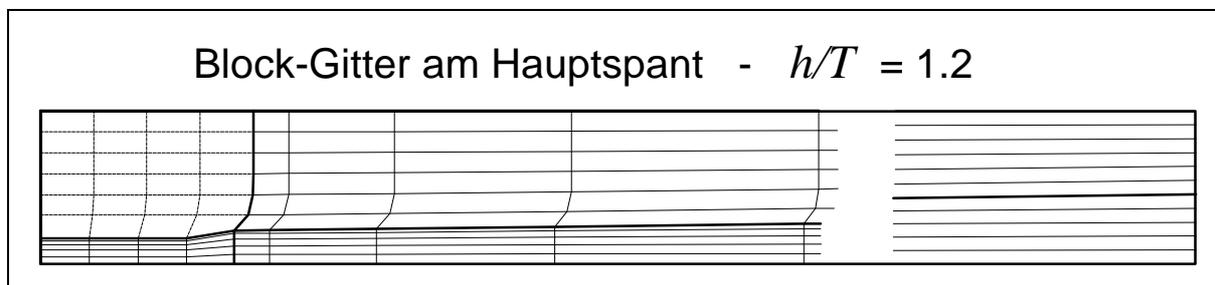


Abb. 3-15

Ausgehend von den 620 Oberflächenpaneelen und 116 teilweise sehr schmalen Elementen für die Stirnflächen wurde das Strömungsgebiet in 15.730 Volumina aufgeteilt (55 Zellen in X-, 24 Zellen in Y- und 11 Zellen in z-Richtung). Für diese Aufgabe wurde ein spezialisierter Gittergenerator programmiert, der bei Vorgabe einer gewissen Anzahl von Parametern - wie z.B. Zellenzahlen außerhalb des Schiffskörpers, Verdichtungen in der Breite und der Tiefe, Wassertiefen/Tiefgangsverhältnis h/T etc. - eine schnelle, flexible und sichere Erstellung und Modifikation des Berechnungsgitters ermöglichte. Als Beispiel dafür dient die Darstellung der obersten Zellschicht des Gitters aus der Vogelperspektive in Abbildung 3-16.

Für die eigentlichen Berechnungen wurden für jeden Rechenfall nach Optimierung des Konvergenzverhaltens 500 bis 1000 Iterationsschritte durchgeführt. Dies ist durch den sehr langsamen Aufbau des Druckfeldes bis hin zu relativ konstanten Werten begründet. Die unterschiedliche Anzahl der Rechenschritte ist abhängig von der Wassertiefe und damit von der maximalen Abweichung der Zustandsgrößen. Bei kleinen h/T (1.2 bis 1.6) wurden 1000 Zyklen gerechnet, da die Residuen sich erst dann stabilisierten und weitere Änderungen der Drücke und Geschwindigkeiten gering waren.

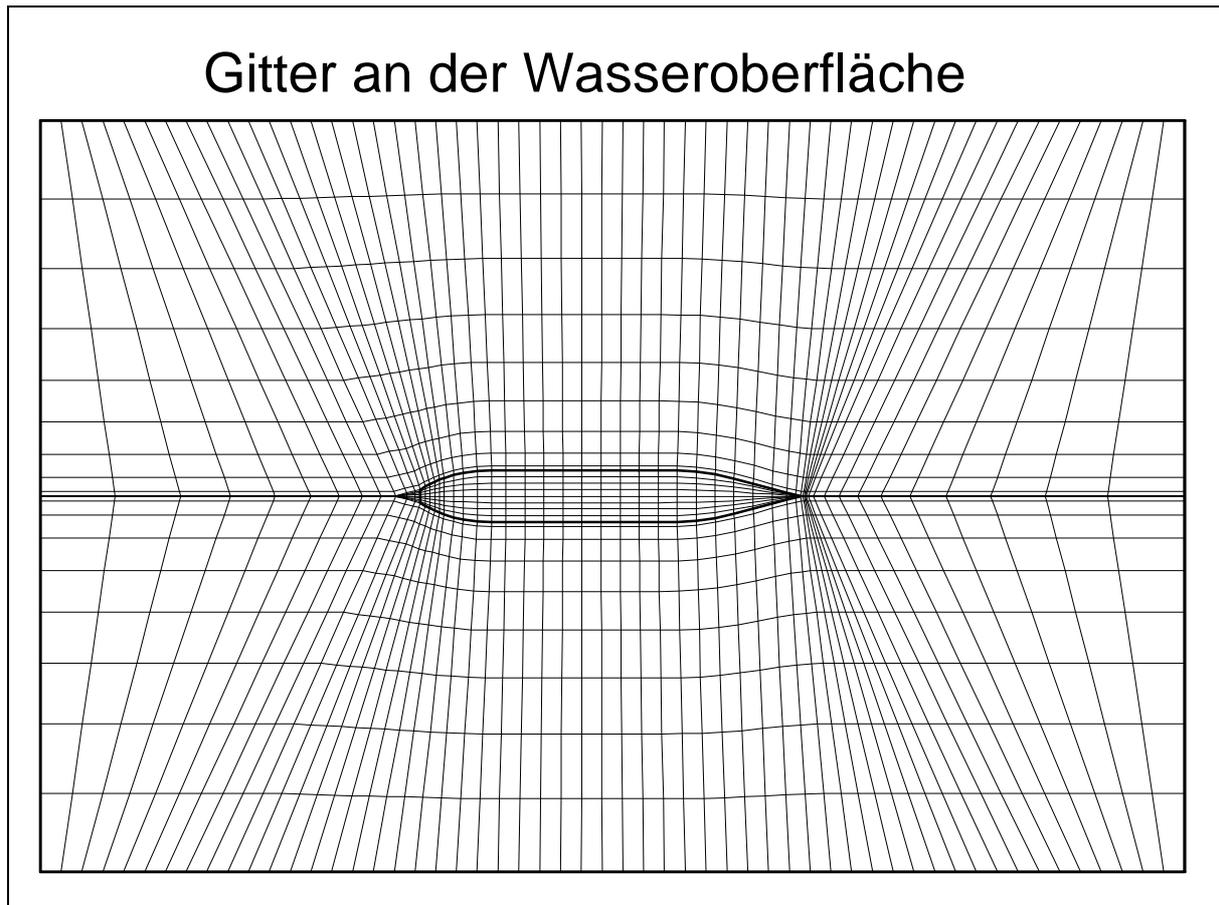


Abb. 3-16

Für die Bestimmung der hydrodynamischen Kräfte wurden für alle im Modellversuch untersuchten Wassertiefen CFD-Rechnungen durchgeführt. Der Bereich der untersuchten h/T -Relationen ist in der Tabelle 3-5 angegeben.

h/T	1.2	1.3	1.4	1.6	2.0	4.0
T/h	0.833	0.769	0.714	0.625	0.5	0.25

Tab. 3-5

Für alle Wassertiefen wurde die Schiffsumströmung für 13 Driftwinkel (0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 40° , 50° , 60° , 70° , 80° , 90°) durch Vorgabe der Einströmrichtung an den Begrenzungen vor dem Bug des Schiffes und an der Backbordseite des Rechengitters berechnet. Damit ist der bei Vorausfahrt mögliche Driftwinkelbereich bis zum maximalen Wert von $\mathbf{b} = 90^\circ$ abgedeckt. Exemplarisch wurde für die Wassertiefe $h/T=2.0$ bis zur Rückwärtsfahrt mit $\mathbf{b} = 180^\circ$ gerechnet, um die Übereinstimmung von Rechnung und Messung über den gesamten Bereich aller möglichen Anströmwinkel zu überprüfen.

3.4.1.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse eines Rechengangs bestehen aus dem Geschwindigkeitsfeld und den Drücken in den einzelnen Zellen. Der "Meßpunkt" für diese Zustandsgrößen ist der Mittelpunkt des finiten Volumens. In den folgenden Abbildungen 3-17 und 3-18 ist das Geschwindigkeitsfeld an der Wasseroberfläche und am Gewässerboden dargestellt. Um die Darstellung noch erkennbar zu gestalten, wurde nur der innere Bereich des gesamten Berechnungsgebietes abgebildet. Es handelt sich um die Ergebnisse nur eines Rechenfalles, der exemplarisch unter nahezu 100 Fällen ausgewählt wurde. Die Wassertiefe ist sehr gering - mit der Relation h/T von 1.3 handelt es sich schon um extremes Flachwasser.

Die Oberflächengeschwindigkeiten (Abb. 3-17) weisen die typischen Merkmale einer Strömung um ein Hindernis auf: Staupunkt auf der Backbordseite kurz hinter dem Steven, Abriß auf der Abstromseite des scharfen Stevens, Anliegen der Strömung an den Schiffsseiten und ein Totwassergebiet mit deutlich verringerter Strömungsgeschwindigkeit am Heck.

