Institut für Maritime Systeme und Strömungstechnik
Fachbereich Maschinenbau und Schiffstechnik
Universität Rostock

Projektarbeit

Numerische Untersuchungen des Einflusses von Formvariationen eines Containerschiffes auf Wellenwiderstand, Wellenbild und Schwimmlage

Michael Zimmermann

Matrikel-No: 096201991

Juni 2002

Selbständigkeitserklärung

Hiermit bestätige ich, Michael Zimmermann, die vorliegende Arbeit selbständig nach bestem Wissen und mit den vorliegenden Informationen erarbeitet zu haben. Alle Quellen und Hilfsmittel sind ordnungsgemäß angegeben.

Rostock im Juni 2002

Michael Zimmermann

Aufgabenstellung

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Theorie **3**

2.1 Problemstellung 3

2.2 Modellierung 4

2.3 Physikalisches Modell 6

2.3.1 Koordinatensystem 6

2.3.2 Grundgleichungen der Hydrodynamik 7

2.3.3 Potentialtheorie 8

2.3.4 Einfache Elemente der Potentialtheorie 9

2.3.5 Panelverfahren 11

2.3.6 Randbedingungen 13

2.4 Mathematisches und numerisches Modell 16

3 Das Programmsystem *Shallo* **17**

3.1 Allgemeine Bemerkungen 17

3.2 Geometrieerzeugung 17

3.3 Netzgenerierung 18

3.4 Berechnung 18

3.5 Ergebnisse und deren Interpretation 19

4 Das Wigley-Schiff **21**

4.1 Rumpfform 21

4.2 Geometrieerzeugung und Netzgenerierung 22

4.3 Netzfeinheit auf der Rumpfoberfläche 23

4.4 Linearisierte vs. nichtlineare Lösung der Oberflächenbedingung 26

4.5 Vernetzung der Wasseroberfläche 29
4.6 Maßstabseffekte 31
4.7 Zusammenfassung 32

5 Containerschiff No. 2280 33
5.1 Geometrieerzeugung 34
5.2 Vernetzung und Netzfeinheit 34
5.3 Vernetzung der Wasseroberfläche 37
5.4 Ergebnisse 39
5.5 Zusammenfassung 41

6 Globale Formvariationen 43
6.1 Affine Verzerrungen 43
6.1.1 Varianten 43
6.1.2 Ergebnisse 44
6.2 Paralleles Mittelschiff 49
6.2.1 Varianten 49
6.2.2 Ergebnisse 50
6.3 Zusammenfassung 54

7 Lokale Formänderungen im Bugbereich 57
7.1 Varianten 57
7.2 Geometrieerzeugung und Netzgenerierung 58
7.3 Ergebnisse 59
7.3.1 Wellenwiderstand 59
7.3.2 Druckverteilung 60
7.3.3 Trimm und Absenkung 63
7.3.4 Wellenbild 64
7.4 Zusammenfassung 66

8 Fazit und Ausblick 67

Literaturverzeichnis 69

A Abkürzungs- und Symbolverzeichnis 71
A.1 Abkürzungen 71

A.2 Formelzeichen 71

B Definitionsdatei des Containerschiffs No. 2280 für *Napa* 73

C Programme 77

C.1 WigMesh 77

C.2 GenMesh 79

C.3 Transform 79

C.4 TransformParallel 80

D How-To - Transformation of ship hulls using the *Napa* transformation module 81

D.1 General 81

D.2 Step-by-Step 81

D.3 Remarks 83

Tabellenverzeichnis

Das Wigley-Schiff

4.1 Untersuchte Netze für die Rumpfoberfläche des Wigley-Schiffs 23

4.2 Wellenwiderstandsbeiwert in Abhängigkeit von Netzfeinheit und Froude-Zahl 24

Containerschiff No. 2280

5.1 Hauptabmessungen des Containerschiffes No. 2280 33

Globale Formvariationen

6.1 Hauptabmessungen der affin verzerrten Schiffe 44

6.2 Hauptabmessungen der Varianten mit parallelem Mittelschiff 49

Abbildungsverzeichnis

Theorie

2.1 Methodik der Modellierung eines ingenieurwissenschaftlichen Problems . . 5

2.2 Koordinatensystem und Gebietsdefinition 7

2.3 Diskretisierung eines Zylinders für die potentialtheoretische Berechnung der Umströmung bei paralleler, ebener Anströmung 12

Das Wigley-Schiff

4.1 Perspektivische Ansicht 22

4.2 Vernetzung eines Wigley-Schiffes mit 220 Panels 23

4.3 Widerstandsbeiwert für verschiedene Netze 25

4.4 Benetzte Oberfläche in Fahrt 25

4.5 Wellenbild 26

4.6 Druckverteilung auf der Rumpfoberfläche 27

4.7 Wellenwiderstandsbeiwerte für unterschiedliche Behandlung der Randbedingung an der Wasseroberfläche 28

4.8 Absenkung für unterschiedliche Behandlung der Oberflächenbedingung . . 29

4.9 Wellenwiderstandsbeiwerte für zwei ähnliche, in Längsrichtung versetzte Netze an der Wasseroberfläche 30

4.10 Wellenbild für zwei Netze an der Wasseroberfläche 30

4.11 Einfluss von Maßstabseffekten auf den Wellenwiderstandsbeiwert 31

Containerschiff No. 2280

5.1 Containerschiff No. 2280 - Ansicht von schräg vorne 34

5.2 Spantarealkurve 35

5.3 Druckverteilung auf der Rumpfoberfläche 36

5.4 Druckverteilung für zwei Vernetzungsvarianten des Rumpfes 37

5.5 Netz des Containerschiffes 37

5.6 Druckverteilung bei zwei Netzen für die Wasseroberfläche 38
5.7 Wellenbild für zwei ähnliche, versetzte Netze an der Wasseroberfläche . . . 38
5.8 Wellenwiderstandsbeiwert 39
5.9 Vergleich des Widerstands von Experiment und Berechnung 40
5.10 Trimm nach Berechnung und Experiment 41

Globale Formvariationen - Affine Verzerrungen

6.1 Seitenansicht der untersuchten Schiffsformen 44
6.2 Wellenwiderstandsbeiwerte 45
6.3 Druckverteilung 46
6.4 Trimm 47
6.5 Tauchung 48
6.6 Wellenbild 48

Globale Formvariationen - Paralleles Mittelschiff

6.7 Seitenansicht der Varianten 50
6.8 Wellenwiderstandsbeiwerte 51
6.9 Druckverteilung 52
6.10 Trimm 52
6.11 Absenkung 53
6.12 Wellenbilder 54
6.13 Benetzte Oberfläche in Fahrt 54

Lokale Formänderungen im Bugbereich

7.1 Seitenansicht der drei Varianten mit Bugwulst 58
7.2 Seitenansicht von zwei Varianten ohne Bugwulst 58
7.3 Wellenwiderstandsbeiwerte 60
7.4 Druckverteilung 61
7.5 Druckverteilung im Bugbereich 62
7.6 Absenkung 63
7.7 Trimm 64
7.8 Wellenbild 65
7.9 Benetzte Oberfläche in Fahrt 65

Anhang

C.1 Screenshot des Programms *WigMesh* 78

C.2 Screenshot des Programms *GenMesh* 79
C.3 Screenshot des Programms *Transform* 80
C.4 Screenshot des Programms *TransformParallel* 80

Teil 1

Einleitung

Models now in tanks we tow
All of that to Froude we owe
Will computers, fast and new,
Make us alter Euler's view?

Marshall Tulin

In der Schiffbauindustrie, wie auch in vielen anderen Bereichen der Wirtschaft, ist in den letzten Jahren ein steigender Wettbewerb zu verzeichnen. Aufträge werden oft an die Unternehmen vergeben, die eine äußerst kurze „time to market“, also die Ablieferung eines Schiffes innerhalb eines sehr kurzen Zeitraums, bieten können. Durch die Auftraggeber werden noch vor der Auftragsvergabe zunehmend umfangreichere Informationen über die Leistungen des projektierten Schiffes verlangt.

Um diese Forderungen zu erfüllen und hierdurch sich im Wettbewerb durchzusetzen, sind die Unternehmen gefordert, neben einer guten betriebsinternen Organisation der Arbeitsabläufe die Möglichkeiten der modernen rechnergestützten Konstruktion und Fertigung auszunutzen. Hierdurch läßt sich insbesondere in der Anfangsphase eines Projektes die Effektivität steigern sowie die Wahrscheinlichkeit von später erkennbar werdenden Entwicklungsfehlern minimieren.

So ist es für die Projektphase eines Entwurfs im Bereich der Hydrodynamik vielfach üblich, umfangreiche Informationen zu Schiffswiderstand, Wellenbild wie auch Antriebsleistung zu liefern. Eine Abschätzung der Seegangseigenschaften und Steuerbarkeit wird ebenfalls erarbeitet. Dies ermöglicht es dem Auftraggeber, noch vor der Signierung des Bauvertrages die Güte der unterbreiteten Angebote zu analysieren und entsprechend zu entscheiden.

Im Bereich der Widerstandsprognose werden für die erforderliche Optimierung der Schiffsform wie auch für die Bestimmung der oben genannten relevanten, die Leistungsfähigkeit eines Schiffes charakterisierenden Parameter vielfach numerische Verfahren eingesetzt. Diese ermöglichen es, kostengünstig und innerhalb eines kurzen Zeitraumes Varianten zu untersuchen und hierdurch gezielt globale Formparameter wie auch lokale Details zu optimieren.

Bis vor wenigen Jahren war die numerische gestützte Ermittlung der hydrodynamischen

Eigenschaften ausschließlich mit Hilfe von Näherungsverfahren bzw. durch experimentelle Untersuchungen möglich. Die steigenden Rechenkapazitäten wie auch der Preisverfall ermöglichen es heute, exaktere numerische Modelle für diese Aufgaben heranzuziehen. So man die prognostizierte Entwicklung der Rechentechnik in den nächsten Jahrzehnten betrachtet, erscheint es möglich, dass mit Hilfe von numerischen Verfahren ein stetig anwachsender Teil der erforderlichen Daten im Bereich der Hydrodynamik eines Schiffes gewonnen wird. Der sog. „Numerische Schlepptank“ würde den herkömmlichen Schleppkanal ersetzen.

Aufbauend auf diesen angesprochenen numerischen Verfahrensweisen wurde im Rahmen der vorgestellten Arbeit der Einfluss lokaler wie auch bestimmter globaler Formparameter auf die Eigenschaften eines Schiffes am Beispiel eines schnellen Containerschiffes untersucht. Als Programmsystem für die Bestimmung der hydrodynamischen Eigenschaften wurde das Programmsystem *Shallo* der *HSVA* eingesetzt. Dieses wird in Teil 3 näher beschrieben.

Während sich Teil 2 mit einer grundlegenden Einführung in die Theorie der in *Shallo* verwendeten Methodik befasst, werden in den Teilen 4 bis 7 die betrachteten Varianten sowie die hierbei erzielten Ergebnisse vorgestellt.

Eine Validierung des Berechnungsprogrammes *Shallo* wie auch der Arbeitsweise des Autors wurde an Hand des in der Literatur vielfach erwähnten Wigley-Schiffes durchgeführt, siehe Teil 4. Die Verifizierung der ermittelten Ergebnisse für eine nicht modifizierte Rumpfform wird in Teil 5 durch Vergleich mit experimentell gewonnenen Daten durchgeführt.

Teil 6 befaßt sich mit globalen Formvariationen und deren Auswirkungen. Die Folgen affiner Verzerrungen wie auch der Effekt eines parallelen Mittelschiffes werden dargestellt.

In Teil 7 werden die Ergebnisse für Formänderungen im Bugbereich vorgestellt. Hierfür wurden drei unterschiedliche Formen mit Bugwulst wie auch zwei Varianten ohne Bugwulst untersucht.

Abschließend gibt Teil 8 eine Zusammenfassung der Ergebnisse. Aspekte, die weiterer Untersuchungen bedürfen, werden benannt.

Teil 2

Theorie

Grundlage jedes numerischen Berechnungsverfahrens ist eine ausführliche theoretische Auseinandersetzung mit der zu untersuchenden Problematik dar. Hierbei werden die vorhandenen Zusammenhänge analysiert und anschließend mathematisch eindeutig beschrieben.

Eine grundlegende Beschreibung der in dieser Arbeit zu bearbeitenden Problemstellung wird in Kap. 2.1 gegeben. Die zu berücksichtigenden Rahmenbedingungen wie auch die vorgenommenen Annahmen werden benannt. Die Umsetzung der in Kap. 2.2 vorgestellten Methodik zur Modellierung und Lösung einer derartigen Aufgabe wird in den Folgekapiteln 2.3 und 2.4 beschrieben.

2.1 Problemstellung

Die Strömungsverhältnisse in der Umgebung eines Schiffsrumpfes sind komplex und vielfältig. So wird u. a. durch die Bewegung des Schiffsrumpfes relativ zum umgebenden Flüssigkeitsgebiet ein Wellenbild erzeugt; insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten sind vielfach die Bildung von brechenden Wellen im Vor- und Hinterschiffsbereich zu verzeichnen. Auf Grund der Zähigkeit des Wassers wird eine Grenzschicht ausgebildet; Ablösegebiete und Wirbelbildung sind zu beobachten. Befindet sich das Schiff im Seegang, so sind dynamische Einflüsse ebenfalls zu beachten.

Während der Entwurfsphase eines Schiffes ist es vielfach notwendig, die hydrodynamischen Eigenschaften eines Schiffes beurteilen zu können[1]. Häufig werden experimentelle Untersuchungen eingesetzt, um präzise Daten zu gewinnen. Da allerdings derartige Untersuchungen kosten- und zeitaufwendig sind, wird insbesondere in der frühen Entwurfsphase vielfach auf numerische Methoden zurückgegriffen. Diese bieten die Möglichkeit, schnell und kostengünstig Informationen über die Auswirkungen von Modifikationen am Schiffsrumpf zu gewinnen.

[1] So ist die für die geforderte Dienstgeschwindigkeit benötigte Antriebsleistung entscheidend für die Auswahl der Hauptmaschine. Der Schiffswiderstand beeinflusst auf Grund der Brennstoffkosten die Betriebskosten entscheidend.

Auch in einem Zeitalter, in dem die Rechenleistung weiterhin exponentiell anwächst, ist es z. Zt. nicht möglich, die Gesamtheit dieser physikalischen Effekte hinreichend genau zu berücksichtigen. Weiterhin ist in einigen Bereichen wie z. B. bei Turbulenzerscheinungen die Theorie nicht ausreichend weit entwickelt, um die Wirklichkeit exakt durch mathematische Formulierungen wiederzugeben. Beschränkte Rechenkapazitäten machen es z. T. unmöglich, eine sehr komplexe Modellierung bestimmter Aspekte zu verwenden..

Häufig werden daher Teilprobleme untersucht, die keinen bzw. nur geringen Einfluss auf andere Teilprobleme ausüben. Vereinfachungen der physikalischen Effekte zielen darauf ab, den Aufwand zu verringern. Es ist hierbei sicherzustellen, dass eine wesentliche Verfälschung der Ergebnisse ausgeschlossen werden kann.

Der Gesamtwiderstand eines Schiffes kann im wesentlichen auf zwei Widerstandsanteile zurückgeführt werden, nämlich viskoser Widerstand und Wellenwiderstand. Der Beitrag dieser Widerstandsanteile zum Gesamtwiderstand ist abhängig von der Froude-Zahl [1].

Da gravitations- und zähigkeitsbedingte Effekte bei der stationären Umströmung eines Schiffes nur schwach korreliert sind, ist es möglich, diese Effekte getrennt zu untersuchen. Die Kombination der Ergebnisse liefert ein Resultat, das das Verhalten des Schiffes im Fluid wirklichkeitsgetreu[2] wiedergibt.

Zur Bestimmung des Reibungswiderstands eines Schiffes wird vielfach eine durch die ITTC[3] erarbeite Methodik verwendet. Neue, numerische Verfahren basieren auf den sog. RANS-Gleichungen[4].

Während frühe Verfahren zur Bestimmung des Wellenwiderstands - zu nennen sind u. a. die Theorie des dünnen Schiffes von Michel (1898) und die Theorie des schlanken Schiffes (Noblesse, 1983) - nicht praktikable Einschränkungen hinsichtlich der Geometrie des Schiffes voraussetzen, erlauben moderne Verfahren die Wellenwiderstandsbestimmung für beliebige Schiffsformen.

Bei numerischen Verfahren ist allerdings zu berücksichtigen, dass durch Vereinfachungen bzw. numerische Ungenauigkeiten die Ergebnisse durch Fehler verfälscht werden können. Daher ist die Verläßlichkeit derartiger Berechnungen kritisch zu hinterfragen. Es sind, so die erwünschte Genauigkeit nicht a priori garantiert werden kann, die erzielten Ergebnisse durch andere Verfahren[5] zu validieren.

2.2 Modellierung

Für die Modellierung eines Problems in den Ingenieurswissenschaften, aber auch in anderen Bereichen, hat sich vielfach ein mehrstufiges Vorgehen bewährt. Dieses ist in Abb.

[2] Wirklichkeitsgetreu bedeutet in diesem Zusammenhang, dass ein Ergebnis erzielt wird, welches mit den „tatsächlichen“ Zuständen weitgehend übereinstimmt.

[3] International Towing Tank Conference

[4] Reynolds Averaged Navier Stokes Gleichungen

[5] Dies können Vergleichsrechnungen an ähnlichen Schiffen sein, für die numerische wie auch experimentell gewonnene Daten verfügbar sind. Modellversuche sind ein weiteres bewährtes Verfahren, um in der Entwurfsphase ausreichend präzise Daten zu gewinnen.