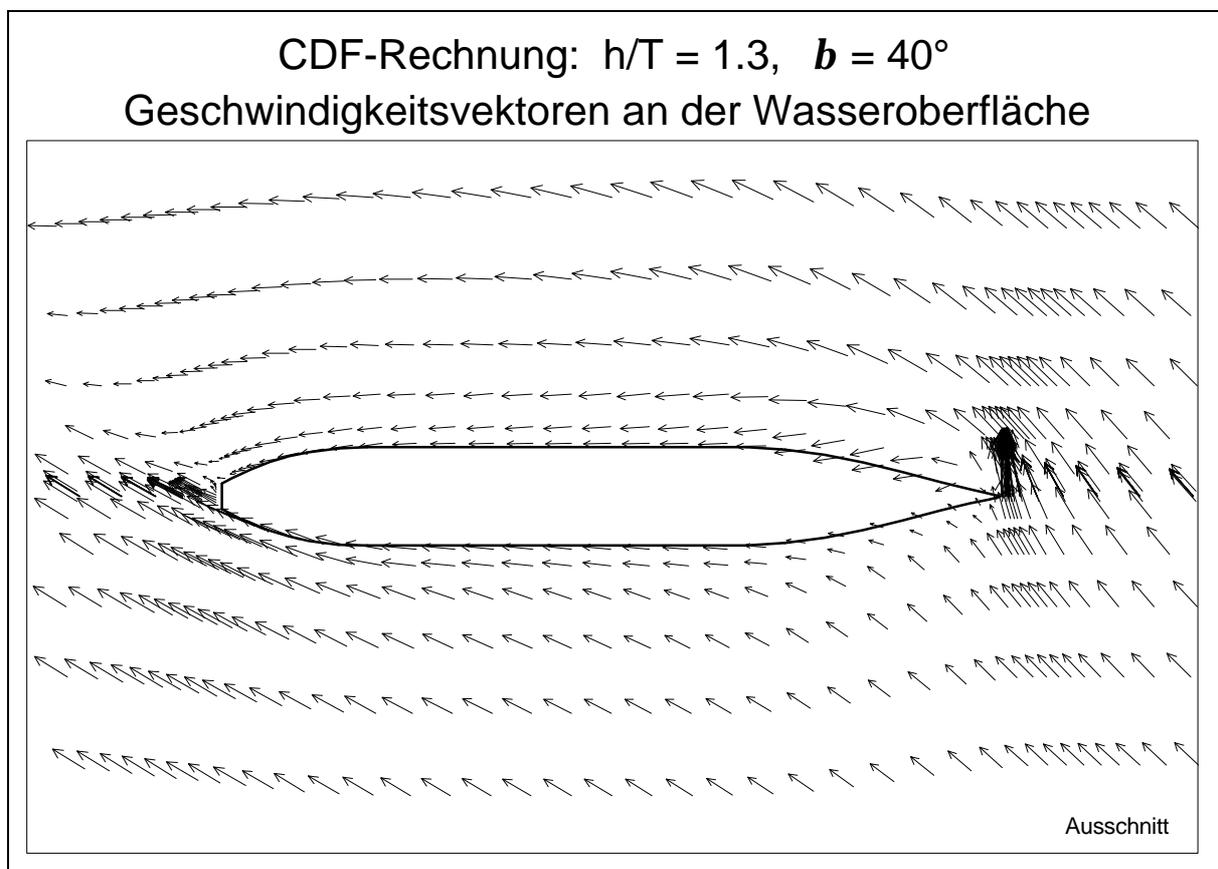


Abb. 3-17

3. Identifikation der Koeffizienten

Die Vektoren nahe der Außenhaut haben nicht den Betrag Null und weisen teilweise in den Schiffskörper hinein. Dies liegt daran, daß die Zellen, die am Schiffskörper anliegen, eine endliche Dicke besitzen, und der mittlere Strömungszustand für die gesamte Zelle in deren Schwerpunkt angegeben wird. An der Außenhaut ist aber tatsächlich die Haftbedingung wirksam, was durch eine sehr dünne Zellschicht in diesem Bereich dargestellt werden kann und auch nachgewiesen wurde.

Die Strömung nahe am Boden dagegen (Abb. 3-18) ist durch die deutliche Geschwindigkeitserhöhung unter dem Kiel und die Ablenkung der Strömungsrichtung zur reinen Querströmung hin gekennzeichnet. Zur Verdeutlichung wurde die Projektion des Schiffsbodens mit in das Bild aufgenommen, denn die Verdrängungswirkung des Schiffskörpers ist für die Veränderung des Strömungszustandes verantwortlich.

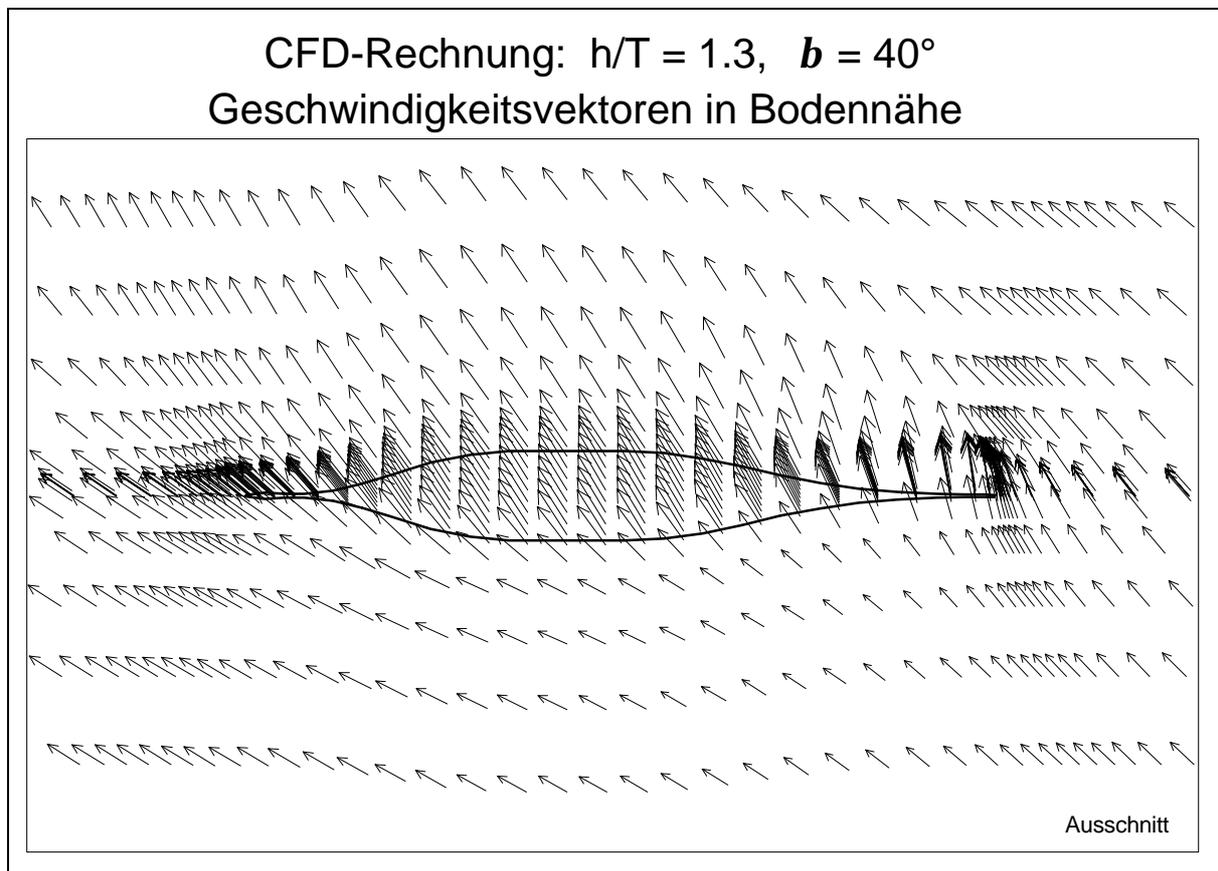


Abb. 3-18

Der Querschnitt durch das Strömungsgebiet in der Hauptspantebene (Abb. 3-19) verdeutlicht noch einmal die in Kapitel 2.2.1.2 vorweggenommene Beschreibung des Strömungszustandes. Im Gegensatz zur 2-dimensionalen Berechnung für die Abb. 2-7 in Kapitel 2.2.1.2 handelt es sich hier um eine echte 3-D-Rechnung. Die Anzahl der Zellen ist daher im vergrößerten Spantbereich in Abb. 3-19 deutlich geringer.

Zudem wurde hier auch ein größerer Seitenbereich abgedeckt. Trotzdem sind die Merkmale wie Stau an der Zustromseite, beschleunigtes Durchströmen des Spaltes unter dem Boden und das Totwassergebiet mit makroskopischen Wirbeln deutlich erkennbar. Die besonders große Länge der Vektoren unter dem Schiff ist dadurch zu erklären, daß es sich bei der Darstellung um die Querkomponenten der Strömungsgeschwindigkeit handelt. Ein Überschreiten des Strömungsgebietes durch die Pfeilspitzen ist nicht etwa unrealistisch, sondern nur durch die Skalierung der Vektoren bedingt.

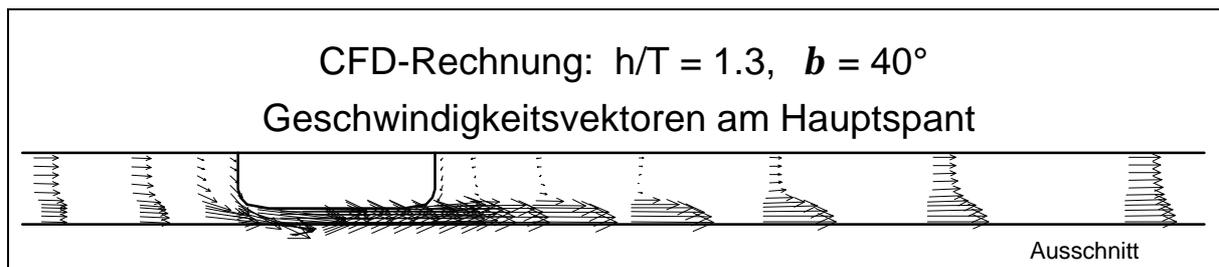


Abb. 3-19

Im Totwassergebiet an der Leeseite des Schiffs ist ein gegen den Uhrzeiger drehender Wirbel zu erkennen. Er wird durch das unter dem Boden hindurchströmende Wasser angeregt. Da es sich jedoch um eine dreidimensionale Strömung handelt, müssen die Geschwindigkeitskomponenten in Längsrichtung mit in die Betrachtung einbezogen werden. An der Oberfläche (Abb. 3-17) fließt das Wasser in weiten Bereichen parallel zur Außenhaut, so daß sich der Wirbel in der Form eines Korkenziehers darstellt. Am Boden dagegen (Abb. 3-18) ist die Strömung hinter der Versperrung durch das Schiff auch nach einem gewissen Abstand noch in Querrichtung abgelenkt. Dies erscheint seltsam, aber die Spantansicht (Abb. 3-19) beantwortet das Problem. Nach dem Verlassen des Spaltes verteilt sich die Quergeschwindigkeitskomponente über die Höhe. Die Änderung des Profils erfolgt in Analogie zu dem bekannten Strömungsfall "Strahlaustritt aus einer Wand", bei dem sich mit zunehmendem Abstand der Strahl verbreitert und verlangsamt. Die dabei bekannten Wirbel am Strahlrand sind auch am Spantschnitt erkennbar. Eine Grenzschicht am Gewässerboden bildet sich nicht aus, da in den Randbedingungen am Boden Reibungsfreiheit vorausgesetzt wurde (siehe Kapitel 3.4.1.1).

Die Verteilung des Drucks an der Wasseroberfläche (Abb. 3-20) ist verglichen mit der physikalischen Realität falsch, da die Bedingung der freien Oberfläche mit konstantem Druck bei dieser Rechnung nicht erfüllt wird. Das berechnete Ergebnis entspricht daher einem Kavitationstank, wo das Unterwasserschiff an einer festen reibungslosen Abdeckung befestigt ist. Eine 2-dimensionale Rechnung an einem Tragflügelquerschnitt kann ebenfalls zum Vergleich des qualitativen Strömungsbildes

3. Identifikation der Koeffizienten

herangezogen werden, wobei die Anströmkannte abgerundet ist. Deutlich sichtbar ist der Staubereich kurz hinter dem Bug und die Unterdruckzone auf der Abstromseite hinter dem Steven, die zum Heck hin kontinuierlich abnimmt.

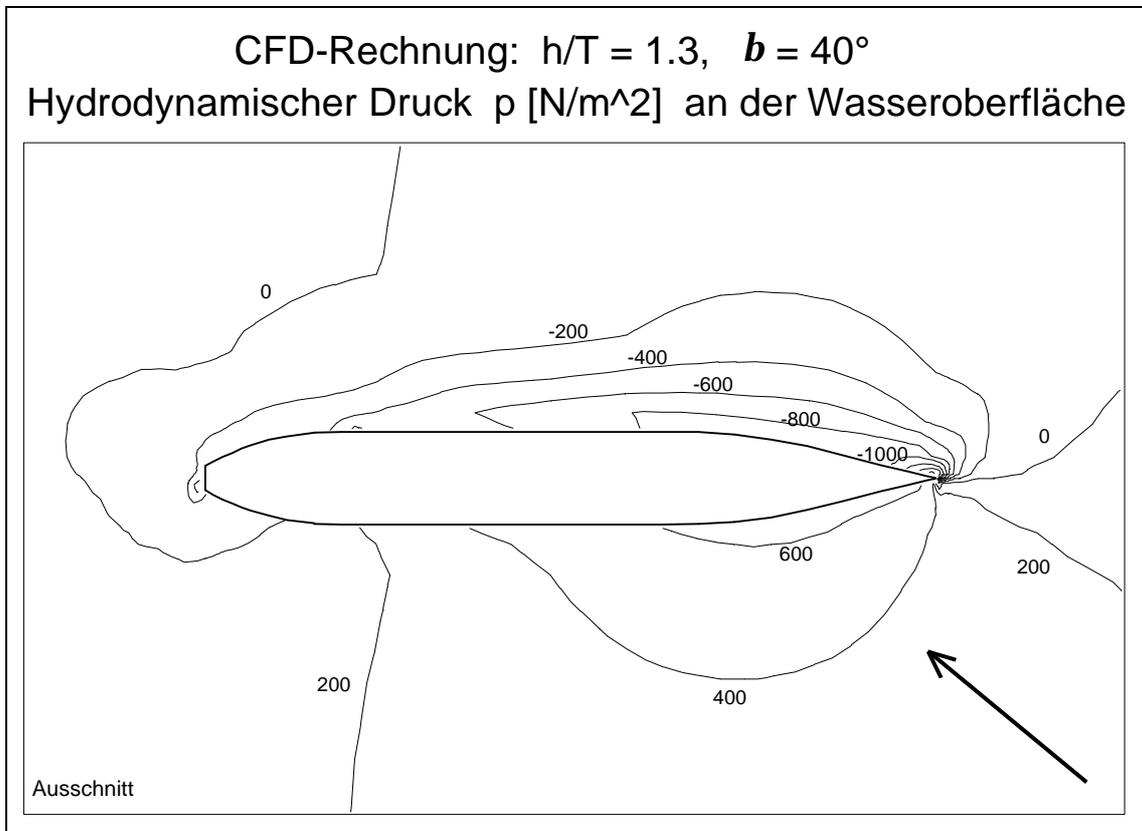


Abb. 3-20

Die Darstellung des Bodendrucks in Abbildung 3-21 weist deutliche Ähnlichkeit mit dem errechneten Oberflächendruck auf. Unter dem Schiff bildet sich ein Unterdruckfeld aus, das nur durch den Unterdruck infolge der Eintrittskantenumströmung übertröffen wird.

Die Ergebnisse der Berechnungen für das Druck- und Geschwindigkeitsfeld wurden in dem Programm FDRUCK weiter verarbeitet. Für jede Zelle des Berechnungsraumes, die an die Schiffsaußenhaut grenzt, wurde der Normalenvektor auf das Schiffkörperpaneel berechnet. Durch Multiplikation dieser Fläche mit dem Druck in dem zugehörigen Volumen kann die auf die Außenhaut wirkende anteilige Kraft berechnet werden. Die Summe der Komponenten der Einzelkräfte in alle drei Koordinatenrichtungen und die Summe der durch die Kräfte bewirkten Momente führen zu dem resultierenden Kraft- und Momentenvektor. Dabei werden sowohl die Seitenkraft als auch die Längskraft und die Vertikalkraft errechnet. Auf eine Bestimmung der reibungsbedingten Kraftanteile wurde verzichtet, da sie im Vergleich mit den Druckkräften relativ klein sind.