2.1 dargestellt.

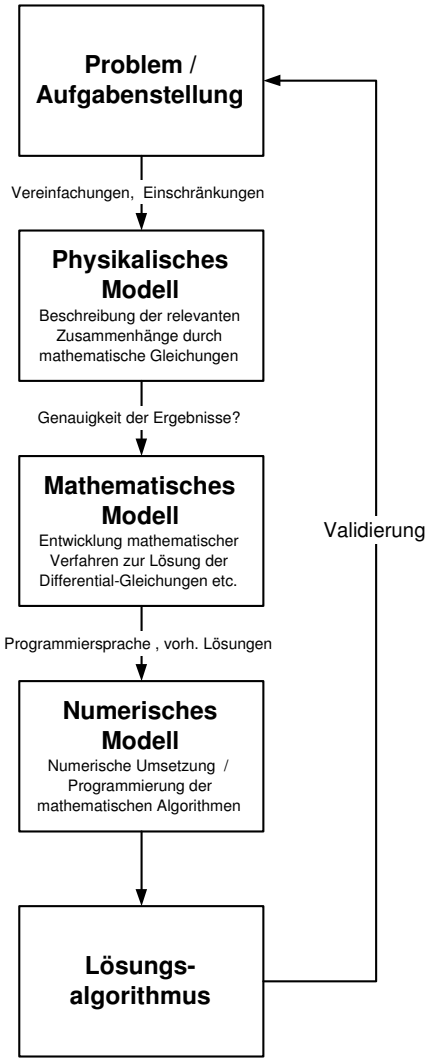

Abb. 2.1: Methodik der Modellierung eines ingenieurwissenschaftlichen Problems

Ausgehend von der zu analysierenden Problematik werden in einem ersten Schritt alle relevanten Zusammenhänge und Effekte bestimmt. Die Güte der letztlich erzielten Ergebnisse hängt hierbei vom Umfang bzw. der Anzahl der berücksichtigten Effekte ab. Daher ist in diesem Schritt darauf zu achten, dass, abhängig von der angestrebten Genauigkeit, die für diese Problemstellung entscheidenden Parameter untersucht werden. Es sollte vermieden werden, dass nicht relevante bzw. die Ergebnisse nur sehr gering beeinflussende Effekte ebenfalls mit einbezogen werden, da hierdurch die Komplexität des Problems wie auch die Fehlermöglichkeiten anwachsen sowie der numerische Aufwand für die Lösung stark steigt.

Für die identifizierten und als relevant eingestuften Effekte wird in einem zweiten Schritt

das Problem mit Hilfe von mathematischen Gleichungen beschrieben; die erforderlichen Anfangs- oder Randbedingungen werden erarbeitet. Sollten für einige Aspekte keine ausreichenden theoretischen Erkenntnisse verfügbar sein, sind geeignete Ersatzmodelle zu wählen. Auch hier wiederum ist, so mehrere mögliche Repräsentationen existieren, eine Entscheidung für eine geeignete Umsetzung zu treffen. Exaktheit, Anwendbarkeit sowie numerischer Aufwand sind Gründe, die diese Auswahl beeinflussen. Weiterhin sind die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Effekten zu bestimmen; ein Gesamtsystem ist zu erarbeiten, welches die realen Zustände geeignet widerspiegelt.

Ausgehend von diesem physikalischen Modell werden Verfahren erarbeitet, die eine numerische Lösung ermöglichen. Hierfür wird ein mathematisches Modell entwickelt, durch welches z. B. die gegebenen Differentialgleichungssysteme gelöst werden.

Im Rahmen des numerischen Modells wird die Umsetzung der erarbeiteten Verfahrensweise zu einem Programm durchgeführt. Dieser Schritt ist stark abhängig von den zur Verfügung stehenden Möglichkeiten wie z. B. spezielle mathematische Software, Programmiersprachen oder Bibliotheken. Die bevorzugte Lösung wird weiterhin durch die Fähigkeiten des Bearbeitenden wie auch durch eventuell bereits vorhandene Teillösungen bestimmt.

Nach der vollständigen Erarbeitung des Verfahrens wird letztlich die Funktionsfähigkeit dieser Lösung mit Hilfe von geeigneten Testfällen validiert. Hierzu wird im Bereich der Hydrodynamik vielfach auf verfügbare Ergebnisse von experimentellen wie auch numerischen Untersuchungen an Beispielschiffen zurückgegriffen[6].

2.3 Physikalisches Modell

Das physikalische Modell beschreibt die für die Lösung der Aufgabenstellung erforderlichen Gegebenheiten eindeutig und bildet die Basis für die anschließende Entwicklung des mathematischen und numerischen Modells. Im folgenden werden die Grundgleichungen der Hydrodynamik wie auch die für das hier untersuchte Problem gültigen Gleichungen dargestellt. Werden Vereinfachungen durchgeführt, so werden diese benannt.

2.3.1 Koordinatensystem

Wie im Schiffbau allgemein üblich wird ein kartesisches Koordinatensystem verwendet. Der Ursprung ist im hinteren Lot auf Höhe der Unterkante des Kiels definiert. Die Schiffslängsachse ist x-Achse; die y-Achse verläuft orthogonal zur Mittschiffsebene. Dies ist in Abb. 2.2 dargestellt.

Das für die Berechnungen berücksichtigte Flüssigkeitsgebiet wird mit Ω bezeichnet. Ω_S beschreibt die benetzte Oberfläche des Schiffsrumpfes. Diese variiert in Abhängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit, welche gleich der Anströmgeschwindigkeit U_∞ ist.

[6] Bekannt sind insbesondere das Wigley-Schiff, siehe Kapitel 4, sowie Schiffe der Serie 60.

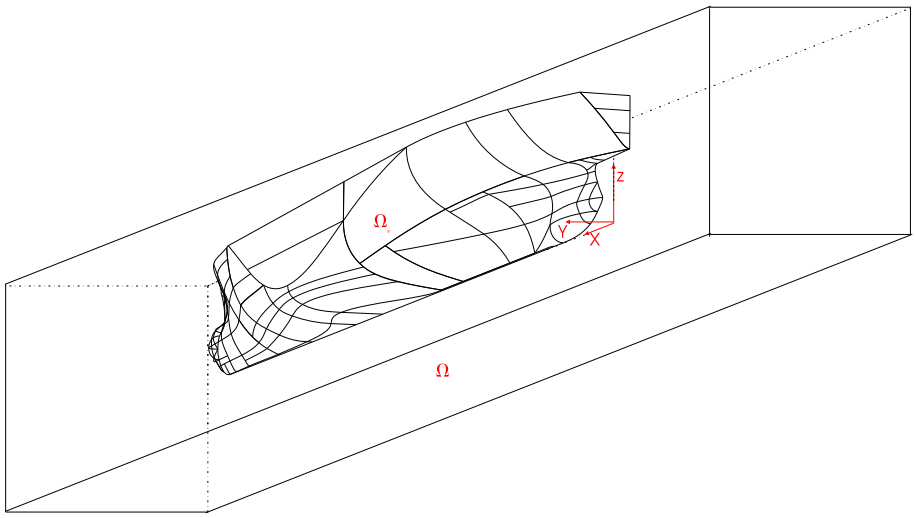

Abb. 2.2: Koordinatensystem und Gebietsdefinition am Beispiel eines Containerschiffes

2.3.2 Grundgleichungen der Hydrodynamik

Die Kontinuitätsgleichung besagt, dass der Massenstrom über die Grenzen eines infinitesimal kleinen Kontrollvolumens dV gleich Null ist. Werden die Geschwindigkeitskomponenten in die Hauptkoordinatenachsen $\vec{x} = (x, y, z)^T$ mit $\vec{u} = (u, v, w)^T$ bezeichnet, so läßt sich dies wie folgt ausdrücken[7]:

$$\frac{\delta\left(\rho\vec{u}\right)}{\delta\vec{x}} + \nabla\left(\rho\vec{u}\right) \qquad \text{in} \qquad dV \tag{2.1}$$

Bei der Umströmung eines Schiffes treten nur geringe Drücke auf, so dass der Einfluss der Kompressibilität des umströmenden Mediums, d. h. von Wasser, vernachlässigbar gering ist. Insofern werden im folgenden nur inkompressible Strömungen betrachtet. Für die Dichte gilt $\rho = const$. Hierfür kann Gl. 2.1 überführt werden zu:

$$u + v + w = 0 \qquad \text{in} \qquad dV \tag{2.2}$$

Die Navier-Stokes-Gleichungen[8] sind geeignet, die Umströmung eines Schiffes in seiner Gesamtheit exakt, d. h. drei-dimensional, instationär und für ein kompressibles Fluid, zu beschreiben. Diese basieren auf dem Impulserhalt der Strömung.

$$\rho f_x - \frac{\delta p}{\delta x} + \mu\left(\frac{\delta^2 u}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta z^2}\right) = \rho\frac{du}{dt} \tag{2.3}$$

$$\rho f_y - \frac{\delta p}{\delta y} + \mu\left(\frac{\delta^2 v}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 v}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 v}{\delta z^2}\right) = \rho\frac{dv}{dt} \tag{2.4}$$

$$\rho f_z - \frac{\delta p}{\delta z} + \mu\left(\frac{\delta^2 w}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 w}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 w}{\delta z^2}\right) = \rho\frac{dw}{dt} \tag{2.5}$$

[7] Durch den Operator ∇ wird ausgedrückt: $\nabla = (\delta/\delta x, \delta/\delta y, \delta/\delta z)$
[8] Benannt nach Claude Navier und Sir George Stokes

Dabei beschreibt f_i eine Volumenkraft in den drei Koordinatenhauptachsen $i = x, y, z$, p den Druck, μ die Viskosität der Flüssigkeit und t die Zeit. Der Operator d/dt beschreibt Ableitungen nach der Zeit; ortsbezogene Ableitungen werden, mit i stellvertretend für die entsprechende Koordinatenrichtung, durch $\delta/\delta i$ kenntlich gemacht.

Werden Navier-Stokes-Gleichungen und die Kontinuitätsgleichung gekoppelt, so entsteht ein System nichtlinearer Differentialgleichungen, deren analytische Lösung für die komplexen Strömungsverhältnisse in der Umgebung eines Schiffsrumpfs nicht möglich ist.

2.3.3 Potentialtheorie

Werden die Reibung und somit auch Turbulenzeffekte vernachlässigt, so erhält man aus den Navier-Stokes-Gleichungen die sog. Euler-Gleichungen:

$$\begin{aligned}
\rho\left(\frac{du}{dt} + u\frac{\delta u}{\delta x} + v\frac{\delta u}{\delta y} + w\frac{\delta u}{\delta z}\right) &= \rho f_x - \frac{\delta p}{\delta x} \\
\rho\left(\frac{dv}{dt} + u\frac{\delta v}{\delta x} + v\frac{\delta v}{\delta y} + w\frac{\delta w}{\delta z}\right) &= \rho f_y - \frac{\delta p}{\delta y} \\
\rho\left(\frac{dw}{dt} + u\frac{\delta w}{\delta x} + v\frac{\delta w}{\delta y} + w\frac{\delta w}{\delta z}\right) &= \rho f_z - \frac{\delta p}{\delta z}
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Wird weiterhin eine drehungsfreie Strömung vorausgesetzt, d. h.

$$\nabla \times \vec{u} = 0 \tag{2.7}$$

, so gelangt man zu den sog. Potentialströmungen.

Potentialströmungen zeichnen sich dadurch aus, dass die Komponenten des Geschwindigkeitsvektors nicht mehr unabhängig voneinander, sondern über das Potential ϕ gekoppelt sind. Es ist also ausreichend, eine Lösung für das Potential ϕ zu berechnen. Durch Ableitung des Potentials in die gewünschte Raumrichtung erhält man die Geschwindigkeitskomponente für diese Richtung.

$$\vec{u} = \nabla\phi \tag{2.8}$$

Die Kontinuitätsgleichung 2.2 für inkompressible Fluide kann für Potentialströmungen in die sog. Laplace-Gleichung überführt werden:

$$\Delta\phi = \frac{\delta^2\phi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2\phi}{\delta y^2} + \frac{\delta^2\phi}{\delta z^2} = 0 \tag{2.9}$$

Berücksichtigt man als Volumenkraft nur die Schwerkraft g, also

$$\vec{f} = (0, 0, -g)^T \tag{2.10}$$

, so erhält man aus Gl. 2.6 die Bernoulli-Gleichung.

$$\frac{d\phi}{dt} + \frac{1}{2}\left(\nabla\phi\right)^2 - gz + \frac{p}{\rho} = const \tag{2.11}$$

Für Potentialströmungen sind in den Gleichungen Druck und Geschwindigkeit entkoppelt. Dies bedeutet, dass, so die Geschwindigkeit gesucht ist, die Lösung der Laplace-Gleichung ausreicht.

Da die Laplace-Gleichung linear in ϕ ist, kann die Lösung des Gesamtproblems aus Einzellösungen zusammengesetzt werden. Es ist daher möglich, das für eine Lösung gesuchte Potential ϕ durch Überlagerung von n Funktionen φ_i anzunähern.

$$\phi(x, y, z, t) \approx \sum_{i=1}^{n} a_i(t)\varphi_i(x, y, z) \tag{2.12}$$

Die Faktoren $a_i(t)$ bestimmen den zeitabhängigen Einfluss der Einzellösungen $\varphi_i(x, y, z)$ auf die Gesamtlösung. Da nur eine begrenzte Anzahl von Einzellösungen für die Berechnung herangezogen werden kann, ist nur eine Annäherung an die exakte Lösung von ϕ möglich. Für $n \to \infty$ nähern sich exakte Lösung der Laplace-Gleichung und Näherungslösung an. Der Fehler verringert sich gemäß:

$$\Delta\varepsilon \to 0 \qquad \text{für} \qquad n \to \infty \tag{2.13}$$

Auf Grund der Linearität der Laplace-Gleichung ist es möglich, die Umströmung eines Schiffes durch die Verwendung einfacher Elemente[9], d. h. z. B. durch Quellen, Senken, Wirbel oder Dipole, zu konstruieren. Komplexere und numerisch aufwendigere Elemente werden eingesetzt, sofern eine höhere Genauigkeit der Ergebnisse erzielt werden soll, siehe Abschnitt 2.3.5.

2.3.4 Einfache Elemente der Potentialtheorie

Durch Superposition einfacher Funktionen φ_i, im folgenden Elemente genannt, welche die Bedingungen der Potentialtheorie erfüllen, ist es möglich, für komplexe Probleme eine Lösung zu erzielen.

Abgesehen von der Parallelströmung sind die im folgenden vorgestellten Funktionen singulär. Dies bedeutet, dass die Laplace-Gleichung nicht im Zentrum des jeweiligen Elementes erfüllt ist. Stattdessen gilt mit r als Abstand vom Mittelpunkt:

$$|\vec{u}| \to \infty \qquad \text{für} \qquad r \to 0 \tag{2.14}$$

Eine Anwendung dieser sog. Singularitätenverfahren setzt daher voraus, dass die Elemente nicht im untersuchten Flüssigkeitsgebiet Ω angeordnet sind.

2.3.4.1 Parallelströmung

Bewegt sich ein Schiff relativ zum Wasser, so ist das Geschwindigkeitsfeld in der Umgebung des Schiffes durch eine parallel zur Fahrtrichtung angeordnete Parallelströmung geprägt.

[9] Siehe Abschnitt 2.3.4

Eine beliebige lineare Funktion

$$\varphi = ax + by + cz \tag{2.15}$$

erfüllt die Laplace-Gleichung. Hierdurch kann daher eine Parallelströmung beschrieben werden. Der Geschwindigkeitsvekor läßt sich nach Gl. 2.8 bestimmen.

$$\vec{u} = \nabla\varphi = (a, b, c)^T \tag{2.16}$$

Größe und Richtung des Geschwindigkeitsvektors $\vec{u}$ sind im gesamten Gebiet Ω konstant. Die Stromlinien verlaufen parallel.

2.3.4.2 Punktquelle und -senke

Eine Quellströmung ist eine Strömung, bei der Flüssigkeit in einem Quellpunkt in das Strömungsgebiet eintritt. Eine Senkenströmung ist die Umkehrung der Punktquelle. Fluid verläßt das Strömungsgebiet im Senkenpunkt.

Die Strömung ist für den dreidimensionalen Fall kugelsymmetrisch. Die Stromlinien gehen radial vom Quellpunkt aus. Auf Grund der Kugelsymmetrie gibt es nur eine Geschwindigkeitskomponente $u_r(r)$ in radialer Richtung.

Da die austretende Flüssigkeitsmenge Q konstant ist, während die durchströmte Oberfläche mit anwachsendem Radius r vom Quell- bzw. Senkenpunkt anwächst, gilt:

$$u_r(r) \to 0 \qquad \text{für} \qquad r \to \infty \tag{2.17}$$

Das Potential einer Punktquelle bzw. -senke im dreidimensionalen Raum ist:

$$\varphi = \pm\frac{Q}{4\Pi r} \tag{2.18}$$

Für die Quellströmung ist das negative Vorzeichen maßgebend; Punktsenken werden durch das positive Vorzeichen beschrieben.