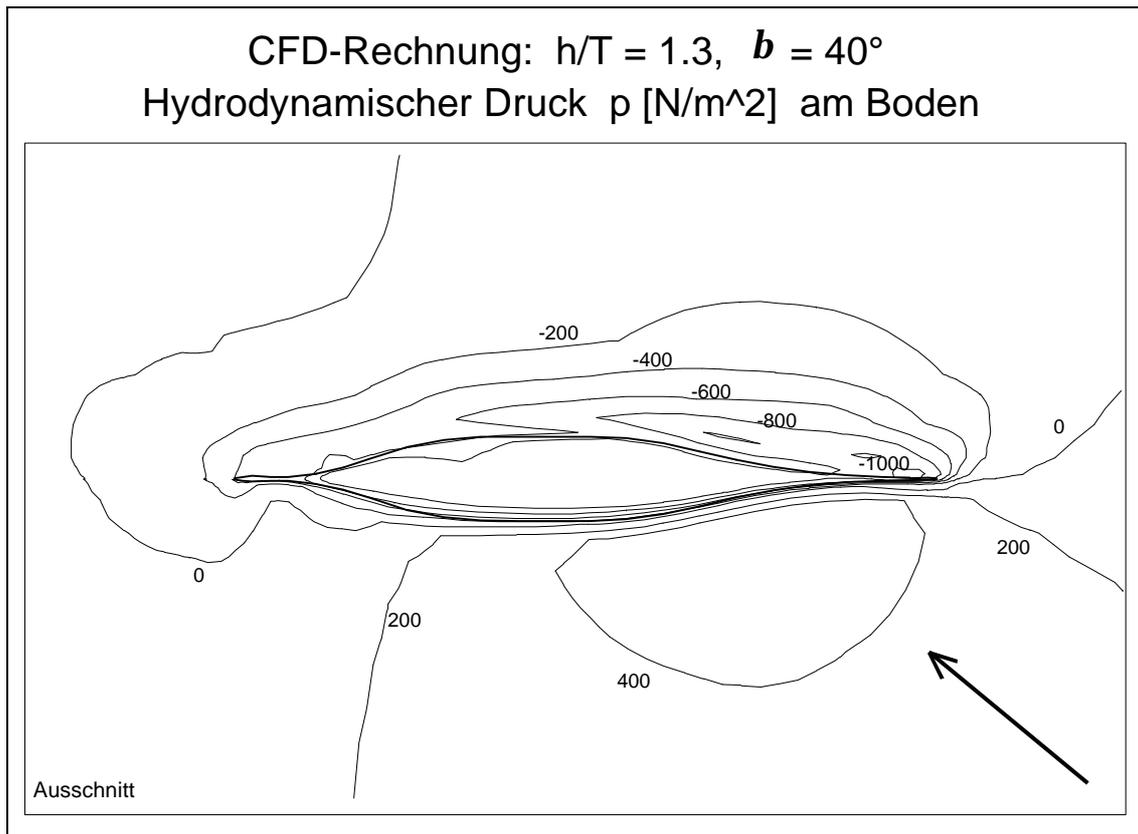


Abb. 3-21

In Abbildung 3-22 sind die Kräfte infolge des Drucks auf die Schiffsaußenhaut in 3-dimensionaler Darstellung wiedergegeben. Es ist jedoch zu beachten, daß der Betrag einer einzelnen Kraft immer von der Fläche des jeweiligen Oberflächenpaneels abhängig ist. Eine direkte Vergleichbarkeit anhand der Länge der Vektoren ist somit nicht gegeben, da die diskreten Flächenelemente des Schiffskörpers nicht gleich groß sind.

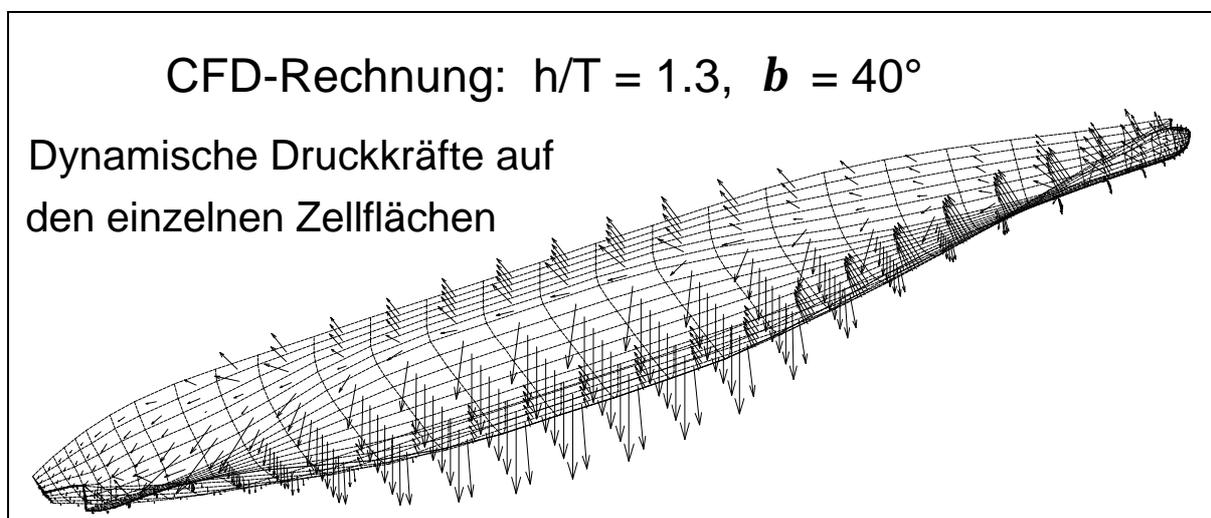


Abb. 3-22

3. Identifikation der Koeffizienten

Die Ergebnisse der umfangreichen Berechnungen für die 6 Wassertiefen (siehe Tab. 3-4) sind in den Abbildungen 3-23 bis 3-25 wiedergegeben. Dabei wurden sowohl die diskreten Versuchsergebnisse (Symbole) und die daraus abgeleiteten Ausgleichskurven (durchgezogene Linien) als auch die Berechnungsergebnisse (unterbrochene Linien) dargestellt.

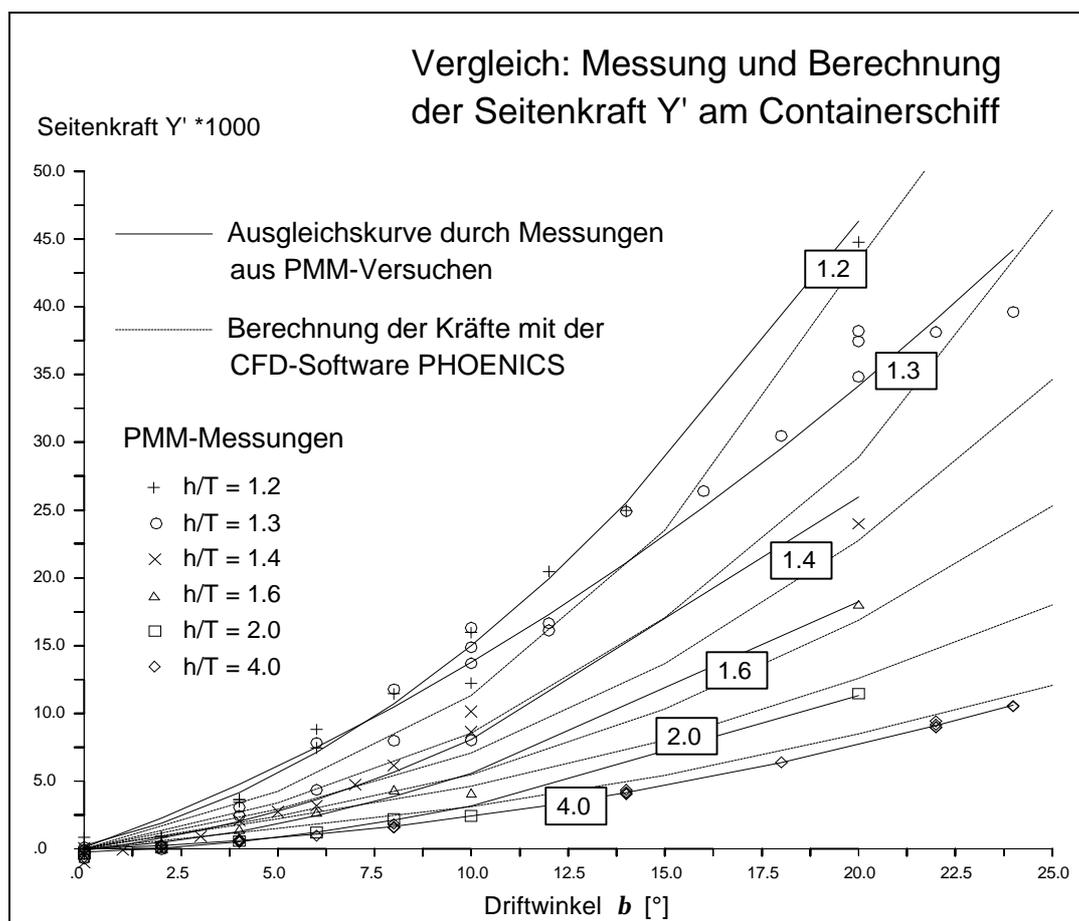


Abb. 3-23

Im Bereich der dargestellten Driftwinkel zwischen 0° und 25° zeigt sich sowohl für die Seitenkraft (Abb. 3-23) als auch für das Moment (Abb. 3-24) eine recht gute Übereinstimmung mit den Messungen. Angesichts der im vorangehenden Kapitel aufgeführten Einschränkungen, die deutliche Unterschiede zwischen Versuch und Rechnung aufweisen, ist das Ergebnis des Vergleichs als gut zu bezeichnen.

Größere Abweichungen treten vor allem bei den großen Driftwinkeln (um 90°) auf, die den Fall der reinen Querströmung beschreiben (Abbildung 3-25). Hier machen sich die Unterschiede in den Ausgangsbedingungen besonders stark bemerkbar: sowohl die Seitenkraft als auch das Moment sind in der numerischen Berechnung deutlich zu groß bzw. zu klein.

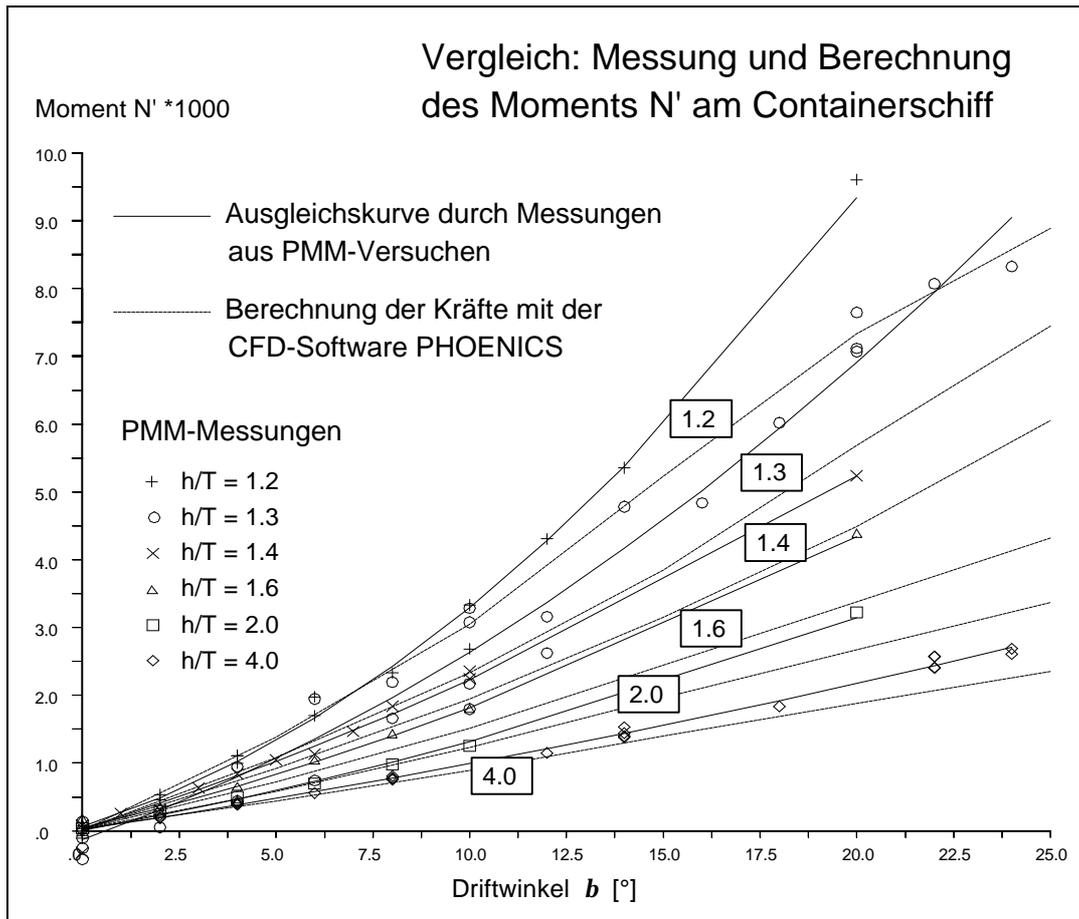


Abb. 3-24

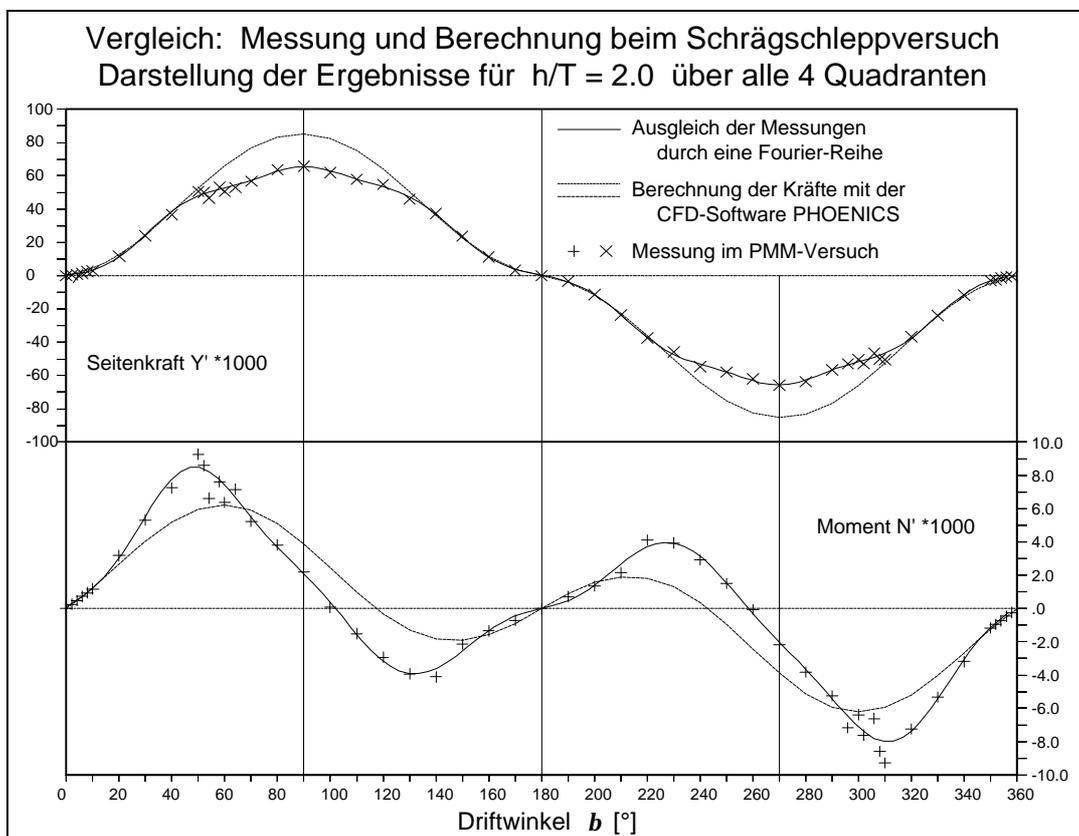


Abb. 3-25

3.4.2 Paneel-Verfahren

Neben Programmen, die wie PHOENICS nur stationäre Strömungszustände berechnen können, existieren auch Rechenverfahren für dynamische Vorgänge. Aus dem Bereich der Seegangsprogramme konnte die im Institut für Schiffstechnik Duisburg verfügbare Software WAMIT für diese Arbeit genutzt werden. Der Name als Abkürzung weist direkt auf die Quelle hin: "**Wave Analysis MIT**" - es wurde am **Massachusetts Institute of Technology in Cambridge/USA** erstellt [MIT/Newman, 1991]. Der Untertitel "A Radiation-Diffraction Panel Program for Wave-Body Interactions" bezeichnet sowohl das Verfahren als auch die Zielrichtung. Hauptanwendungsbereich ist die Berechnung der Seegangsbelastung auf meerestechnische Strukturen und der Bewegung von schwimmenden Körpern im Seegang, wobei auch komplizierte Geometrien und Mehrkörperprobleme auf tiefem und auf flachem Wasser bearbeitet werden können.

Eine Anwendung für Manövrierprobleme ist durch die freie Wahl der Bewegungsperiode T und damit der Bewegungsfrequenz ω gegeben. Die bei Seegangsfragen zur Bestimmung des Antwortverhaltens wichtigen hydrodynamischen Massen sind auch für das Manövrieren bei beschleunigten Bewegungen relevant. Für die beim Manövrieren niederfrequente Bewegung kann WAMIT diese Koeffizienten ohne weiteres berechnen. Eine Berücksichtigung der Vorausgeschwindigkeit ist jedoch nicht möglich. Damit sind die von WAMIT ebenfalls berechenbaren hydrodynamischen Dämpfungen für die Manövrierhydrodynamik uninteressant.

3.4.2.1 Durchgeführte Berechnungen

Für das auch bei PHOENICS verwendete Containerschiff wurde ein Datensatz mit der Schiffskörperbeschreibung (Geometric Data File - GDF) erstellt. Ausgehend von Spanten und Wasserlinien wurden meist durch vier, seltener auch durch drei Punkte begrenzte Paneele definiert, die die Schiffsform näherungsweise beschreiben. An Stellen starker Krümmung wurden kleinere, bei ebenen Bereichen größere Paneele vorgesehen. Der halbe Schiffskörper ist in Abbildung 3-26 in räumlicher Ansicht wiedergegeben. Die gepunkteten Pfeile stellen die Normalenvektoren dar und geben den wichtigen Hinweis auf die Orientierung der Paneele. Durch die "Rechtehandregel" wird aus der Reihenfolge der Anordnung der Punkte im Raum die Außenseite des jeweiligen Paneels festgelegt. Bei Testrechnungen hat sich gezeigt, daß durch falsche Orientierung eines einzigen Paneels Unterschiede in den Ergebnissen auftreten, die nicht mehr tolerierbar sind.