2.3.4.3 Wirbel

Potentialwirbel sind ebene Strömungen, bei denen die Stromlinien konzentrische Kreise um den Mittelpunkt des Wirbels beschreiben. Die Geschwindigkeit in radialer Richtung u_r ist Null, die Geschwindigkeit in Umfangsrichtung u_α ist umgekehrt proportional zum Abstand r vom Mittelpunkt.

$$u_\alpha(r) = \frac{\Gamma}{2\Pi r} \tag{2.19}$$

Γ beschreibt die Zirkulation um den Mittelpunkt des jeweiligen Wirbels:

$$\Gamma = \oint u_\alpha r d\alpha \tag{2.20}$$

2.3.5 Panelverfahren

Mit höherer Rechenleistung ist es möglich, komplexere Funktionen der Potentialtheorie für die Lösung des Wellenwiderstandsproblems der Umströmung eines Schiffes zu verwenden. Hierbei haben sich in den letzten Jahren die sogenannten Panel-Verfahren[10] durchgesetzt.

2.3.5.1 Elemente für Panelverfahren

Bei Panel-Methoden werden die Oberflächen, an der die in Abschnitt 2.3.6 beschriebenen Randbedingungen zu erfüllen sind, in kleine flächige Bereiche, den sog. Panels, unterteilt. Die einzelnen Panels verhalten sich dabei wie eine über die Fläche des Panels verteilte Quelle bzw. Senke. Daher erfüllen Panels ohne weitere Nebenbedingungen die Laplace-Gleichung [2].

Die Form der Panels wie auch die Verteilung der Quellstärke über jedes Panel ist je nach Panel-Verfahren unterschiedlich. Gebräuchlich sind u. a. [3]:

- Eine Punktquelle bzw. -senke je Panel.
- Punkthaufen, d. h. mehrere Quellen sind gleichmäßig auf dem Panel verteilt. Alle Quellen haben gleiche Stärke.
- Konstante Quellstärke über die ebene Vierecksfläche des Panels.
- Konstante Quellstärke verteilt über ein räumliches, nicht notwendigerweise ebenes Vieleck.

Die mathematische Komplexität wie auch der für die Lösung erforderliche numerische Aufwand steigt für die aufgeführten Panel-Typen von oben nach unten. Bei Panel-Verfahren höherer Ordnung[11] ist die Verteilung der Quellstärke über die Oberfläche nicht konstant. Stattdessen wird z. B. eine lineare oder parabolische Verteilung angenommen.

Direkt auf dem Panel wird das Potential des jeweiligen Panels unendlich. Dies wird als Flächensingularität bezeichnet. Eine direkte numerische Auswertung des Quell-Potentials ist nicht möglich. Durch Umformungen[12] ist es allerdings möglich, für Punkte auf dem Panel mathematisch auswertbare Ausdrücke herzuleiten.

Auf den einzelnen Panels ist eine endliche Anzahl diskreter Kollokationspunkte angeordnet, in denen bei der numerischen Auswertung die Randbedingungen durch geeignete Variation der Quellstärken exakt erfüllt werden. Ist der Abstand zwischen den Kollokationspunkten hinreichend klein, kann davon ausgegangen werden, dass zwischen diesen

[10] Der deutsche Ausdruck Paneel-Verfahren wird in dieser Arbeit nicht verwendet, da sich international die englischsprachige Bezeichnungsweise eingebürgert hat.

[11] Entwickelt unter anderem von Hughes/Bertram (1995) [4].

[12] Es ist z. B. möglich, eine einfach berechenbare Funktion mit identischer Singularität - häufig wird hierfür eine Quellverteilung konstanter Stärke auf einer Kugeloberfläche, welche das Panel im Panelmittelpunkt tangiert, verwendet - von der Quellstärke des Panels zu subtrahieren und nach der numerischen Auswertung der verbleibenden Quellstärke des Panels diesen Betrag wieder zu addieren [5].

Punkten die geforderten Bedingungen in guter Näherung erfüllt sind. Ein zu geringer Abstand der Kollokationspunkte ist nicht wünschenswert, da es ansonsten auf Grund der sehr geringen Abstände zu Rundungsfehlern bei der Berechnung kommen kann.

2.3.5.2 Lösung eines Panel-Problems

Am Beispiel eines umströmten ebenen Zylinders in einem unendlich ausgedehnten Flüssigkeitsgebiet wird im folgenden der Lösungsweg eines Panel-Problem exemplarisch dargestellt.

Das Potential der Anströmung ϕ_∞ wird durch eine Parallelströmung mit der Geschwindigkeit $\vec{u}_\infty$ beschrieben.

$$\phi_\infty = \vec{u}_\infty \cdot \vec{x} \tag{2.21}$$

Die Körpergeometrie wird in m nicht gekrümmte Panels mit gleicher Länge l unterteilt. Das die Umströmung des Körpers bewirkende Störpotential ϕ_S wird durch die Anordnung von Quellen und Senken auf den Panels gebildet. Je Panel wird in diesem Beispiel ein Quell- bzw. Senkenpunkt mit dem Potential φ_{Q_i} angeordnet, siehe Abb. 2.3. Die Ergiebigkeit der Quelle oder Senke i beträgt Q_i

$$\phi_S = \sum_{i=1}^{m} \varphi_{Q_i} = \sum_{i=1}^{m} \frac{Q_i}{4\Pi r} \tag{2.22}$$

r beschreibt den Abstand zwischen Quelle bzw. Senke[13] und dem Punkt $\vec{x}$, für welchen

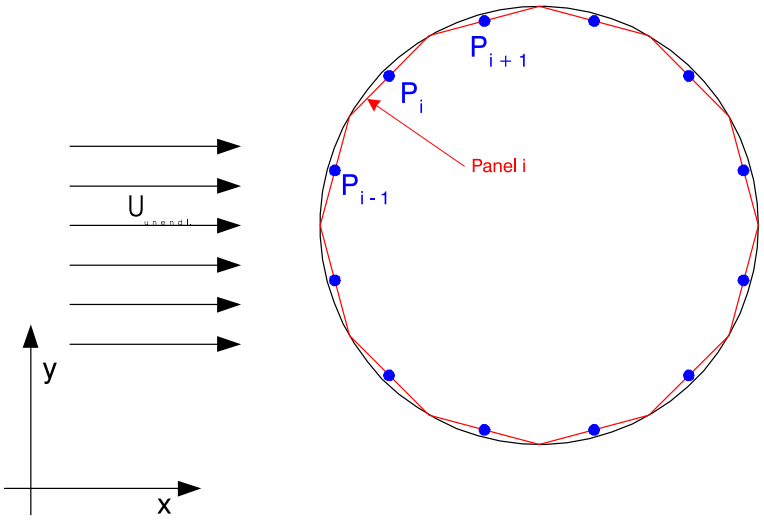

Abb. 2.3: Diskretisierung eines Zylinders für die potentialtheoretische Berechnung der Umströmung bei paralleler, ebener Anströmung

das Störpotential $\phi_S(\vec{x})$ bestimmt wird.

[13] Da Quell- und Senkenpunkte sich nur im Vorzeichen der Ergiebigkeit Q unterscheiden, werden im folgenden nur die Begriffe Quellpunkt bzw. Quelle verwendet.

Die Potentiale der Parallelströmung sowie der Quellen, also nach Gl. 2.12 auch das Gesamtpotential

$$\phi = \phi_\infty + \phi_S \tag{2.23}$$

, erfüllen alle Randbedingungen bis auf die Neumann-Bedingung.

Die Neumann-Bedingung, siehe Gl. 2.26, drückt aus, dass keine Durchströmung der Oberfläche stattfindet. Für jedes Panel k mit dem Kollokationspunkt $\vec{P}_k$ muss daher gelten:

$$\frac{\delta\phi(\vec{P}_k)}{\delta\vec{n}_k} = 0 \tag{2.24}$$

$\vec{n}_k$ ist hierbei der Normalenvektor auf das Panel k im Kollokationspunkt $\vec{P}_k$.

Aus Gleichung 2.22, 2.23 und Gl. 2.24 ergibt sich:

$$\frac{\delta\phi}{\delta\vec{n}_k} = \frac{\delta\phi_\infty}{\delta\vec{n}_k} + \sum_{i=1}^{m} \frac{\delta\varphi_{Q_i}}{\delta\vec{n}_k} = 0 \tag{2.25}$$

Gl. 2.25 kann unter Berücksichtigung geometrischer Beziehungen der Panels zueinander in ein algebraisches Gleichungssystem überführt werden. Hierdurch werden die Quellstärken Q_i auf den Panels bestimmt. In [6] ist dies ausführlich dargelegt.

Die Neumann-Bedingung wird in den Kollokationspunkten genau erfüllt. Mit steigender Panelanzahl nähert sich die Lösung außerhalb der Kontrollpunkte den analytisch erzielbaren Ergebnissen an.

2.3.6 Randbedingungen

Die für diese Arbeit maßgebenden Untersuchungen betrachten den stationären Zustand eines Schiffes, welches sich mit konstanter Geschwindigkeit durch das umgebende Fluid bewegt. Zeitabhängige Effekte wie z. B. Turbulenzerscheinungen oder Bewegungen auf Grund von Seegang werden nicht betrachtet. Insofern ist ein Randwertproblem zu lösen. Die zu berücksichtigenden Randbedingungen werden im folgenden benannt.

2.3.6.1 Neumann-Bedingung

Ist $\vec{n}$ der nach außen gerichtete Einheitsnormalenvektor auf der Schiffsoberfläche[14], so gilt:

$$\vec{n} \cdot \nabla\phi = 0 \tag{2.26}$$

Gl. 2.26 drückt aus, dass Fluid nicht durch die Schiffsoberfläche strömt.

Für Schiffe mit Spiegelheck wird angenommen, dass in Fahrt die Strömung an der Außenkante des Spiegels[15] ($z = z_T$) abreißt, der Spiegel also nicht benetzt ist. An den Rändern

[14] Für die einzelnen Panels wird dieser derart bestimmt, dass $\vec{n}$ normal zur Schiffsoberfläche in den Kollokationspunkten ist.

[15] Es wird angenommen, dass der Spiegel senkrecht angeordnet ist, d. h. $x = x_T = const.$

des Spiegels wird daher Luftdruck erzwungen [7].

$$\frac{\delta\phi}{\delta x} = \begin{cases} -U_\infty\sqrt{1+\frac{2g}{U_\infty^2 z_T}} & \text{für} \quad z_T \leq U_\infty^2/2g \\ -U_\infty & \text{für} \quad z_T > U_\infty^2/2g \end{cases} \tag{2.27}$$

Da bei der Strömung an den Kanten des Spiegels die Geschwindigkeitskomponente in Schiffslängsrichtung dominiert, wird angenommen, dass die Geschwindigkeitsbeträge in y- und z-Richtung vernachlässigbar klein sind.

2.3.6.2 Kinematische Bedingung

An der Wasseroberfläche ist die kinematische Bedingung zu erfüllen. Diese besagt, dass in Fahrt an der Wasseroberfläche, d. h. für $z(x,y) = \zeta(x,y)$, kein Fluid durch diese dringt.

$$\nabla\phi \cdot \nabla\zeta = \frac{\delta\phi}{\delta z} \tag{2.28}$$

2.3.6.3 Dynamische Bedingung

Wie am Spiegel herrscht an der Wasseroberfläche der Luftdruck p.

$$\frac{1}{2}\left(\nabla\phi\right)^2 - gz = \frac{1}{2}U_\infty^2 \tag{2.29}$$

Werden Gl. 2.26 und Gl. 2.29 kombiniert, so dass ζ eliminiert wird, so ergibt sich die sog. kombinierte Oberflächenbedingung [5]:

$$\frac{1}{2}\nabla\phi\nabla\left(\nabla\phi\right)^2 - g\frac{\delta\phi}{\delta z} = 0 \tag{2.30}$$

Hierdurch wird die zunächst unbekannte Wellenerhebung ζ eliminiert. Ist die Geschwindigkeitsverteilung durch Lösung von Gl. 2.30 bestimmt, so folgt aus der dynamischen Bedingung die Kontur der Wasseroberfläche. Gl. 2.30 ist allerdings für $z = \zeta$, also für die a priori unbekannte Wellenerhebung, zu erfüllen.

Einfache Verfahren verwenden eine linearisierte Oberflächenbedingung. Die Wellenerhebung ζ wird im Vergleich zur Wellenlänge als klein angenommen. Die kombinierte Oberflächenbedingung wird für die ungestörte Wasseroberfläche gelöst. Numerisch aufwendiger, aber genauer sind nichtlineare Verfahren, die iterativ Gl. 2.30 und 2.29 lösen. Hierdurch werden sowohl die dynamische als auch die kinematische Randbedingung an der Oberfläche erfüllt.

2.3.6.4 Strahlungsbedingung

Da potentialtheoretische Berechnungen numerisch korrekte, aber nicht der Realität entsprechende Lösungen ergeben können, bei denen die Wellen sich stromaufwärts ausbreiten, muss durch geeignete Verfahren garantiert werden, dass sich vom Schiff erzeugte Wellen nur in einem Sektor hinter dem Schiff ausbreiten können.

Hierfür werden vielfach Finite-Differenzen-Operatoren angewendet, mit deren Hilfe die in Gl. 2.30 benötigten zweiten Ableitungen des Potentials ermittelt werden. Wird für die Finite-Differenzen-Operatoren ein Aufwind-Schema benutzt, d. h. die zweite Ableitung des Punktes P_i wird aus den ersten Ableitungen am Punkt P_i sowie n stromaufwärts gelegenen Punkten $P_{i-1} \dots P_{i-n}$ gebildet, so beeinflussen die Strömungszustände stromabwärts den Zustand am betrachteten Punkt P_i kaum. Das Problem wird hierfür elliptisch [8].

2.3.6.5 Bedingung des offenen Randes

Da nur ein Teil des Fluids diskretisiert werden kann, entsteht ein künstlicher Rand des Berechnungsgebietes. Vom Schiff erzeugte Wellen laufen unreflektiert durch diesen Rand.

Am vorderen Rand - dort treten Wellen nicht auf - ist zu garantieren, dass keine Störgeschwindigkeiten auftreten. Die Strömung in diesem Bereich ist eine Parallelströmung mit der Geschwindigkeit $\vec{u} = (-U_\infty, 0, 0)^T$.

Wellen, die das diskretisierte Strömungsgebiet am hinteren bzw. seitlichen Rand verlassen, werden vielfach durch spezielle Operatoren in diesem Bereich stark gedämpft. Eine Reflexion der Wellen wird durch unterbunden. Alternativ ist es möglich, auf der Wasseroberfläche Quell- und Kollokationspunkte verschoben zueinander anzuordnen. Für weitere Ausführungen wird hier auf die Literatur, siehe u. a. [2] und [9], verwiesen.

2.3.6.6 Dynamisches Gleichgewicht

Die Schwimmlage des Schiffes wird derart bestimmt, dass sich ein dynamisches Gleichgewicht einstellt:

$$\sum_i F_i = 0 \quad \text{und} \quad \sum_i M_i = 0 \tag{2.31}$$

Die Summe aller auf das Schiff wirkenden Volumenkräfte und auf der Rumpfoberfläche Ω_S angreifenden Kräfte F_i und Momente M_i ist Null. Trimm, Absenkung und Krängung[16] werden berechnet, so dass die dynamischen Kräfte und Momente ausgeglichen werden.

Für die Bestimmung der am Schiff angreifenden generalisierten Kräfte wird vielfach eine Integration des Drucks über die Schiffsoberfläche durchgeführt. Hierbei ist zu beachten, dass sich die benetzte Oberfläche auf Grund der Wellenbildung verändert. Die Integration ist daher über die tatsächlich benetzte Oberfläche des in Fahrt befindlichen Schiffes durchzuführen.

Die potentialtheoretisch ermittelte, am Schiffskörper in x-Richtung angreifende Kraft F_x ist gleich dem negativen Wellenwiderstand. Der Wellenwiderstandskoeffizient c_W ergibt sich nach:

$$c_W = \frac{-F_x}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 S} \tag{2.32}$$

S ist die benetzte Schiffsoberfläche des Schiffes.

[16] Durch dynamische Effekte hervorgerufen, tritt Krängung nur bei schräger Anströmung oder einer asymmetrischen Rumpfform auf.

2.4 Mathematisches und numerisches Modell

Die numerische Lösung des durch die in Kapitel 2.3 aufgeführten Gleichungen beschriebenen Problems erfordert die Umwandlung der gekoppelten nichtlinearen Differentialgleichungen in algebraische Ausdrücke.

In Abhängigkeit von der angestrebten Güte dieser Näherungslösung werden hierfür physikalische Effekte linearisiert. Mathematische Verfahren wie die Taylor-Reihen-Entwicklung ermöglichen die Umwandlung von Differentialgleichungen in lineare Gleichungssysteme.

Grundlegende Erläuterungen zu den Lösungswegen sind in Abschnitt 2.3.5.2 zu finden. Eine ausführliche Beschreibung der numerischen Modellierung wird in dieser Arbeit aus Platzgründen nicht gegeben. Stattdessen wird auf die Literatur, siehe u. a. [2], [8], [9] und [10], verwiesen.

Teil 3

Das Programmsystem *Shallo*

Für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurde das Programmsystem *Shallo* eingesetzt. Ausgehend von der in Kapitel 3.1 vorgestellten Funktionalität von *Shallo*wird in den Kapiteln 3.2 bis 3.5 die Verfahrensweise für eine Berechnung beschrieben.

3.1 Allgemeine Bemerkungen

Das Programmsystem *Shallo*, entwickelt von der *HSVA*[1], ist ein moderner CFD-Solver für die Berechnung von Wellenwiderstand, Schwimmlage und Wellenbild verschiedenster Schiffstypen.

Shallo zeichnet sich dadurch aus, dass ein vollständig nichtlineares Lösungsverfahren für die kombinierte Randbedingung an der Wasseroberfläche[2] verwendet wird. Es ist möglich, Schiffsumströmungen auf Basis der Potentialtheorie für die Fahrt in unendlich tiefem Wasser wie auch im Flachwasser bzw. bei Kanalfahrt zu untersuchen.