3. Identifikation der Koeffizienten

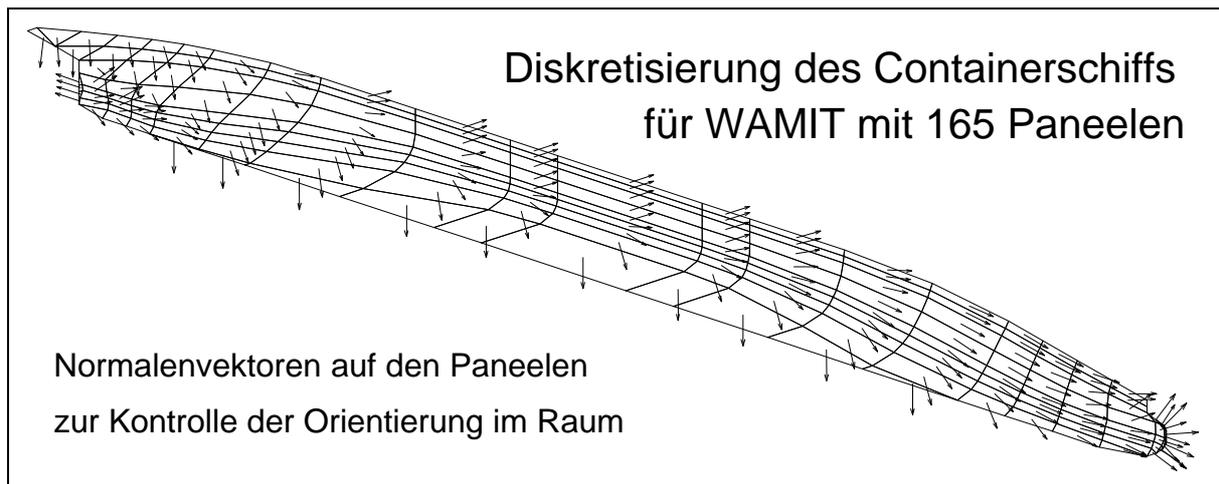


Abb. 3-26

Wegen der niedrigen Frequenz führte eine feinere Diskretisierung des Schiffskörpers, wie sie in Abbildung 3-27 wiedergegeben ist, zu kaum feststellbaren Änderungen in den Resultaten. Aus diesem Grund und wegen der geringeren Rechenzeiten wurde bei den endgültigen Berechnungen die erste Variante mit 165 Paneelen auf einer Schiffshälfte verwendet.

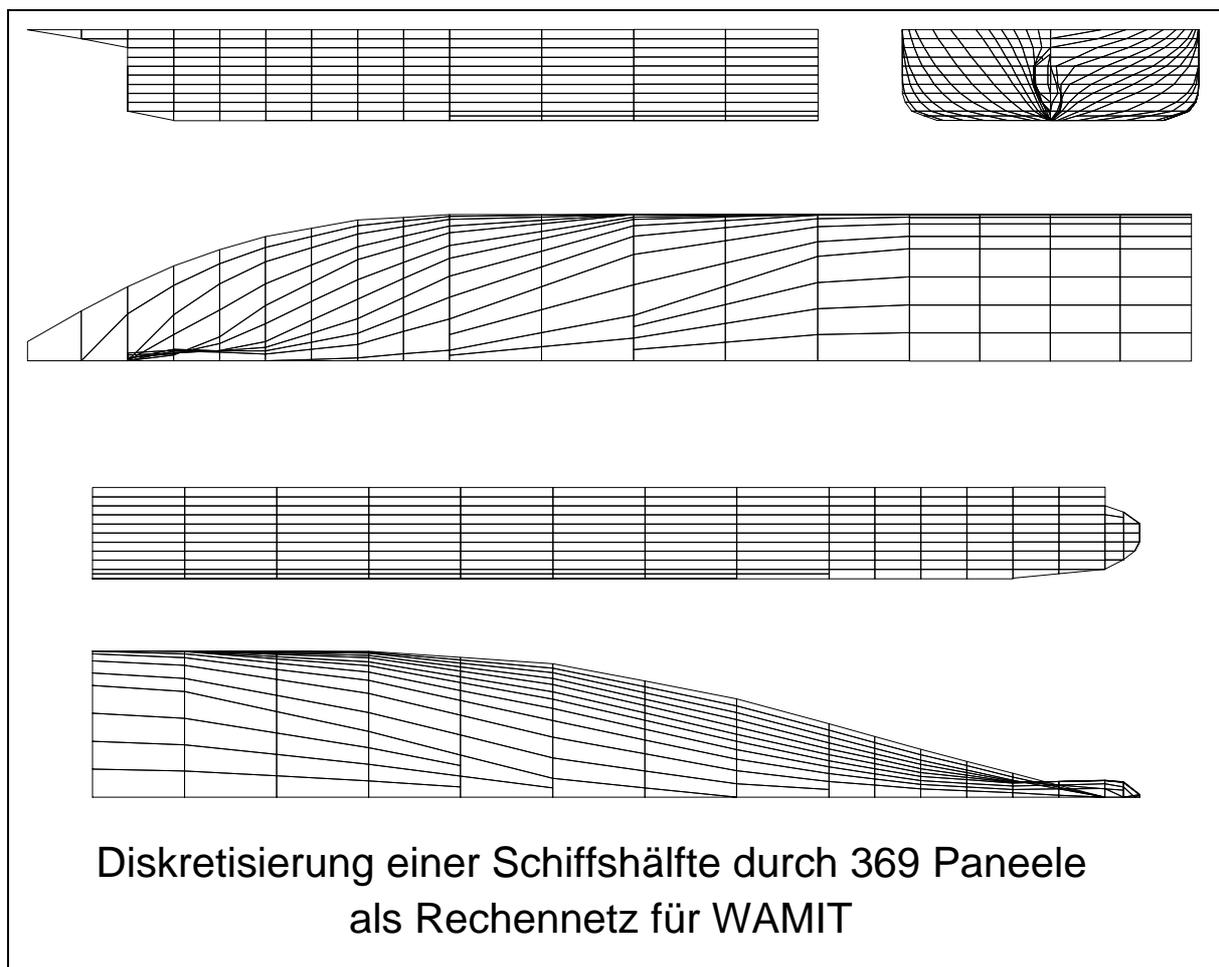


Abb. 3-27

3. Identifikation der Koeffizienten

In einer Vorstudie wurde der Frequenzeinfluß auf die hydrodynamischen Koeffizienten untersucht. Als Beispiel ist für den Beiwert $N_{\dot{\gamma}}$, das hydrodynamische Trägheitsmoment in bezug auf die Gierbewegung, die Zusammenfassung einer Vielzahl von Einzelrechnungen in Abbildung 3-28 wiedergegeben. Der Koeffizient ist mit der Wassertiefe als Parameter über der Kreisfrequenz der Großausführung aufgetragen. Die aus den stationären Berechnungen bekannte Vergrößerung der Koeffizienten mit abnehmender Wassertiefe kann bei geringen Frequenzen auch hier beobachtet werden, die maximalen Werte verschieben sich für größere Wassertiefen zu größeren Frequenzen hin.

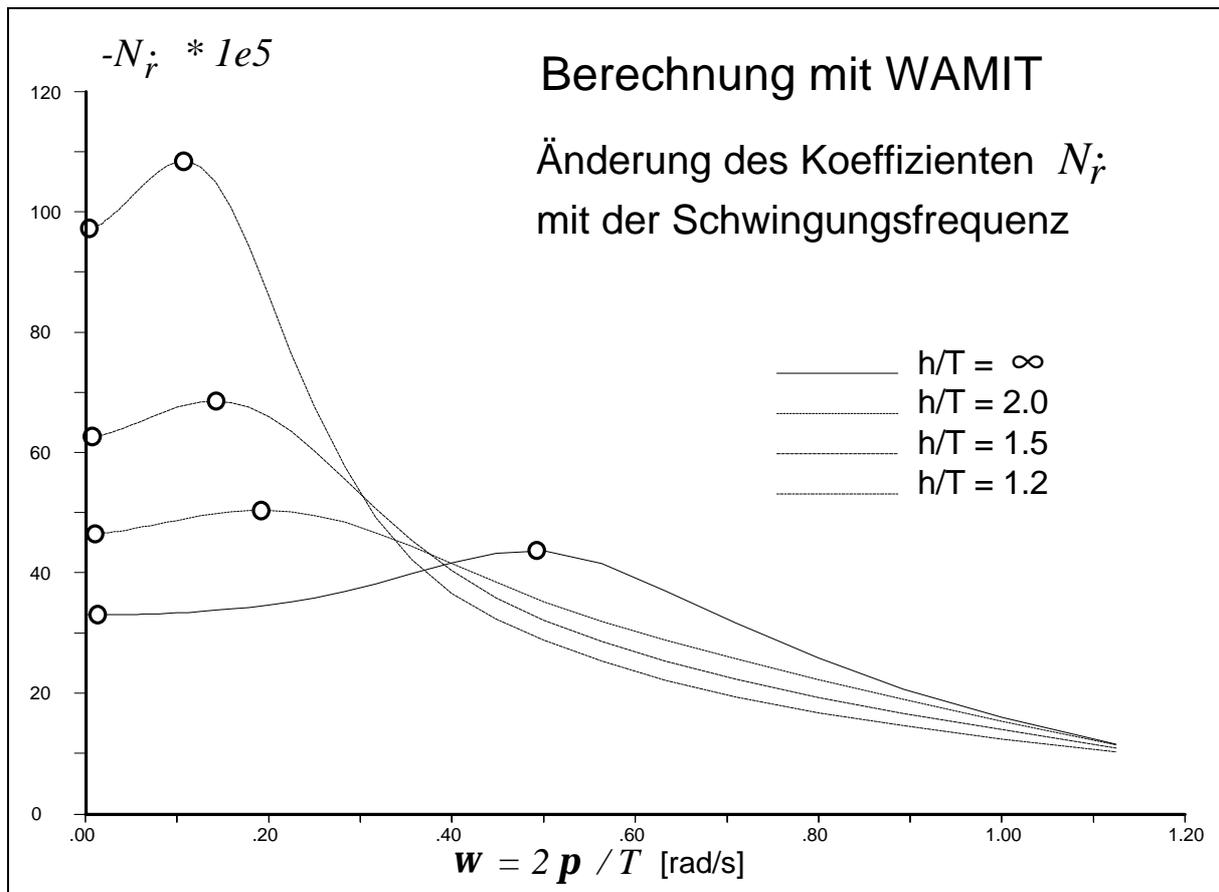


Abb. 3-28

In Abb. 3-28 sind zusätzlich die Kreisfrequenzen der ersten Kursschwingperiode T eines $30^\circ/10^\circ$ -Z-Manövers für ein vergleichbares gierstabiles Schiff bei den betrachteten Wassertiefen aufgetragen. Sie unterscheiden sich von den Scheitelpunkten der Kurven für $N_{\dot{\gamma}}$ um mehr als eine Ordnung und sind so nahe bei Null, daß bei den weiteren Berechnungen mit WAMIT für die Bestimmung der hydrodynamischen Koeffizienten generell der Fall der unendlichen Periode angenommen wurde.