Eine geeignete Modellierung der Geometrie vorausgesetzt, können neben Einrumpfschiffen auch Mehrrumpfschiffe sowie vollgetaucht operierende Fahrzeuge untersucht werden.

3.2 Geometrieerzeugung

Im Rahmen der heute weitgehend computergestützten Konstruktion und Fertigung steht die für die Berechnung herangezogene Geometrie des Schiffskörpers im allgemeinen elektronisch zur Verfügung. Insofern entfällt die separate Erzeugung der Geometrie in *Shallo*. Stattdessen wird die bereits erstellte Rumpfoberfläche exportiert und anschließend für die Berechnung mit *Shallo* geeignet aufbereitet. Eine komfortables Werkzeug zur Erstellung eigener Geometrien existiert nicht.

Für das in der Schiffbaubranche weit verbreitete Entwurfssystem *Napa* stehen Makros zur

[1] Hamburgische Schiffbau Versuchsanstalt GmbH, Hamburg
[2] Siehe Abschnitt 2.3.6.2 und 2.3.6.3.

Verfügung, die dem Anwender die Bereitstellung der notwendigen Informationen für eine anschließende Berechnung mit *Shallo* erleichtern.

Allerdings zeigte sich in der Praxis, dass die von der *HSVA* zur Verfügung gestellten Makros nicht immer zu den gewünschten Ergebnissen führen. So war es z. T. nicht möglich, mit Hilfe von *Napa* erstellte Rumpfgeometrien auszugeben oder weiter zu bearbeiten. In diesen Fällen wurde versucht, durch vom Autor entwickelte Programme Abhilfe zu schaffen. Diese Programme werden im Anhang, Kapitel C, vorgestellt.

3.3 Netzgenerierung

Die Netzgenerierung in *Shallo* wird in zwei Schritten durchgeführt.

Basierend auf den aus *Napa* ausgegebenen Daten wird die Vernetzung der Rumpfoberfläche durchgeführt. Die Anzahl der Panels auf der Schiffsoberfläche in horizontaler wie vertikaler Richtung kann frei definiert werden. Es ist möglich, bestimmte geometrisch komplexe Bereiche des Rumpfes feiner zu vernetzen.

In einem zweiten Schritt wird das Netz der Wasseroberfläche erstellt. Hierbei wird in Abhängigkeit von der zu berechnenden Schiffsgeschwindigkeit U_∞ das Netz derart gewählt, dass pro Wellenlänge

$$L_W = 2\Pi \frac{U_\infty^2}{g} \tag{3.1}$$

ca. zehn Panels eingesetzt werden. Dies führt bei geringen Geschwindigkeiten und damit kurzen Wellenlängen zu einer hohen Gesamtanzahl an Panels und hierdurch zu langen Rechenzeiten.

Weiterhin bietet *Shallo* zwei Möglichkeiten, ähnliche Netze an der Wasseroberfläche zu erstellen[3]. Diese unterscheiden sich darin, dass die Netze um eine halbe Panellänge in Schiffslängsrichtung zueinander verschoben sind. Hierdurch ist es möglich, die Abhängigkeit der Ergebnisgüte von dem verwendeten Netz an der Wasseroberfläche zu überprüfen. Sollten sich bei Verwendung dieser zwei Netze deutliche Unterschiede in den Ergebnissen zeigen, so ist eine Verbesserung der Netzstruktur an der Wasseroberfläche wie auch auf dem Schiffsrumpf empfehlenswert.

3.4 Berechnung

Sind die Geometriedaten geeignet aufbereit, so erfolgt die Berechnung automatisch. Aus einer manuell erstellten Datei werden hierfür Angaben zur Schiffsgeschwindigkeit, zur Wassertiefe etc. ausgelesen.

[3] So die durch *Shallo* automatisch erstellte Netzstruktur an der Wasseroberfläche nicht wie gewünscht gestaltet ist, ist weiterhin die Option vorhanden, die Struktur dieses Netzes durch Benutzereingaben zu gestalten.

Shallo bietet die Möglichkeit, die kombinierte Randbedingung an der Oberfläche[4] entweder in linearisierter Form oder nichtlinear zu erfüllen. Für die nichtlineare Rechnung kann die Anzahl der für die Lösung der Oberflächenbedingung durchgeführten Iterationen vorgegeben werden.

3.5 Ergebnisse und deren Interpretation

Die Berechnung von *Shallo* liefert:

- die Geschwindigkeits- und Druckverteilung über die Oberfläche des Schiffsrumpfes
- das Wellenbild des Schiffes
- die Kontur und Fläche der benetzten Oberfläche
- den Wellenwiderstandsbeiwert
- die am Schiff angreifenden äußeren Kräfte sowie hieraus resultierend Trimm und Absenkung.

Weiterhin wird, basierend auf einer Abschätzung nach ITTC[5] 1978, der Reibungswiderstand F_v ausgegeben. Ausgehend von den bekannten Geschwindigkeiten $\vec{u}_i$ in den N Kollokationspunkten auf den Panels wird der Reibungswiderstand F_v berechnet wie folgt:

$$F_v = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2} \rho c_{f_i} \left(|\vec{u}_i|\right)^2 A_i \tag{3.2}$$

c_{f_i} ist der für den Betrag der Geschwindigkeit $|\vec{u}_i|$ gemäß ITTC gültige Reibungsbeiwert[6]; A_i ist die Fläche des Panels, auf dem der Kollokationspunkt i angeordnet ist.

Da formspezifische Effekte wie Turbulenz und Ablösungserscheinungen nicht berücksichtigt werden, ist dieser Wert nur als Näherung zu betrachten. Genauere Ergebnisse sind numerisch nur mit Hilfe von Verfahren zu erzielen, die diese Effekte berücksichtigen[7]. Da Schiffsanhänge im allgemeinen nicht modelliert werden, wird der hierdurch verursachte Zusatzwiderstand nicht berücksichtigt.

Die am Schiff angreifenden Kräfte wie auch der Wellenwiderstand werden aus den auf der Rumpfoberfläche wirkenden Kräften bestimmt. Bei geringen Geschwindigkeiten ist der von *Shallo* ausgegebene Wellenwiderstandsbeiwert c_W nur bedingt vertrauenswürdig.

[4] Siehe Abschnitt 2.3.6.3, Gl. 2.30

[5] International Towing Tank Conference

[6] Zu berechnen nach [11]:

$$c_{f_i} = \frac{0.075}{\left(log_{10} R_N - 2\right)^2} \tag{3.3}$$

[7] Z. B. RANSE-Verfahren (Reynolds Averaged Navier Stokes Equations)

Eine geringe Geschwindigkeit bedeutet geringe Drücke auf der Rumpfoberfläche; Rundungsfehler, die bei numerischen Verfahren unvermeidlich sind, können bei kleinen absoluten Werten zu großen Fehlern führen. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass bei geringen Geschwindigkeiten der Reibungswiderstand einen dominierenden Einfluss auf den Gesamtwiderstand hat. Eine potentialtheoretische Lösung kann für diesen Fall nur eingeschränkt sinnvolle Ergebnisse liefern.

Teil 4

Das Wigley-Schiff

Das Wigley-Schiff zeichnet sich durch eine parabolische, mathematisch exakt definierte Form aus. Daher eignet es sich auf Grund der einfachen Netzgenerierung wie auch der einfachen Strömungsverhältnisse für erste Testrechnungen, d. h. um z. B. die Zuverlässigkeit und Exaktheit eines Berechungsprogrammes zu validieren bzw. den Einfluss von Änderungen der Netzgeometrie auf die Ergebnisse zu untersuchen. In der Literatur, siehe u. a. [3], [4], sind vielfach Ergebnisse experimenteller wie auch numerischer Untersuchungen veröffentlicht.

Ziel der hier vorgestellten Untersuchungen ist es, den Einfluss von Netzfeinheit, Netzgeometrie sowie der Abmessungen auf die berechneten Ergebnisse zu untersuchen. Hierfür wurde die Rumpfoberfläche mit vier unterschiedlichen Netzen belegt, siehe Kapitel 4.3. Kapitel 4.4 untersucht, inwieweit die Behandlung der Oberflächenbedingung die Ergebnisse beeinflusst. Zwei um eine halbe Panellänge in Schiffslängsrichtung verschobene Netze an der Wasseroberfläche erlauben Rückschlüsse auf die Güte des Netzes, Kapitel 4.5. Kapitel 4.6 beschreibt, inwiefern eine Skalierung des Größenmaßstabs die Ergebnisse beeinflusst.

4.1 Rumpfform

Das Wigley-Schiff ist ein schiffsähnlicher Körper, dessen Oberfläche im Ruhezustand, d. h. ohne fahrtbedingte Schwimmlagenänderung, mathematisch wie folgt beschrieben werden kann [3]:

$$y = \frac{B}{2}\left(1-\frac{4x^2}{L^2}\right)\left(1-\frac{x^2}{T^2}\right) \quad \text{für} \quad -\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2}, \quad 0 \leq x \leq T \tag{4.1}$$

$$y = \frac{B}{2}\left(1-\frac{4x^2}{L^2}\right) \quad \text{für} \quad -\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2}, \quad 0 \leq x \leq 0 \tag{4.2}$$

Das Koordinatensystem ist im Schwerpunkt der Wasserlinienfläche angeordnet; die z-Achse zeigt positiv nach unten. L, B und T beschreiben die Länge, Breite sowie den

Tiefgang des Schiffes. Abb. 4.1 zeigt eine perspektivische Ansicht des Wigley-Schiffes[1].

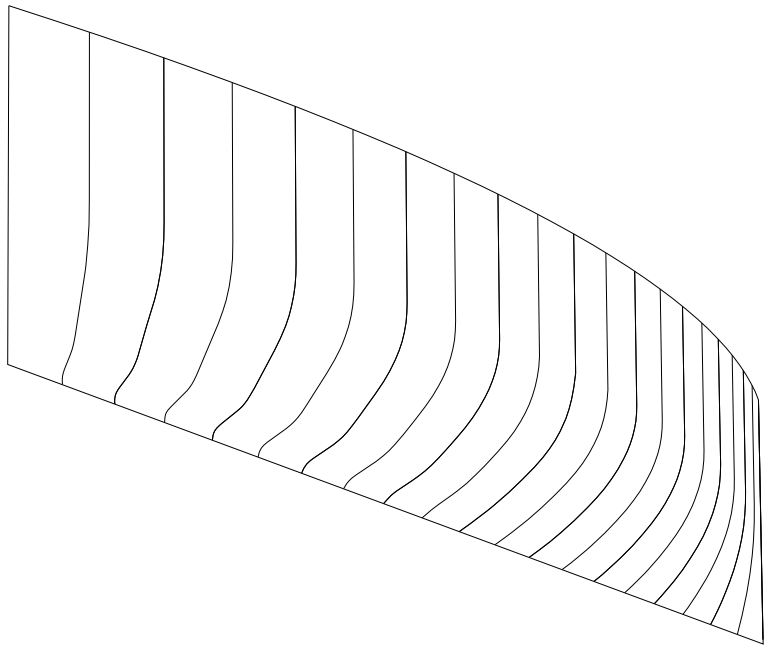

Abb. 4.1: Perspektivische Ansicht

Allgemein üblich ist es, folgende Hauptverhältnisse anzunehmen:

$$\frac{L}{B} = 10, \quad \frac{L}{T} = 16 \tag{4.3}$$

Hieraus ergibt sich ein Blockkoeffizient $c_B = 0.444$. Die Schiffslänge beträgt $L = 10m$. Die Seitenhöhe D wird derart gewählt, dass ein ausreichend großer Abstand zwischen Oberkante der Wellenkämme und der Deckskante besteht. Für die durchgeführten Untersuchungen wurde ein Verhältnis

$$\frac{L}{D} = 12 \tag{4.4}$$

gewählt.

4.2 Geometrieerzeugung und Netzgenerierung

Das Programm *WigMesh* erstellt, ausgehend von oben beschriebener mathematischer Formulierung, das Input-File für den CFD-Solver *Shallo* auf direktem Wege, siehe hierzu auch Abschnitt C.1 im Anhang. *Shallo* wird, wie in Teil 3 beschrieben, zur Generierung des

[1] Die Formbeschreibung erfolgte mit Hilfe des Entwurfsystems *Napa*. Die im Bugbereich erkennbare, von der mathematischen Formulierung abweichende Form ist bei der zur Berechnung herangezogenen Rumpfform korrekt wiedergegeben.

Netzes auf der Wasseroberfläche wie auch zur weiteren Berechnung und Auswertung herangezogen.

WigMesh ermöglicht es, ein Netz für die Rumpfoberfläche zu erstellen. Die Anzahl der Panels in horizontaler und vertikaler Richtung kann frei gewählt werden. Die Abmessungen des Rumpfes können eingegeben werden. In Abb. 4.2 ist exemplarisch ein Netz bestehend aus 220 Panels dargestellt.

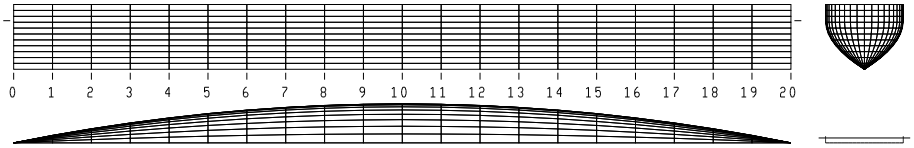

Abb. 4.2: Vernetzung eines Wigley-Schiffes mit 220 Panels (Es werden je 20 Panels in horizontaler und je 11 Panels in vertikaler Richtung verwendet.)

4.3 Netzfeinheit auf der Rumpfoberfläche

Um den Einfluss unterschiedlicher Netze auf die Güte der Ergebnisse zu untersuchen, wurden Berechnungen mit vier verschiedenen Netzen durchgeführt. Diese sind in Tab. 4.1 aufgeführt.

Für die Dichte des Fluids wurde, wie bei den folgenden Untersuchungen des Wigley-Schiffes, $\rho = 1000 kg/m^3$ festgesetzt; Trimm und Absenkungen wurden nicht behindert.

No.	$\sum$ **Panels**	**horizontal**	**vertikal**
1	60	10	6
2	220	20	11
3	450	30	15
4	880	40	22

Tab. 4.1: Untersuchte Netze für die Rumpfoberfläche des Wigley-Schiffs

Gröbere Netze konnten nicht untersucht werden, da hierfür mit *Shallo* keine Lösungen berechnet werden konnten. Eine weitere Netzverfeinerung war auf Grund beschränkter Rechenkapazität nicht möglich.

Für eine linearisierte Oberflächenbedingung[2] ist in Tab. 4.2 der Wellenwiderstandsbeiwert c_W in Abhängigkeit von der Froude-Zahl dargestellt.

[2]Die Ergebnisse der zweiten Iteration für eine nichtlineare Behandlung der kombinierten Oberflächenbedingung sind in Klammern dargestellt.

Netz / F_N	**No 1: 10 x 6**	**No 2: 20 x 11**	**No 3: 30 x 15**	**No 4: 40 x 22**
0.20	1.500 (-)	0.689 (0.637)	0.693 (0.706)	0.651 (0.647)
0.25	0.699 (1.124)	0.982 (0.946)	0.893 (0.871)	0.972 (0.886)
0.30	1.599 (1.834)	1.383 (1.573)	1.339 (1.690)	1.610 (1.843)
0.35	1.261 (1.189)	1.093 (1.147)	1.134 (1.238)	1.298 (1.274)
0.40	1.462 (1.569)	2.099 (2.521)	1.952 (2.290)	2.111 (2.537)

Tab. 4.2: Wellenwiderstandsbeiwert $c_W \cdot 1000$ in Abhängigkeit von Netzfeinheit und Froude-Zahl F_N (Es sind die Ergebnisse für eine linearisierte Oberflächenbedingung aufgeführt. Werte in Klammern zeigen die Ergebnisse des zweiten Iterationsschrittes für eine nichtlineare Rechnung.)

Zu erkennen ist, dass das gröbste Netz im Vergleich zu feineren Netzen insbesondere für eine linearisierte Oberflächenbedingung zu deutlichen Abweichungen für die berechneten Wellenwiderstandsbeiwerte führt. Dies kann u. a. dadurch erklärt werden, dass, da der Wellenwiderstandsbeiwert durch Integration der Drücke über die Panels ermittelt wird, es auf Grund der gröberen Auflösung der Rumpfgeometrie und der dadurch bedingten großen Panelflächen durch das Netz No. 1 nicht möglich ist, die Druckverhältnisse ausreichend fein zu bestimmen. Weiterhin ist es durch das grobe Netz nur bedingt möglich, eine exakte Repräsentation der realen Zustände zu erreichen.

Die Ergebnisse der Netze No. 2 und 3 sind insbesondere bei Verwendung einer linearen Oberflächenbedingung ähnlich. Die Ergebnisse stimmen weitgehend mit den in der Literatur veröffentlichten, numerisch wie auch experimentell bestimmten Daten, siehe Abb.4.3, überein.

Der Wellenwiderstandsbeiwert für das Netz No. 4 weicht für die lineare Oberflächenbedingung von den Ergebnissen für No. 2 und 3 ab. Wird eine nichtlineare Oberflächenbedingung verwendet, so nähern sich die Ergebnisse an die der zwei nächst feineren Netze an.

Auffällig ist, dass nur Netz No. 3 für eine Froude-Zahl von $F_N \approx 0.35$ den experimentell ermittelten Verlauf des Widerstandsbeiwertes wiedergibt. Hieraus kann geschlossen werden, dass bei höheren Geschwindigkeiten die Feinheit des Netzes einen deutlicheren Einfluss auf die Güte der Ergebnisse hat als bei geringen Geschwindigkeiten. Die Ursache dafür, dass der Wellenwiderstandsbeiwert für Netz No. 4 nicht den experimentellen Daten entspricht, ist nicht ersichtlich.

Abb. 4.4 zeigt für eine Geschwindigkeit von $F_N = 0.3$ die benetzte Oberfläche. Das Netz No. 4 berechnet eine größere Wellenhöhe im Bugbereich. Dies kann dadurch erklärt werden, dass durch die feinere Netzgeometrie eine bessere Widergabe der real vorherrschenden Fluidbedingungen erzielt werden kann. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass insbesondere im Bereich der Schiffsenden der Rumpf sehr scharf zuläuft. Eine fehlerbehaftete Beeinflussung gegenüberliegender Elemente ist nicht auszuschließen.

In Abb. 4.5 und Abb. 4.6 ist für eine Froude-Zahl von $F_N = 0.3$ das Wellenbild sowie die Druckverteilung auf der Rumpfoberfläche für den dritten Iterationsschritt der Lösung

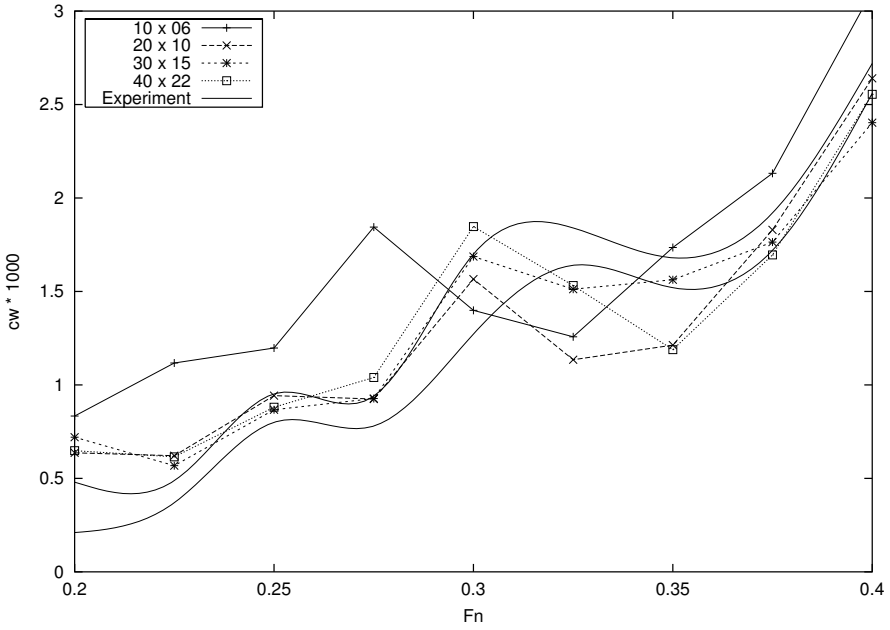

Abb. 4.3: Widerstandsbeiwert $c_W \cdot 1000$ für verschiedene Netze (Dargestellt sind die Ergebnisse für eine nichtlineare Rechnung. Die Ergebnisse der dritten Iteration wurden ausgewertet.)

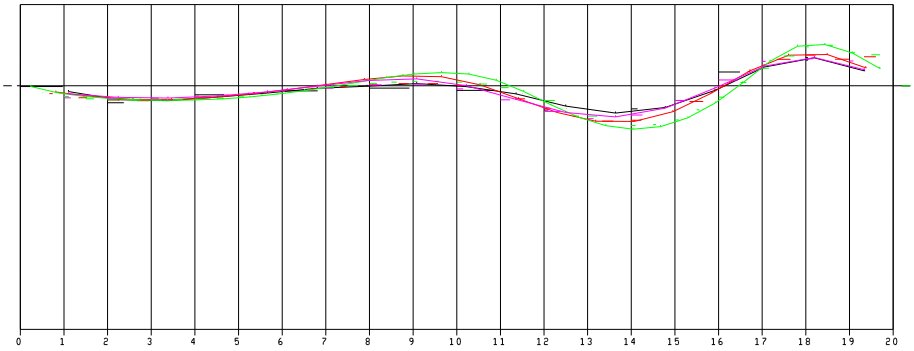

Abb. 4.4: Benetzte Oberfläche bei einer Froude-Zahl von $F_N = 0.3$ (schwarz: Netz No. 1; magenta: No. 2; rot: No. 3; grün: No. 4)

einer nichtlinearen Oberflächenbedingung dargestellt.

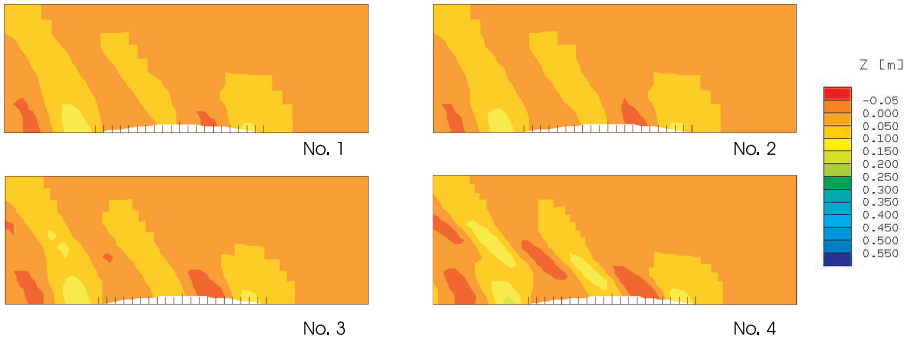

Abb. 4.5: Wellenbild für $F_N = 0.3$

Die berechneten Wellenbilder für alle vier Netze sind sehr ähnlich. Mit steigender Anzahl von Panels auf der Rumpfoberfläche ist eine bessere, d. h. weniger kantige Darstellung der Geometrie von Wellenerhebungen und -absenkungen bei identischer Netzgeometrie an der Wasseroberfläche zu verzeichnen. Während das Netz No. 1 insbesondere im Mittschiffsbereich nicht in der Lage ist, die in Rumpfnähe auftretenden Wellen wiederzugeben, ist dies durch die drei feineren Netze möglich. Das typische Wellensystem eines Schiffes, d. h. die Bildung von Längs- und Querwellen, wird nur durch die Netze No. 3 und No. 4 wiedergegeben. Bei diesen Netzen ist deutlich zu erkennen, wie die Längswellen unter dem sog. Kelvin-Winkel vom vorderen Staupunkt ausgehen. Mit anwachsender Panelanzahl zeigen die Ergebnisse größere Wellenhöhen für die Wellensysteme im Bereich der vorderen und hinteren Schulter.

Die Druckverteilungen auf der Rumpfoberfläche ergeben für feinere Netze höhere Über- bzw. Unterdrücke im Bugbereich wie auch im Bereich der vorderen Schulter. Die zwei groben Netze No. 1 und 2 sind nicht in der Lage, das Überdruckgebiet mittschiffs wiederzugeben.

4.4 Linearisierte vs. nichtlineare Lösung der Oberflächenbedingung

Für das Netz No. 3 wurden Untersuchungen durchgeführt hinsichtlich der Auswirkungen der numerischen Behandlungen der Oberflächenbedingung.

Abb. 4.7 zeigt den berechneten Wellenwiderstandbeiwert für eine linearisierte Oberflächenbedingung sowie für die ersten drei Iterationen bei Verwendung einer nichtlinearen Bedingung an der Wasseroberfläche.

Die Ergebnisse für die Iterationsschritte 4 bis 7 sind nicht dargestellt. Im Vergleich zum dritten Iterationsschritt war für die Iterationen 4 und 5 keine weitere Verbesserung der Ergebnisse erkennbar, welche die zusätzliche Rechenzeit rechtfertigen würde. Ab der sechsten Iteration wurden numerische Instabilitäten sichtbar; die Güte der Ergebnisse sank.

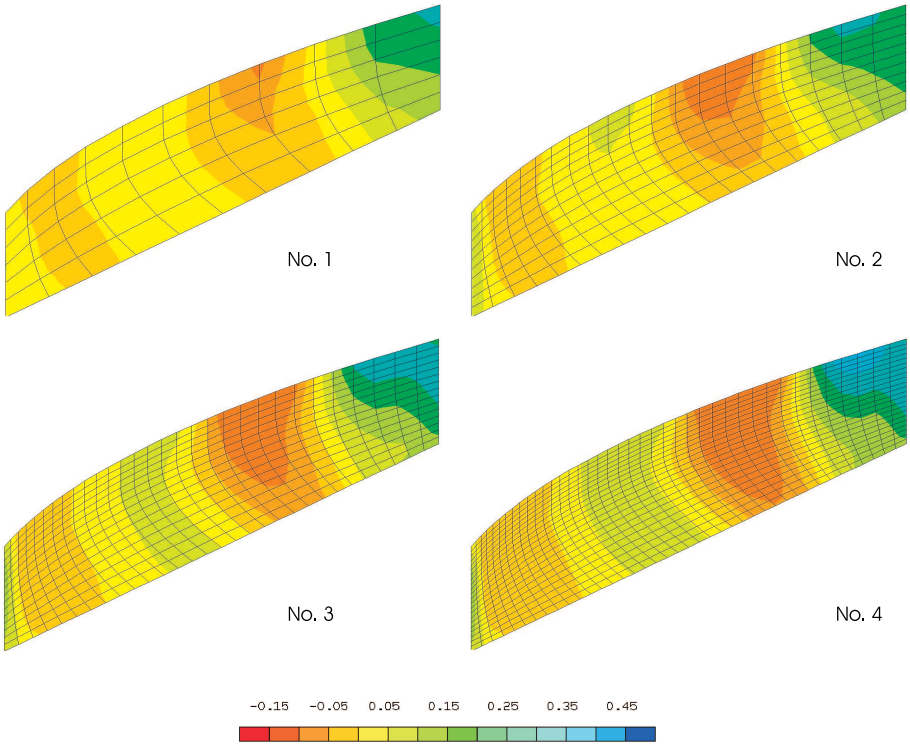

Abb. 4.6: Druckverteilung auf der Rumpfoberfläche für $F_N = 0.3$

Bei geringen und mittleren Geschwindigkeiten[3] und den hierbei auftretenden niedrigen Wellenhöhen sind nur geringe Unterschiede der Ergebnisse für die lineare bzw. nichtlineare Behandlung der Oberflächenbedingung festzustellen. Bei höheren Geschwindigkeiten zeigt es sich, dass die hierbei auftretenden größeren Wellenhöhen nicht adäquat durch eine linearisierte Formulierung wiedergegeben werden können. Der Wellenwiderstandsbeiwert wird im Vergleich zu nichtlinearen Rechnungen zu gering berechnet.

Während die erste Iteration für eine nichtlineare Oberflächenbedingung im Geschwindigkeitsbereich $F_N = 0.4$ bis $F_N = 0.45$ zu große Werte liefert, stimmen die Ergebnisse weiterer Iterationsschritte in diesem Bereich überein. Es ist davon auszugehen, dass für sehr hohe Geschwindigkeiten Konvergenz nach dem zweiten Iterationsschritt weitestgehend erreicht ist. Auffällig ist, dass für $F_N = 0.35$ erst der dritte Iterationsschritt einen Wellenwiderstandsbeiwert berechnet, der mit den experimentell bestimmten Daten übereinstimmt.

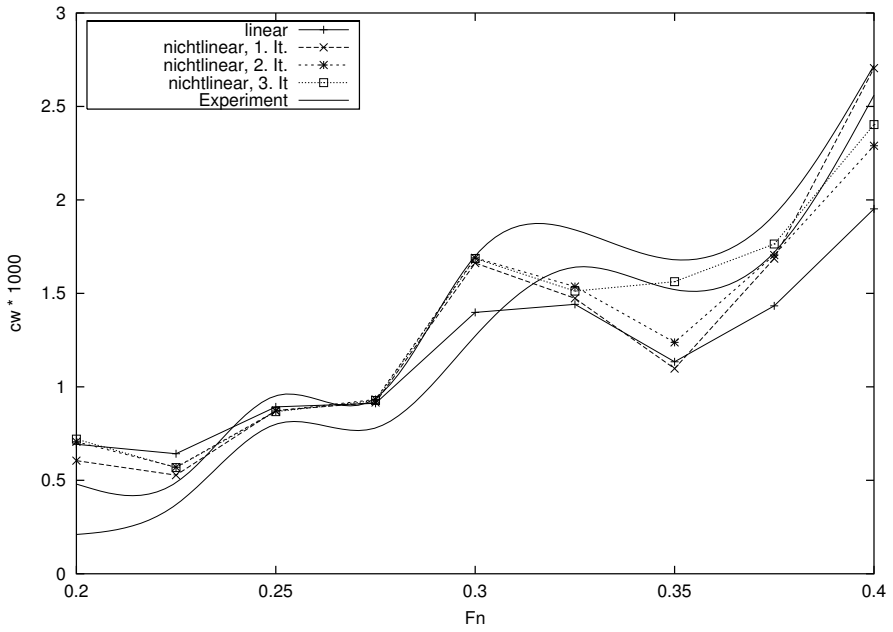

Abb. 4.7: Wellenwiderstandsbeiwerte für unterschiedliche Behandlung der Randbedingung an der Wasseroberfläche

Die durch die äußeren angreifenden Kräfte hervorgerufene Absenkung ist in Abb. 4.8 dargestellt. Wie für den Wellenwiderstandsbeiwert c_W gezeigt, weichen die Ergebnisse von linearisierter und nichtlinearer Rechnung im hohen Geschwindigkeitsbereich voneinander ab. Der zweite und dritte Iterationsschritt führen zu weitgehend übereinstimmenden Ergebnissen. Auffallend auch hier die Differenz der Ergebnisse für $F_N = 0.35$.

[3]Im Bereich $F_N = 0.15$ bis $F_N = 0.275$

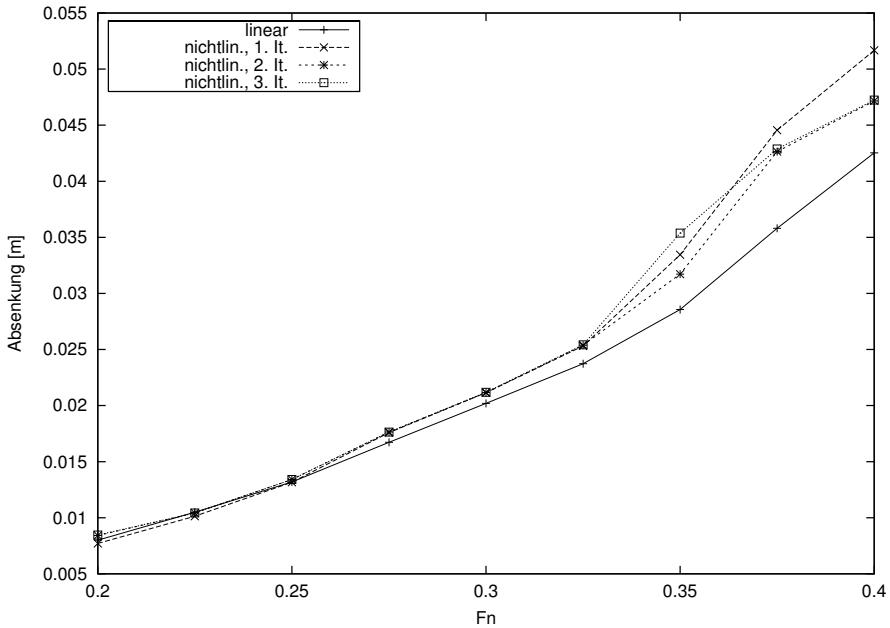

Abb. 4.8: Absenkung für unterschiedliche Behandlung der Oberflächenbedingung

4.5 Vernetzung der Wasseroberfläche

Basierend auf einer Vernetzung des Rumpfes mit 450 Elementen[4] sind für zwei, um eine halbe Panellänge in x-Richtung gegeneinander verschobene Netze der Wasseroberfläche in Abb. 4.9 die ermittelten Wellenwiderstandsbeiwerte c_W aufgeführt.

Die Übereinstimmung der Ergebnisse ist für geringe und mittlere Geschwindigkeiten, d. h. für $F_N \leq 0.3$, gut. Es zeigen sich Abweichungen im Bereich $F_N > 0.3$. Wird ein feineres Netz verwendet, so verringert sich die Differenz zwischen den ermittelten Widerstandsbeiwerten für die zwei Netze der Wasseroberfläche.

Die Wellenbilder für eine Froude-Zahl von $F_N = 0.3$ sind in Abb. 4.10 dargestellt.

Sowohl das Wellenbild als auch die benetzte Oberfläche[5] beider Rechnungen stimmen weitgehend überein. Deutliche Abweichungen sind nicht zu beobachten. Die Wellenwiderstandsbeiwerte wie auch die an der Rumpfoberfläche bestimmten Drücke sowie Geschwindigkeitsfelder sind identisch.

Für das Wigley-Schiff sind bei geringen und mittleren Geschwindigkeiten für die zwei untersuchten Netze mit einer hohen Anzahl an Panels bzw. bei höheren Geschwindigkeiten nur für Netz No 4. keine signifikanten Unterschiede zwischen den zwei Vernetzungsvarianten an der Wasseroberfläche zu erkennen. Dies deutet darauf hin, dass

1. abgesehen von hohen Geschwindigkeiten die Vernetzung an der Oberfläche keinen

[4]D. h. für das Netz No. 3 mit 30 Elementen in horizontaler und 15 Elementen in vertikaler Richtung.
[5]Die benetzte Oberfläche ist aus Platzgründen nicht dargestellt.