3.4.2.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Resultate der Rechnungen mit WAMIT können in einer 6x6- Matrix alle hydrodynamischen Massen und Massenmomente umfassen, d.h. für alle 6 Freiheitsgrade der Bewegung und alle 6 Kräfte und Momente. Dies ist in Tabelle 3-6 dargestellt.

I \ J		F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
		1	2	3	4	5	6
\dot{u}	1	$X_{\dot{u}}$	$Y_{\dot{u}}$	$Z_{\dot{u}}$	$K_{\dot{u}}$	$M_{\dot{u}}$	$N_{\dot{u}}$
\dot{v}	2	$X_{\dot{v}}$	$Y_{\dot{v}}$	$Z_{\dot{v}}$	$K_{\dot{v}}$	$M_{\dot{v}}$	$N_{\dot{v}}$
\dot{w}	3	$X_{\dot{w}}$	$Y_{\dot{w}}$	$Z_{\dot{w}}$	$K_{\dot{w}}$	$M_{\dot{w}}$	$N_{\dot{w}}$
\dot{p}	4	$X_{\dot{p}}$	$Y_{\dot{p}}$	$Z_{\dot{p}}$	$K_{\dot{p}}$	$M_{\dot{p}}$	$N_{\dot{p}}$
\dot{q}	5	$X_{\dot{q}}$	$Y_{\dot{q}}$	$Z_{\dot{q}}$	$K_{\dot{q}}$	$M_{\dot{q}}$	$N_{\dot{q}}$
\dot{r}	6	$X_{\dot{r}}$	$Y_{\dot{r}}$	$Z_{\dot{r}}$	$K_{\dot{r}}$	$M_{\dot{r}}$	$N_{\dot{r}}$

Tab. 3-6

Die Restriktion auf "Horizontal Planar Motion", d.h. die ebene Bewegung auf der Wasseroberfläche, reduziert die Matrix um die Indizes 3, 4 und 5 für die Kräfte und Momente sowie für die Bewegungsarten Tauchen (\dot{w}), Rollen (\dot{p}) und Stampfen (\dot{q}). Die entsprechenden Felder sind dunkel hinterlegt. Des weiteren verschwinden einige Koeffizienten infolge der Symmetrie der Schiffsform um die Mittellängsebene (hell hinterlegte Felder). Für die verbleibenden 5 Koeffizienten sind die Ergebnisse für das Containerschiff in Abbildung 3-29 aufgetragen. Es kann nachgewiesen werden, daß bei potentialtheoretischen Berechnungen, auf denen WAMIT basiert, die Koeffizienten $Y_{\dot{r}}$ und $N_{\dot{v}}$ gleiche Werte aufweisen. Aus diesem Grund wurden Sie in einem Diagramm zusammengefaßt.

Zusätzlich zu den Berechnungsergebnissen sind die Resultate der Modellversuche [Gronarz, 1992] als mit Symbolen markierte Linien aufgeführt. Ferner existieren diverse brauchbare empirische Formeln für hydrodynamische Koeffizienten, von denen zwei ebenfalls in die Darstellung mit aufgenommen wurden, um die Bewertung zu erleichtern. Es handelt sich um die Formeln von Clarke [Clarke/Gedling/Hine 1983], die jedoch nur für Tiefwasser gelten, sowie die von Ankudinov [Ankudinov, 1993], die auch den Wassertiefeneinfluß berücksichtigen.

3. Identifikation der Koeffizienten

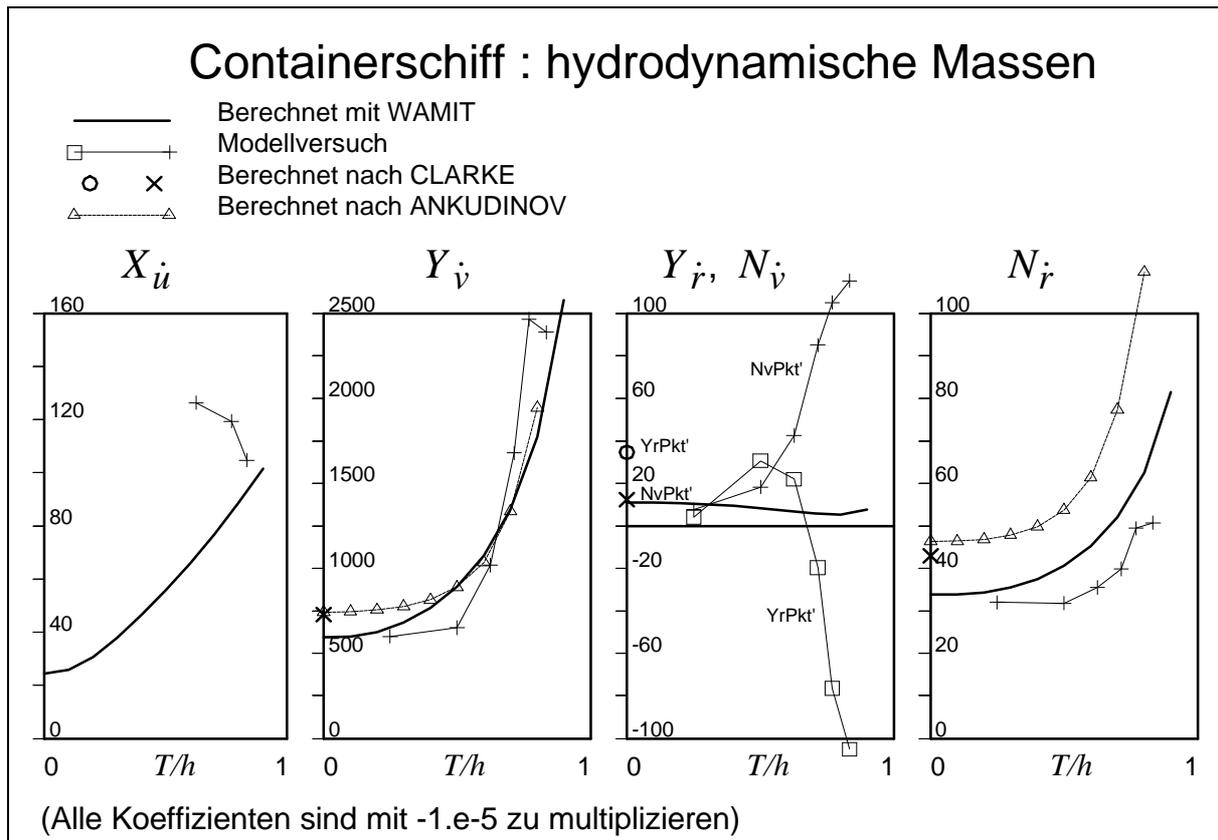


Abb. 3-29

Die hydrodynamische Masse X_{ii} ist relativ klein und folglich meßtechnisch schwierig zu identifizieren. Für sie sind keine empirischen Formeln angegeben, so daß in Abbildung 3-29 nur die Gegenüberstellung Messung im Modellversuch/Berechnung mit WAMIT verbleibt. Bezüglich der Größenordnung kann von einer Übereinstimmung gesprochen werden, wobei die Tendenz, bei Flachwasser größere Beträge anzunehmen, nur vom Berechnungsverfahren deutlich wiedergegeben wird.

Die besten Übereinstimmungen zeigen sich bei $Y_{\dot{v}}$, dessen Verlauf von allen Methoden mit guter Übereinstimmung wiedergegeben wird. Auf die Messung bezogen, liegt dies an der Größe dieses Beiwertes, der mit der trägen Schiffsmasse vergleichbar ist. Der manövrierhydrodynamische Beiwert $N_{\dot{r}}$ liegt im Vergleich mit den empirischen Formeln und den Messungen ebenfalls recht gut. Sowohl die Größenordnung als auch der Verlauf bei geringer werdender Wassertiefe werden korrekt berechnet.

Die meßtechnisch problematischen aber glücklicherweise relativ unbedeutenden Beiwerte $Y_{\dot{r}}$ bzw. $N_{\dot{v}}$ stimmen zwar im tiefen Wasser größenordnungsmäßig mit der Rechnung überein, verletzen jedoch im flachen Wasser die von der Theorie geforderte Symmetrie.