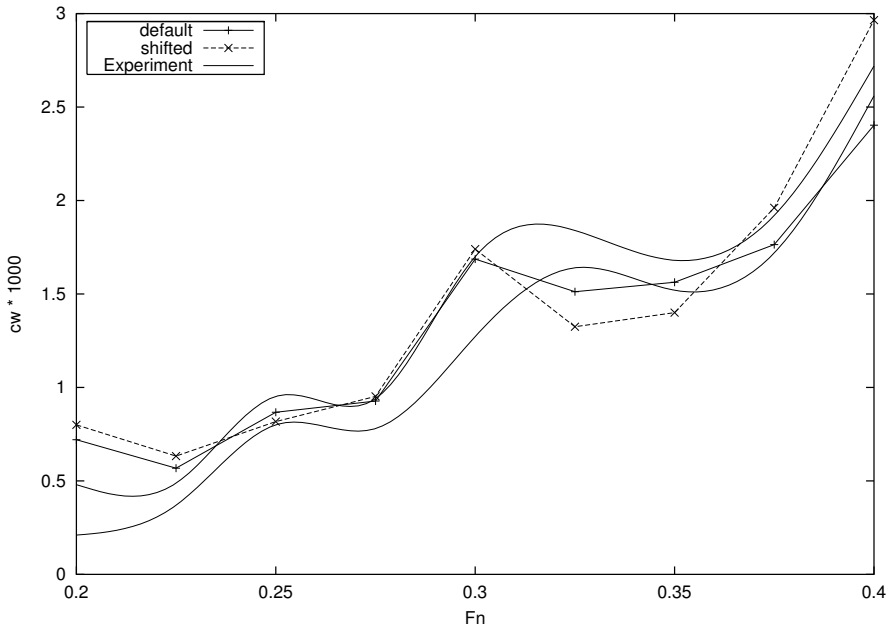

Abb. 4.9: Wellenwiderstandsbeiwert c_W für zwei ähnliche, in Längsrichtung versetzte Netze an der Wasseroberfläche (schwarz: default grid; rot: shifted grid)

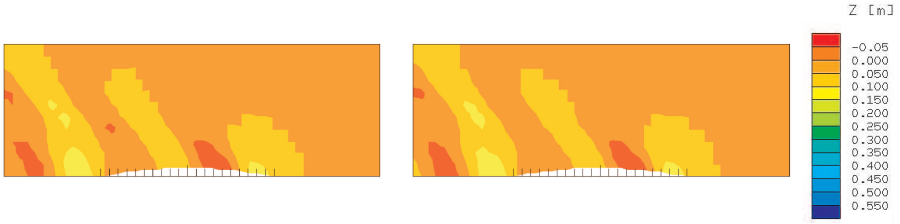

Abb. 4.10: Wellenbild für zwei Netze an der Wasseroberfläche (links: default grid, rechts: shifted grid)

gravierenden Einfluss auf die Ergebnisse hat,

2. die Netzfeinheit auf der Rumpfoberfläche bei hohen Geschwindigkeiten die Güte der Ergebnisse deutlich beeinflusst.

4.6 Maßstabseffekte

Um den Einfluss von Maßstabseffekten zu untersuchen, wurde ein Wigley-Schiff mit einer Länge von $L = 100m$ modelliert. Die Verhältnisse der Hauptabmessungen sind identisch mit den in Gl. 4.3 und Gl. 4.4 aufgeführten Werten. Für die Vernetzung des Schiffs wurden jeweils 450 Panels verwendet. Die Ergebnisse der dritten Iteration für eine nichtlineare Behandlung der kombinierten Oberflächenbedingung wurden ausgewertet.

Die Ergebnisse beider Schiffe, so die normierten dimensionslosen Koeffizienten betrachtet werden, unterscheiden sich nur sehr gering. Abb. 4.11 zeigt die Verläufe des Wellenwiderstandsbeiwerts c_W aufgetragen über die Froudezahl F_N. Die Abweichungen sind kleiner als 0.1 %. Es ist daher wahrscheinlich, dass diese Abweichungen auf Rundungsfehler etc. zurückzuführen sind. Ein Einfluss von Maßstabseffekten ist demnach nicht zu verzeichnen.

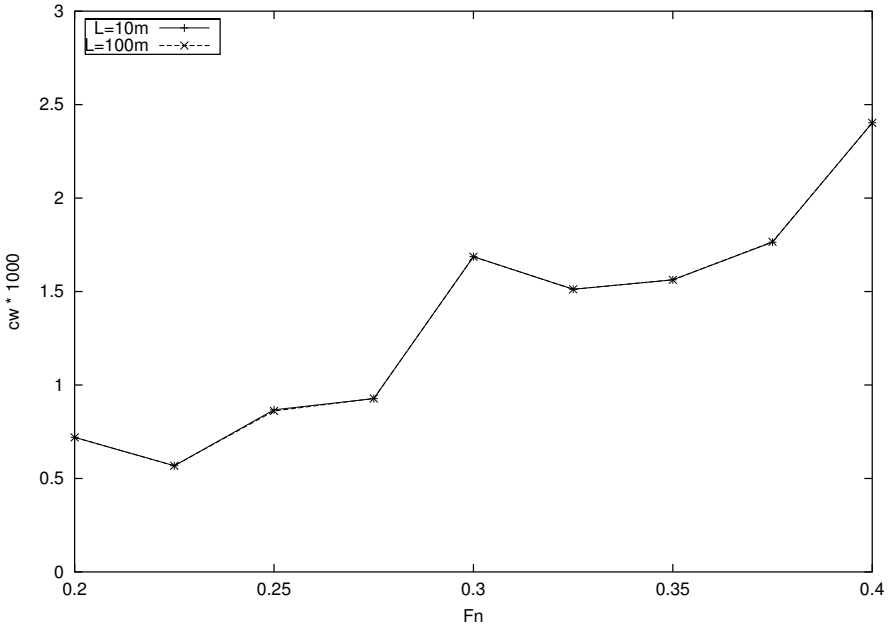

Abb. 4.11: Einfluss von Maßstabseffekten auf den Wellenwiderstandsbeiwert

4.7 Zusammenfassung

In diesem Teil wurden Untersuchungen durchgeführt mit dem Ziel, den Einfluss der Netzstruktur wie auch der numerischen Berechnungsverfahren auf die Güte der Berechnungen abzuschätzen.

Es zeigt sich, dass grobe Netze für geringe und mittlere Froude-Zahlen[6] Ergebnisse liefern, die mit den experimentell ermittelten Daten übereinstimmen bzw. nur gering davon abweichen. Bei hohen Geschwindigkeiten ist die Netzfeinheit entscheidend. Grobe Netze sind nicht in der Lage, die realen Strömungsverhältnisse wirklichkeitsgetreu nachzubilden; deutliche Differenzen zwischen numerischen und experimentellen Ergebnissen sind die Folge.

Druckverteilung und Wellenbild werden bei einer groben Vernetzung der Rumpfoberfläche nur bedingt realitätsnah wiedergegeben. Insbesondere das Wellensystem im Mittschiffsbereich wie auch die von dort propagierenden Wellen können erst durch feinere Netze auf der Rumpfoberfläche[7] ermittelt werden. Dies spricht für die Verwendung von feinen Netzen, wenn auch zu Lasten einer höheren Rechenzeit.

Die Verwendung einer linearisierten Form der kombinierten Oberflächenbedingung führt nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen. Die hiermit berechneten Ergebnisse weichen insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten deutlich von den experimentell ermittelten Werten ab. Es zeigt sich, dass für das Wigley-Schiff die Verwendung von drei Iterationsschleifen für die Erfüllung der Oberflächenbedingung an der realen Oberflächenkontur günstig ist. Für eine kleinere Anzahl an Iterationen ist noch keine Konvergenz erreicht; werden mehr Iterationen durchgeführt, so führen numerische Instabilitäten zu inkorrekten Ergebnissen.

[6] Bis $F_N \leq 0.3$

[7] Die Vernetzung der Wasseroberfläche ist für alle vier untersuchten Vernetzungsvarianten der Rumpfoberfläche identisch.

Teil 5

Containerschiff No. 2280

Als Basis für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen dient der Entwurf No. 2280 eines Containerschiffs entwickelt durch die Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin[1]. Dieser Entwurf wurde gewählt, da hierfür umfangreiche, experimentell bestimmte Daten sowie die Rumpfgeometrie in Form eines Spantenrisses vorliegen. Dies ermöglicht es, Ergebnisse für die nicht modifizierte Rumpfform mit den aus Untersuchungen gewonnenen Ergebnissen zu vergleichen und hierdurch die angewendete Verfahrensweise zu validieren.

Das Containerschiff 2280 ist ein sog. Panmax-Schiff, d. h. die Breite ist so gewählt, dass eine Durchquerung des Panama-Kanals möglich ist. Die Schiffslinien im Vor- und Hinterschiff weisen leicht ausfallende V-Spanten auf. Eine Aufkimmung ist nicht vorhanden. Beim Entwurf durch die *VWS* wurde eine hydrodynamisch günstige Formgebung angestrebt. Ein völliges Mittelschiff mit den bei langsamen Schiffen z. T. zu vermerkenden „Containerecken“ wurde vermieden; ein paralleles Mittelschiff ist nicht vorhanden. Die Hauptabmessungen des Containerschiffs No. 2280 sind in Tab 5.1 aufgeführt.

L_{PP}	215 m
B	32.2 m
T	11 m
D	16 m
c_B	0.558
L_{cb}	108.5 m
∇	42525 m^3
S	8157 m^2

Tab. 5.1: Hauptabmessungen des Containerschiffes No. 2280

Die experimentelle Widerstandbestimmung der *VWS* wurden in Modellversuchen für einen Geschwindigkeitsbereich von 18 bis 28 Knoten respektive einer Froude-Zahl von

[1]Im folgenden abgekürzt: *VWS*

0.20 bis 0.31 durchgeführt. Die Umrechnung der Ergebnisse auf die Großausführung erfolgt gemäß den üblichen Verfahren, siehe [1].

5.1 Geometrieerzeugung

Ausgehend von dem vorliegenden Spantenriss wurde die Geometrie des Schiffes vermessen. Die Modellierung erfolgte anschließend mit Hilfe des Programmsystems *Napa*. Eine Ansicht des Schiffes ist in Abb. 5.1 zu sehen. Die in *Napa* erstellte Definitionsdatei für die Schiffsform ist im Anhang, Kapitel B, aufgeführt.

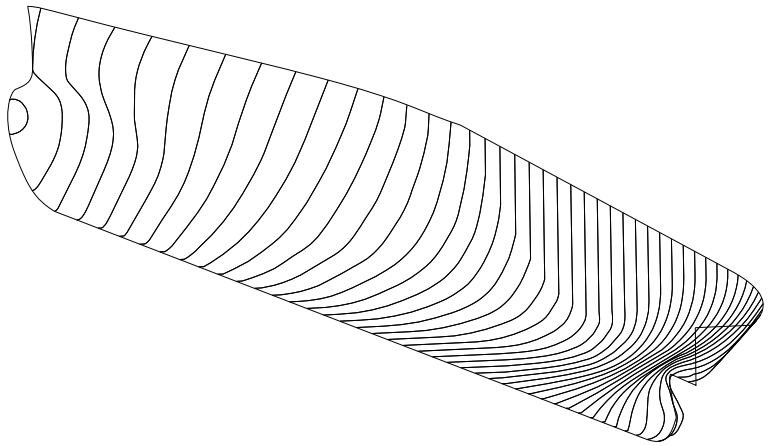

Abb. 5.1: Containerschiff No. 2280 - Ansicht von schräg vorne

Für den Entwurfstiefgang von $T = 11m$ beträgt die Abweichung von Verdrängung und Blockkoeffizient zwischen modellierter Form und den Angaben der *VWS* weniger als 0.02 %. Die Spantarealkurve, dargestellt in Abb. 5.2, stimmt ebenfalls sehr gut mit dem für Entwurf No. 2280 durch die *VWS* veröffentlichten Angaben überein.

5.2 Vernetzung und Netzfeinheit

Die Vernetzung erfolgte, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, unter Zuhilfenahme der von *HSVA* bereitgestellten Makros. Da mit Hilfe der Potentialtheorie die Zustände im Hinterschiffsbereich nur bedingt wiedergegeben werden können - dort dominieren reibungsbedingte Einflüsse - wurde dieser Bereich weniger dicht vernetzt. Zum Bug hin verringert sich die Länge[2] der Panels. Im Bereich des Heckwulstes wurde ebenfalls die Netzfeinheit erhöht, da ansonsten die komplexe Geometrie nicht adäquat durch die Panels wiedergegeben worden wäre.

[2]Gemeint ist die Ausdehnung eines Panels in Schiffslängsrichtung.

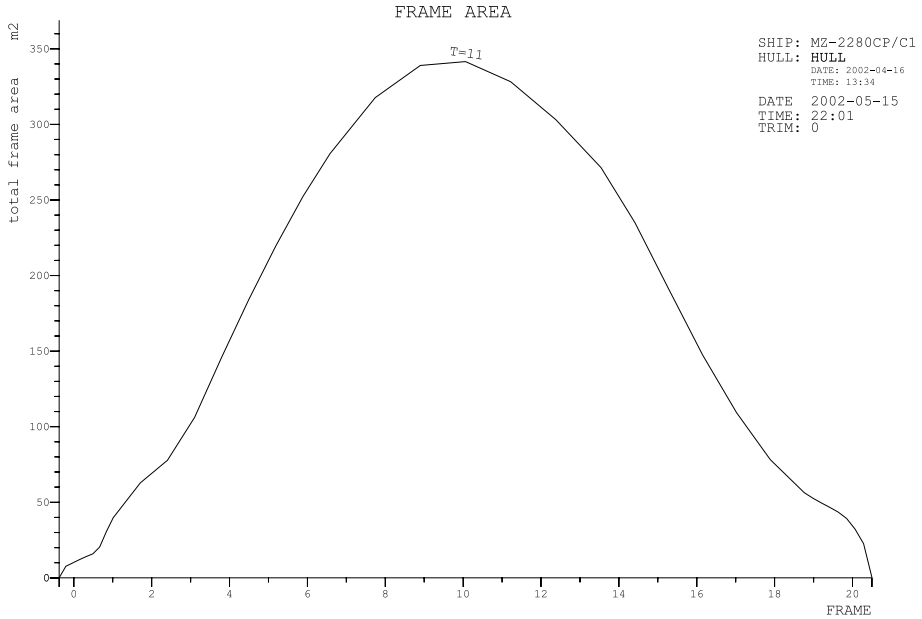

Abb. 5.2: Spantarealkurve

Um die Folgen von Änderungen der Netzgeometrie auf die Ergebnisse abzuschätzen, wurden folgende Variationen durchgeführt und ausgewertet:

- Variation der Panelanzahl N_v in vertikaler Richtung für ein Netz mit 51 Spanten. Untersucht wurden je Spant 8, 16 und 25 Panels in vertikaler Richtung.
- Variation der Panelanzahl in horizontaler Richtung sowie die Anordnung der Spanten[3].

Für $N_v = 8$ konnten für geringe sowie sehr hohe Geschwindigkeiten keine Lösungen erzielt werden. Eine Konvergenz der in *Shallo* ablaufenden Iterationsprozesse wurde hierfür nicht erreicht. Die Ergebnisse für $N_v = 16$ und $N_v = 25$ sind ähnlich. Für eine Froude-Zahl von $F_N = 0.275$ ist in Abb. 5.3 der Druckverlauf auf der Schiffsoberfläche dargestellt.

Die Unterschiede zwischen den Netzen mit $N_V = 16$ und $N_V = 25$ sind nur gering. Im Mittschiffsbereich ist das Netz mit $N_v = 8$ nicht in der Lage, die dort auftretenden Überdruckgebiete wiederzugeben. Die weiteren, hier nicht dargestellten Ergebnisse sind für die drei untersuchten Netze ähnlich. Eine Beeinflussung der Ergebnisse durch die Variation der Panelanzahl in vertikaler Richtung ist daher nur bedingt gegeben.

Im folgenden wurden daher, u. a. um die erforderliche Rechenzeit nicht unnötig zu verlängern, 16 vertikal übereinander angeordnete Panels je Spantabschnitt verwendet.

Untersucht wurden zwei Netze mit 51 bzw. 62 Spanten. Für gröbere Netze konnte keine Konvergenz erreicht werden bzw. diese führten nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen.

[3]Unter Spanten sind in diesem Zusammenhang vertikale Ebenen quer zur Schiffslängsachse zu verstehen, an welchen die Elemente aneinanderstoßen.

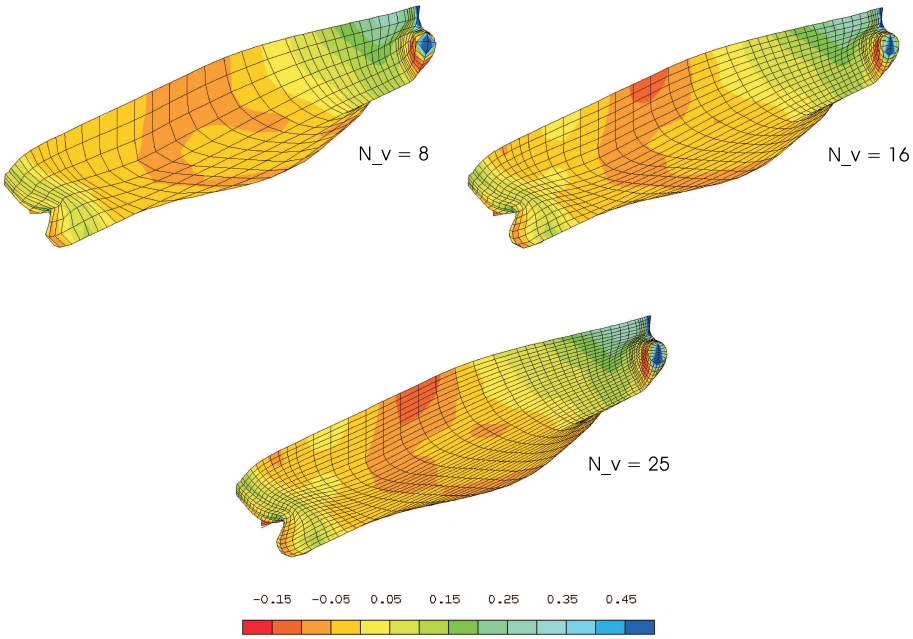

Abb. 5.3: Druckverteilung auf der Rumpfoberfläche für $F_n = 0.275$

Für die zwei untersuchten Varianten wurde der Spantabstand im Vor- und Achterschiff variiert.

Es zeigt sich, dass eine Variation der Netzfeinheit im Achterschiff nur geringen Einfluss auf die Ergebnisse ausübt. Da in diesem Bereich reibungsbedingte Effekte überwiegen, ist die Belastbarkeit der potentialtheoretisch ermittelten Lösung für das Achterschiff nur bedingt gegeben.

Im Vorschiffsbereich, also in einem Bereich mit nur schwach ausgeprägter Grenzschicht, ist die Potentialtheorie in der Lage, realitätsnahe Ergebnisse zu liefern. Eine feinere Vernetzung dieses Bereiches erhöht die Genauigkeit der berechneten Ergebnisse. Daher wurde im Vorschiffsbereich der Abstand der Aufpunkte in Schiffslängsrichtung geringer gewählt.

Für eine feinere Vernetzung im Vorschiffsbereich zeigt Abb. 5.4 die Druckverteilung auf der Rumpfoberfläche bei einer Froude-Zahl von $F_N = 0.275$.

Während die Druckverteilungen im Vor- und Achterschiffbereich nur gering voneinander abweichen, ist im Mittschiffsbereich ein deutlicher Unterschied zu erkennen. Das Netz mit 51 Spanten gibt ein deutlich stärker ausgeprägtes Unterdruckgebiet aus, welches sich bis in den Bodenbereich ausdehnt.

Allerdings zeigten Vergleiche[4] mit den durch die *VWS* experimentell ermittelten Daten, dass ein Netz mit 51 Spanten zu Ergebnissen führt, welche besser mit den gemessenen Werten übereinstimmen.

Für die folgenden Berechnungen wurde daher für die Rumpfoberfläche ein Netz mit 51

[4]Siehe hierzu auch Kapitel 5.4.

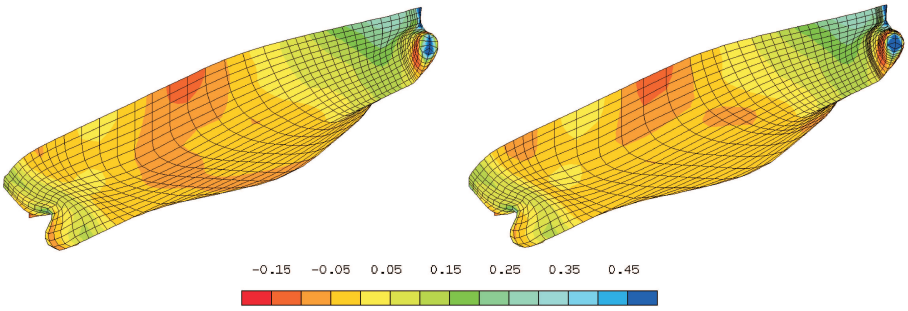

Abb. 5.4: Druckverteilung auf der Rumpfoberfläche für $F_N = 0.275$ (links: Netz mit 51 Spanten; rechts: 62 Spanten)

Spanten, d. h. mit 710 Panels und 777 Aufpunkten[5], verwendet. Dieses ist in Abb. 5.5 dargestellt. Die Berechnungen wurden für eine Fluiddichte von $\rho = 1025 kg/m^3$ durchgeführt. Trimm und Absenkungen wurden nicht behindert.

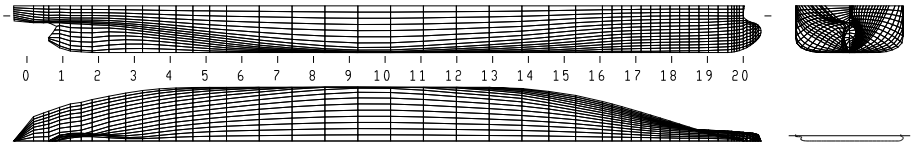

Abb. 5.5: Netz des Containerschiffes

5.3 Vernetzung der Wasseroberfläche

Ähnlich der in Abschnitt 4.5 beschriebenen Untersuchungen wurden für das in Abb. 5.5 dargestellte Netz Berechnungen mit zwei unterschiedlichen Netzen an der Wasseroberfläche[6] durchgeführt.

Für eine nichtlineare Behandlung der Oberflächenbedingung sind die Druckverläufe auf der Schiffsaußenhaut für eine Schiffsgeschwindigkeit von $F_N = 0.275$ in Abb. 5.6 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass im Vor- wie Hinterschiffsbereich die ermittelten Druckverläufe sehr ähnlich sind. Im Bereich vor der hinteren Schulter sind nahe der Wasserlinie Unterschiede zu verzeichnen.

Abb. 5.7 zeigt das Wellenbild für eine Froude-Zahl von $F_N = 0.275$. Während im Vor- und Hinterschiffsbereich sehr ähnliche Wellenbilder ermittelt werden, ist im Mittschiffsbereich eine geringe Abweichung zu verzeichnen. Dies wird durch den beim „shifted grid“ anders bestimmten Druckverlauf im Bereich zwischen vorderer und hinterer Schulter hervorgerufen.

[5]Im Englischen offset points genannt.

[6]Das „shifted grid“ ist bezogen auf das „default grid“ um eine halbe Panellänge in Schiffslängsrichtung verschoben.

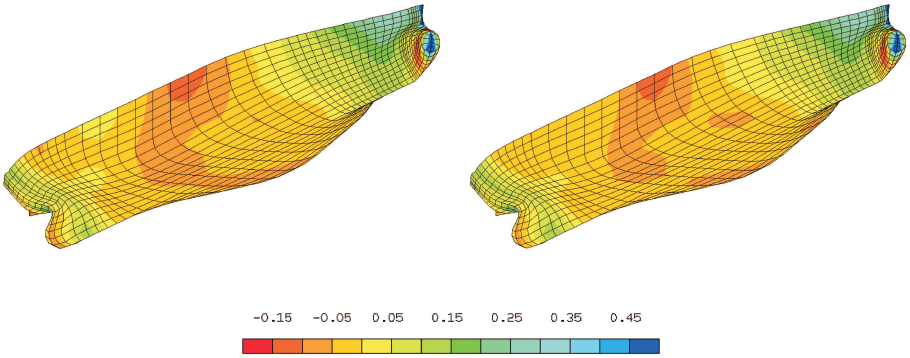

Abb. 5.6: Druckverteilung auf der Schiffsoberfläche für $F_N = 0.275$ (links: default grid; rechts: shifted grid)

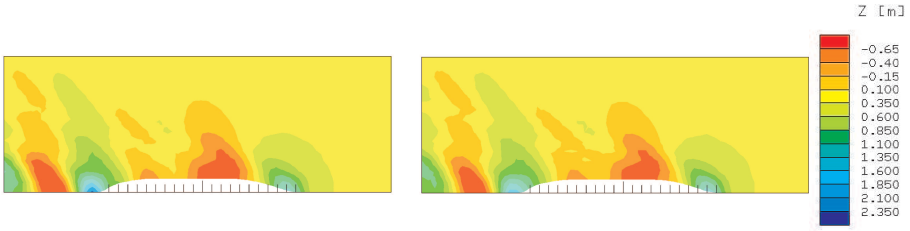

Abb. 5.7: Wellenbild für zwei ähnliche, versetzte Netze an der Wasseroberfläche bei $F_N = 0.275$ (links: default grid; rechts: shifted grid)

Ähnlich den in Abschnitt 4.5 für das Wigley-Schiff getroffenen Aussagen sind auch bei dem für die Berechnung des Containerschiffs No. 2280 verwendeten Netz nur geringe Auswirkungen auf die Ergebnisse bei unterschiedlichen Netzen an der Wasseroberfläche zu verzeichnen. Dies deutet auf eine ausreichend feine Vernetzung hin. Im folgenden werden Berechnungen für die nicht modifizierte Rumpfgeometrie mit dem in Abb. 5.5 dargestellten Netz für die Rumpfoberfläche durchgeführt.

5.4 Ergebnisse

Der Wellenwiderstandsbeiwert für das Containerschiff No. 2280 ist in Abb. 5.8 abgebildet. Deutlich ist zu das zu erwartende lokale Maximum bei $F_N \approx 0.2$ zu erkennen. Dieses wird durch eine günstige Überlagerung der Wellensysteme von Bugwulst, Vorsteven und Hinterschiff hervorgerufen. Für $F_N \approx 0.23$ sowie $F_N \approx 0.32$ werden lokale Minima ermittelt. Dies stimmt mit den Aufsagen in [12] überein. Ab einer Froude-Zahl von $F_N \approx 0.35$ steigt der Wellenwiderstandsbeiwert stark an; ein ökonomisch sinnvoller Betrieb ist für diesen Bereich nicht gegeben.

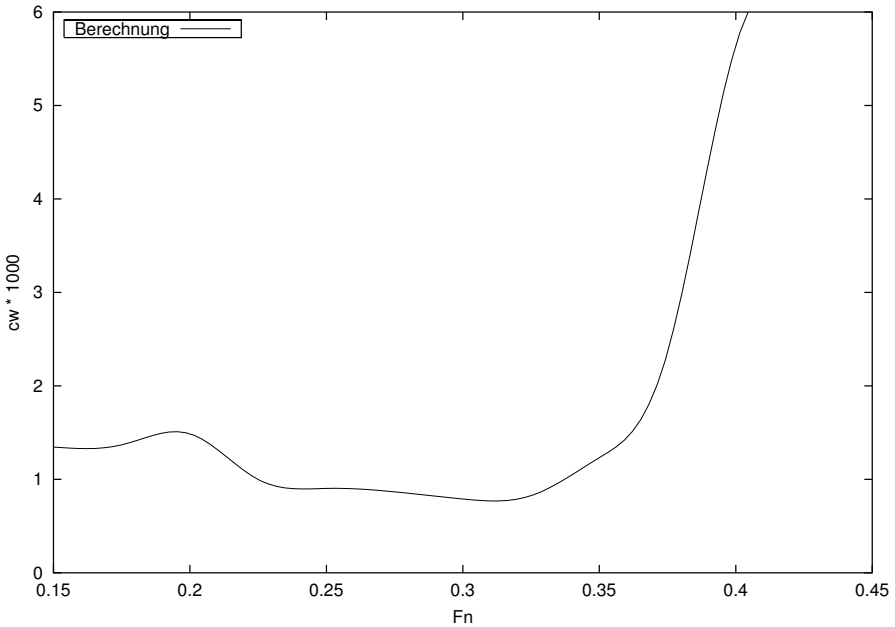

Abb. 5.8: Wellenwiderstandsbeiwert

Eine Gegenüberstellung der Widerstände, aufgetragen über die Schiffsgeschwindigkeit in Knoten, ist in Abb. 5.9 zu sehen. Dargestellt sind die numerisch ermittelten Ergebnisse für das oben ausgewählte Netz wie auch der experimentell durch die *VWS* bestimmte Gesamtwiderstand. Es wurden die Daten für eine nichtlineare Behandlung der Oberflächenbedingung nach dem dritten Iterationsschritt ausgewertet.

Da der Gesamtwiderstand $R_{T_{exp}}$ aus den Modellversuchen in [13] nicht gegeben war, wird

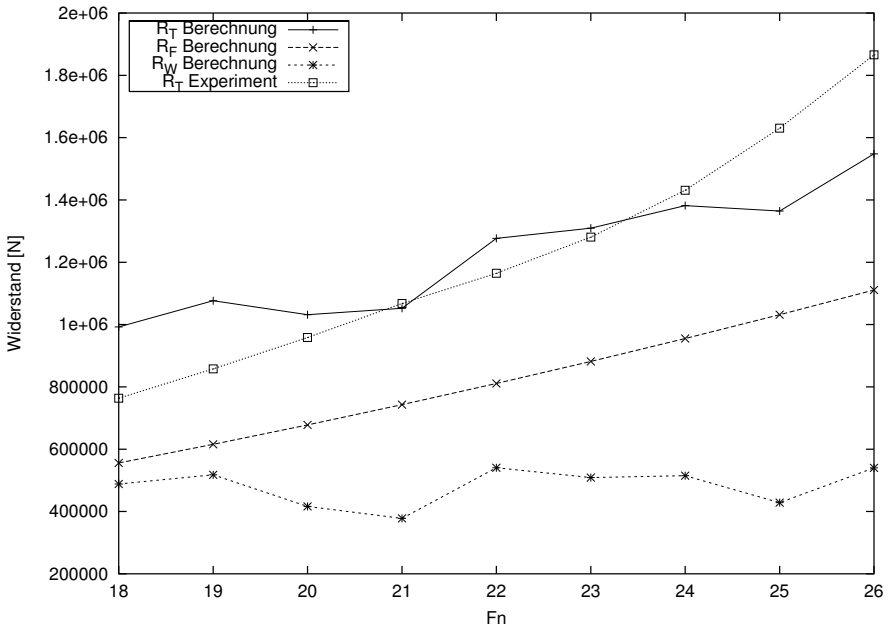

Abb. 5.9: Vergleich des Widerstands von Experiment und Berechnung

dieser aus dem Schub T und der Sogziffer t wie folgt ermittelt:

$$R_{T_{exp}} = T \cdot (1 - t) \tag{5.1}$$

Für den Geschwindigkeitsbereich von 20 bis 24 Knoten wird eine gute Übereinstimmung von Experiment und Berechnung erzielt. Die Abweichungen in diesem Bereich sind kleiner 6 %. Bei Geschwindigkeiten kleiner 20 Knoten ist der berechnete Gesamtwiderstand zu groß; für Geschwindigkeiten größer 24 Knoten ermittelt die Berechnung zu geringe Beträge.

Ähnlich den Ergebnissen für das Wigley-Schiff, siehe u. a. Abb. 4.7, lassen sich die Abweichungen bei geringen Geschwindigkeiten dadurch erklären, dass eine rein potentialtheoretische Lösung in diesem Bereich die Auswirkungen der Überlagerung von Bug- und Heckwellensystem sowie des Bugwulstes zu stark wiedergibt. Eine Dämpfung durch Reibungseffekte wird nicht berücksichtigt.

Am Institut für Maritime Systeme und Strömungstechnik parallel zu dieser Arbeit durchgeführte Untersuchungen[7] der Strömungsverhältnisse mit Hilfe eines RANSE-Solvers bestätigen dies. Insbesondere bei geringen Geschwindigkeiten ist der durch *Shallo* ausgegebene Reibungswiderstand um bis zu 10 % größer.

Bei hohen Geschwindigkeiten ist die Ursache für den im Vergleich zu den experimentell gewonnenen Ergebnissen zu geringen Reibungswiderstand schwieriger zu erklären. Es ist zu vermuten, dass das potentialtheoretisch ermittelte Minimum des Wellenwiderstands bei 25 Knoten in Realität weniger deutlich ausgeprägt ist. Durch reibungsbedingte Dämpfung

[7]Diese Problematik wurde im Rahmen einer Projektarbeit durch Gordon Ringwelski bearbeitet.

wird die widerstandssenkende, günstige Überlagerung von Bug- und Heckwellensystemen abgeschwächt.

Abb. 5.10 zeigt numerisch ermittelten und gemessenen Trimm aufgetragen über die Froude-Zahl. Es ist zu erkennen, dass die angewendeten numerischen Methoden in der Lage sind, den sich einstellenden Trimm widerzuspiegeln. Die ermittelten Abweichungen sind gering. Nur für eine Geschwindigkeit von 20 Knoten ist ein deutlicher Unterschied erkennbar.

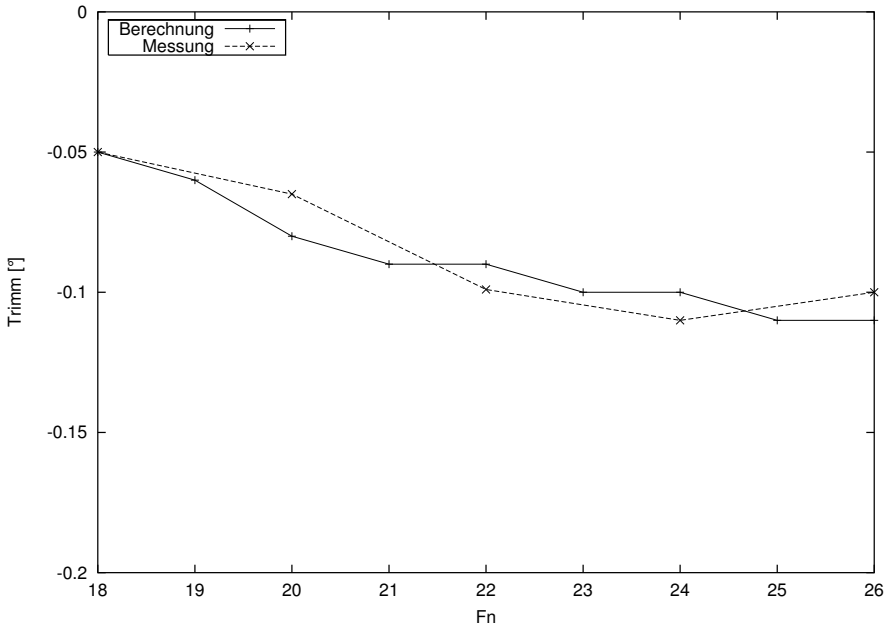

Abb. 5.10: Trimm nach Berechnung und Experiment

5.5 Zusammenfassung

Die in diesem Teil vorgestellten Untersuchungen haben gezeigt, dass die Netzfeinheit wie auch Netzgeometrie entscheidenden Einfluss auf die Güte der Ergebnisse haben. Es wurde ein Netz ermittelt, mit dem realitätsnahe Resultate erzielt werden können.