Um die Rechnungen mit WAMIT zu überprüfen, wurden für ein anderes schlankes Schiff ebenfalls die hydrodynamischen Massen berechnet. Es handelt sich um das klassische Untersuchungsobjekt für Manövrieruntersuchungen, das Mariner Typschiff. Es wurde vor allem deshalb ausgewählt, weil von Fujino [Fujino, 1986] Messungen auf verschiedenen Wassertiefen veröffentlicht wurden, die als Referenz von außerhalb der VBD herangezogen werden können. Für tiefes Wasser existieren dazu noch ausführliche Daten vom Hydro- und Aerodynamisk Laboratorium in Lyngby [Chislett/Strøm-Tejsen, 1965] und aus der Hamburgischen Schiffbauversuchsanstalt [Wolff, 1981]. Leider existiert in Duisburg kein Mariner-Modell, so daß von dieser Seite keine Versuchsdaten vorliegen. Dies ist insofern bedauernswert, als weder bei der Installation und Erprobung der PMM-Anlage in der VBD [Gronarz, 1986] noch zu einem späteren Zeitpunkt ein Vergleich von Messungen auf flachem Wasser mit den anerkannten Ergebnissen anderer Institute erfolgen konnte.

Der Spantenriß des Schiffes wurde digitalisiert, und aus den Aufpunkten wurden die Paneelecken zusammengestellt. Durch die Möglichkeit, beim Digitalisieren die Punkte auf den Spanten frei zu verteilen, wirkt die Paneelierung homogener als beim Containerschiff, siehe Abbildung 3-30. Der nicht über das vordere Lot ragende Bugwulst wurde stumpf abgeschlossen. Das Mariner-Schiff wurde bei den aufgeführten Kraftmessungen teilbeladen und hecklastig vertrimmt untersucht, da in diesem Zustand umfangreiche Großversuche durchgeführt wurden [Morse/Price, 1961]. Diese Schwimmlage wurde auch bei der Diskretisierung der Schiffsoberfläche für den Geometriedatensatz zugrunde gelegt.

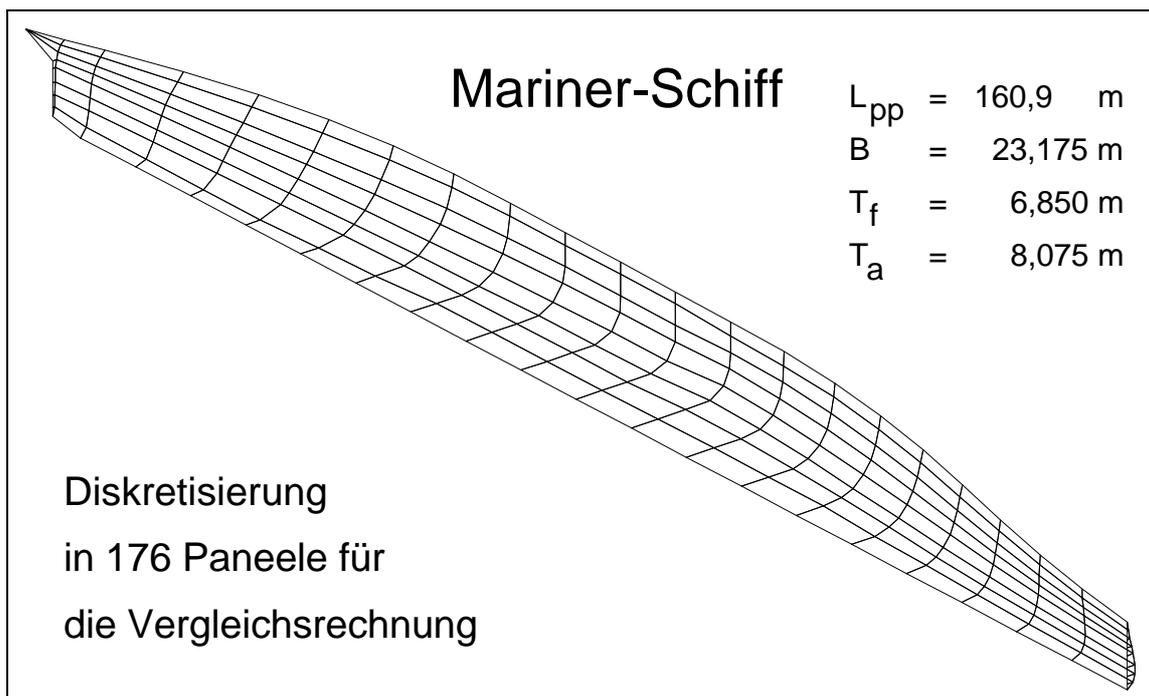


Abb. 3-30

3. Identifikation der Koeffizienten

Die Daten der anderen Versuchsanstalten für die hydrodynamischen Massen und Trägheiten lagen z.T. in anderer Darstellungsform vor (z.B. $[Y_{\dot{v}} - m]$ und $[N_{\dot{r}} - I_{zz}]$) und wurden hier auf den reinen hydrodynamischen Anteil umgerechnet. Die Qualität der Übereinstimmung kann mit Hilfe von Abbildung 3-31 beurteilt werden. Es ergibt sich ein annähernd gleiches Bild wie in Abbildung 3-29 für das Containerschiff. Die Folgerungen werden insofern bestätigt.

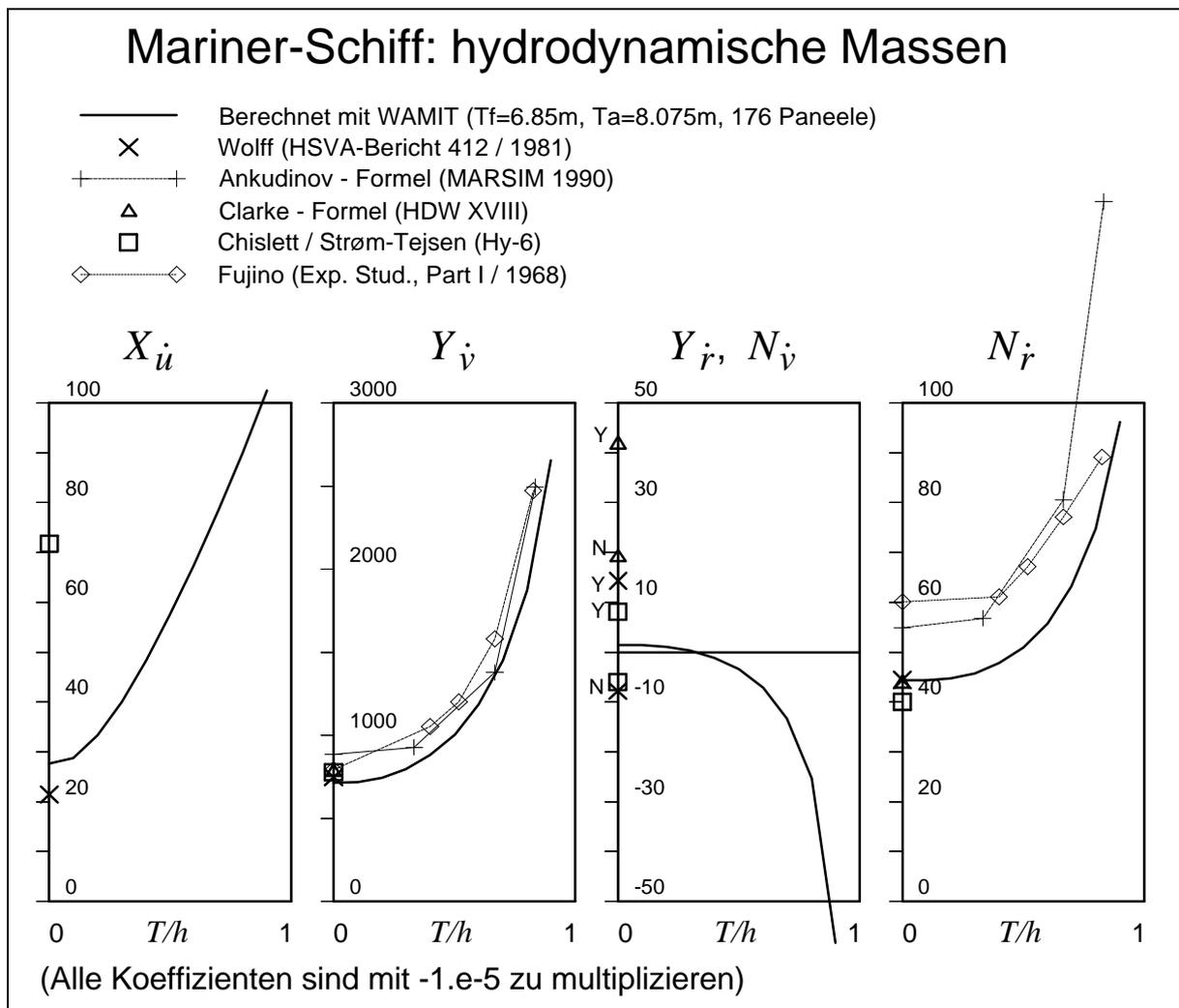


Abb. 3-31