Wie auch bei den Untersuchungen für das Wigley-Schiff ergibt sich, dass niedrige Geschwindigkeiten geringe Anforderungen an Netzfeinheit und numerische Modellierung stellen. Höhere Geschwindigkeiten erfordern eine sorgfältigere Wahl der Netzstruktur.

Die vorliegenden Ergebnisse stimmen mit experimentell erzielten Daten weitgehend überein. Die in Teil 5 vorgestellte Verfahrensweise eignet sich daher für die Abschätzung der hydrodynamischen Eigenschaften des Containerschiffes.

Näher zu untersuchen ist allerdings, in wie fern der Reibungswiderstand durch die auf der ITTC-Kennlinie basierende Abschätzung in *Shallo* vertrauenswürdig ist bzw. ob durch die Anwendung numerisch aufwendiger Verfahren wie z. B. RANSE-Solvern eine Verbesserung der Ergebnisgüte erreicht werden kann.

Teil 6

Globale Formvariationen

Aufbauend auf den in Teil 5 beschriebenen Ergebnissen für das Containerschiff No. 2280 wurden die Auswirkungen von Modifikationen globaler Formparameter auf das Wellenwiderstandsproblem untersucht.

Da die ursprünglich vorgesehenen komplexen Änderungen - geplant war die Variation von Blockkoeffizient, Verdrängung, L_{c_B} etc - nicht möglich war[1], wurden diese Untersuchungen auf globale Formvariationen in Form von affinen Verzerrungen beschränkt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Kapitel 6.1 dargelegt.

Weiterhin wurden Untersuchungen durchgeführt mit dem Ziel, den Effekt eines parallelen Mittelschiffes auf Wellenwiderstand, Wellenbild und Schwimmlage zu analysieren. Kapitel 6.2 beschreibt die durchgeführten Berechnungen; eine Analyse und Auswertung der Daten wird dargelegt.

6.1 Affine Verzerrungen

Für die Durchführung affiner Verzerrungen der Schiffsgeometrie wurde das Programm *Transform* entwickelt. Ausgehend von einem gegebenen *Shallo*-Netz verändert dieses Programm die Koordinaten der Eckpunkte entsprechend globalen Skalierungsfaktoren in den drei Koordinatenhauptachsen. Eine Beschreibung dieses Programmes ist in Kapitel C.3 zu finden.

6.1.1 Varianten

Für das Containerschiff No. 2280 wurden die Auswirkungen von Längenänderungen untersucht. Die Länge zwischen den Loten wurde hierfür in je zwei Schritten um 5% verkleinert bzw. vergrößert. Breite und Tiefgang wurden nicht verändert. Hieraus ergeben sich die in

[1] Eine Anleitung für die Durchführung derartiger Transformationen mit Hilfe von *Napa* ist im Anhang Teil D zu finden. Allerdings zeigte es sich, dass die durch die *HSVA* bereitgestellten Makros nicht in der Lage sind, diese modifizierten Geometrien in geeigneter Form für *Shallo* auszugeben.

Tab. 6.1 dargestellten Hauptabmessungen. Eine Seitenansicht der für die Berechnungen verwendeten Netze ist in Abb. 6.1 zu finden.

Modifikation	L_{PP}	∇	S
Original	215.00 m	42525 m^3	8157 m^2
L_{PP}: + 5 %	225.75 m	44651 m^3	8566 m^2
L_{PP}: + 10 %	236.50 m	46777 m^3	8973 m^2
L_{PP}: - 5 %	204.25 m	40399 m^3	7769 m^2
L_{PP}: - 10 %	193.50 m	38273 m^3	7415 m^2

Tab. 6.1: Hauptabmessungen der affin verzerrten Schiffe

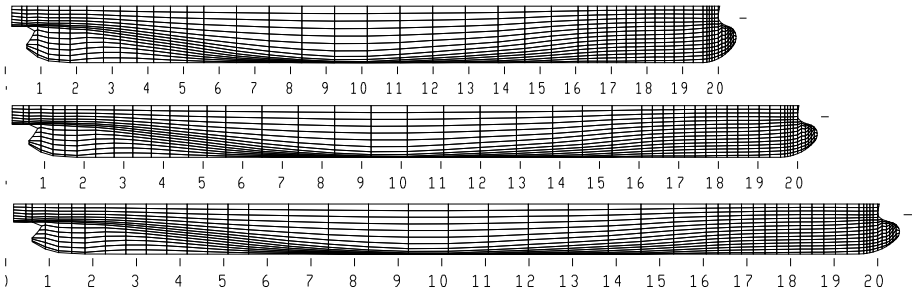

Abb. 6.1: Seitenansicht der für das Ausgangsschiff und für zwei Varianten verwendeten Netze auf der Rumpfoberfläche(von oben: L_{PP}: - 10 %, No. 2280 unverändert, L_{PP}: +10 %)

6.1.2 Ergebnisse

Wie bei der Untersuchung der unveränderten Schiffsform wurden die Berechnungen für eine Fluiddichte von $\rho = 1025 kg/m^3$ durchgeführt. Als Netz an der Oberfläche wurde das sog. „default grid“, d. h. das nicht in Schiffslängsrichtung verschobene Netz, verwendet. Es wurde eine nichtlineare Oberflächenbedingung benutzt; die Ergebnisse des jeweils dritten Iterationsschrittes wurden ausgewertet. Es wurde ein Bereich von $F_N = 0.15$ bis $F_N = 0.45$ untersucht.

6.1.2.1 Wellenwiderstandsbeiwert

Der Wellenwiderstandsbeiwert aufgetragen über die Froude-Zahl ist in Abb. 6.2 dargestellt.

Den fünf untersuchten Varianten ist gemeinsam, dass bei geringen Geschwindigkeiten, d. h. für $F_N < 0.2$, der Widerstandsbeiwert größer ist als für $0.2 < F_N < 0.375$. Dies ist

u. a. darauf zurückzuführen, dass bei mittleren Geschwindigkeiten[2] die Wellensysteme von Bugwulst und Vorsteven sich teilweise auslöschen. Bei geringen Geschwindigkeiten ist dies nicht der Fall; es kommt zu einer Überlagerung der beiden Wellensysteme im Vorschiffsbereich.

Bei sehr hohen Geschwindigkeiten, $F_N > 0.375$, steigt der Widerstandsbeiwert stark an. Dies deutet darauf hin, dass bei diesen Froude-Zahlen eine ungünstige Umströmung des Schiffsrumpfes auftritt. Die Rumpfformen sind für einen derartigen Einsatz nicht ausgelegt[3]. Ein wirtschaftlicher Einsatz ist hierfür nicht gegeben.

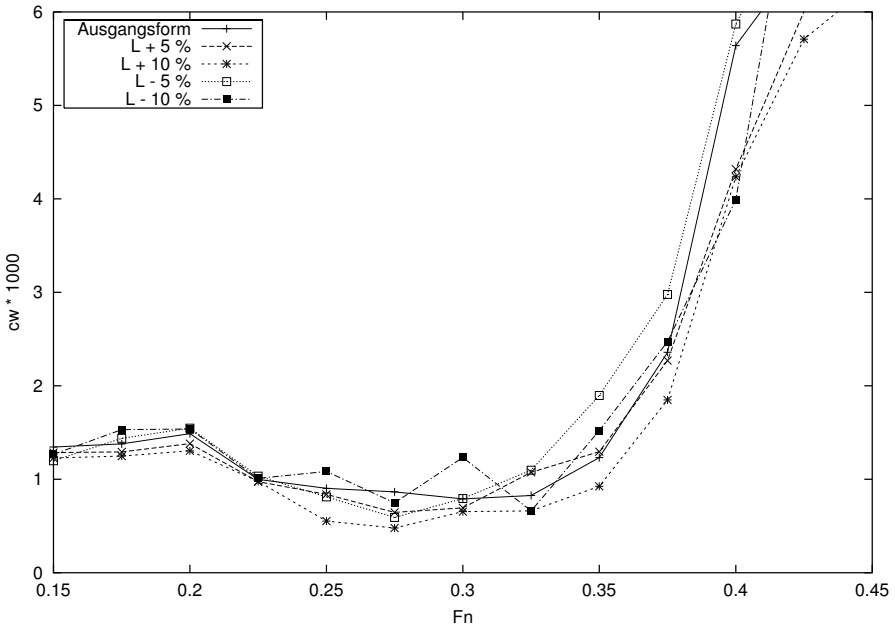

Abb. 6.2: Wellenwiderstandsbeiwert $c_W \cdot 1000$

Bei geringen und mittleren Geschwindigkeiten[4] unterscheiden sich die ermittelten Widerstandsbeiwerte nur gering. Dennoch ist zu erkennen, dass die gestreckten Rumpfformen einen geringfügig niedrigeren Wellenwiderstandsbeiwert aufweisen als die verkürzten Varianten.

Im Bereich $F_N = 0.225$ bis $F_N = 0.325$ fällt auf, dass bei der um 10 % verkürzten Variante deutliche Schwankungen des Beiwertes zu verzeichnen sind. Ein Ursache derartiger Schwankungen ist nicht ersichtlich[5].

Bei sehr hohen Geschwindigkeiten[6] ist der Widerstandsbeiwert der schlankeren Schiffsformen, verglichen mit der unveränderten Rumpfform, deutlich kleiner. Der Beiwert für die

[2]Der Bereich $0.2 < F_N < 0.325$ entspricht in etwa der Dienstgeschwindigkeit der Fahrzeuge von ca. 20 bis 28 Knoten.

[3]Siehe hierzu auch Abschnitt 6.1.2.3

[4]Bis ca. $F_N = 0.225$

[5]Möglich ist z. B., dass Instabilitäten des numerischen Lösungsalgorithmus bzw. ein für diese Varianten ungünstig konditioniertes Netz für diese Schwankungen verantwortlich sind.

[6]Eine Froude-Zahl von $F_N = 0.4$ entspricht bei $L_{PP} = 215m$ einer Schiffsgeschwindigkeit von ca.

verkürzten Rümpfe ist größer als bei der Ausgangsform.

Für eine Froude-Zahl von $F_N = 0.325$ bis $F_N = 0.4$ liegt der Widerstandsbeiwert des um 10 % verkürzten Rumpfs im Bereich des Ergebnisses für die Ausgangsversion bzw. die gestreckten Varianten. Da diese Variante allerdings bei geringeren Froude-Zahlen deutliche Schwankungen des Wellenwiderstandsbeiwerts aufweist, ist die Belastbarkeit dieser Ergebnisse nur gering.

6.1.2.2 Druckverteilung

Abb 6.3 zeigt die Druckverteilung über die Schiffsoberfläche für eine Froude-Zahl $F_N = 0.3$.

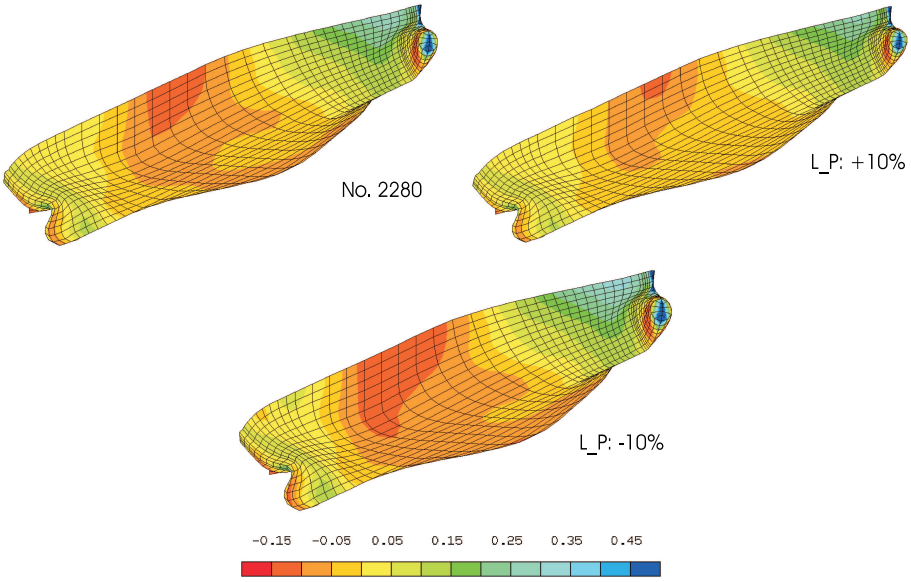

Abb. 6.3: Druckverteilung über die Schiffsoberfläche für eine Froude-Zahl von $F_N = 0.3$

Es ist zu erkennen, dass die Druckverteilung auf der Rumpfoberfläche durch die affinen Verzerrungen nur gering beeinflusst wird. Daher sind auch nur geringe Unterschiede des Widerstandsbeiwertes[7] zwischen den Variationen vorhanden.

Im Mittschiffsbereich allerdings zeichnet sich die gestreckte Variante dadurch aus, dass die dort auftretenden Unterdrücke geringer sind. Die Ausdehnung des Unterdruckbereichs ist kleiner. Dies wird dadurch hervorgerufen, dass durch die sanfteren Übergänge zwischen Vor- und Achterschiff ein harmonischerer Strömungsverlauf erreicht wird.

36 Knoten. Da bei diesen Geschwindigkeiten bereits brechende Wellen im Bugbereich entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse haben, ist fraglich, ob die hier angewendete Potentialtheorie belastbare und realitätsnahe Ergebnisse liefern kann.

[7]Dieser wird aus der Druckverteilung ermittelt.

6.1.2.3 Trimm und Absenkung

Die Auswirkungen der Formvariation auf Trimm, Abb. 6.4, und Absenkung, Abb. 6.5, sind gering.

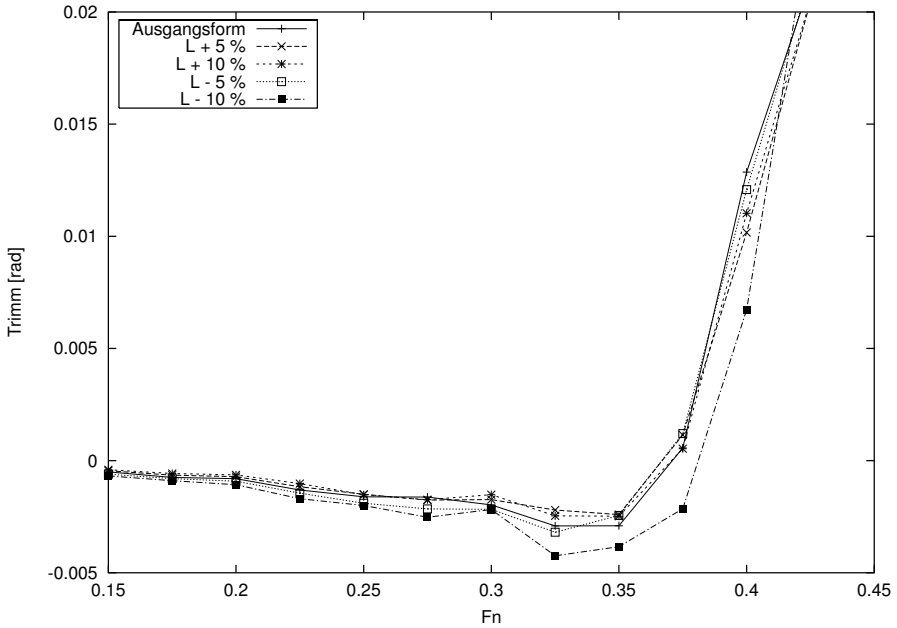

Abb. 6.4: Trimm

Aber auch hier ist zu erkennen, dass das Containerschiff No. 2280 bzw. dessen Variationen nicht für einen Betrieb bei $F_N > 0.35$ geeignet ist. Ab dieser Geschwindigkeit wächst der vorher geringe Trimm sehr stark an; das Fahrzeug wird deutlich hecklastig. Auf Grund der ungünstigen Schwimmlage und der hierdurch verursachten starken Wellenbildung erhöht sich der Wellenwiderstand bzw. Widerstandsbeiwert.

Die Absenkung, siehe Abb. 6.5, wächst mit steigender Geschwindigkeit stetig an. Ab einer Geschwindigkeit von $F_N > 0.35$ ist ebenfalls ein stärkerer Anstieg der Tauchung zu beobachten.

6.1.2.4 Wellenbild

In Abb. 6.6 ist das Wellenbild des Containerschiffs No. 2280 sowie der um 10 % gestreckten bzw. verkürzten Varianten dargestellt. Die Schiffsvarianten sind auf eine einheitliche Länge skaliert.

Die Unterschiede im Wellenbild im Vor- und Hinterschiffsbereich sind sehr gering. Sowohl Wellenform wie auch Wellenhöhe in diesen Bereichen weichen nur sehr gering voneinander ab.

Die Auswirkungen der in Abschnitt 6.1.2.2 beschriebenen Unterschiede in der Druckverteilung im Mittschiffsbereich auf das Wellenbild sind erkennbar. Während für das kürzeste

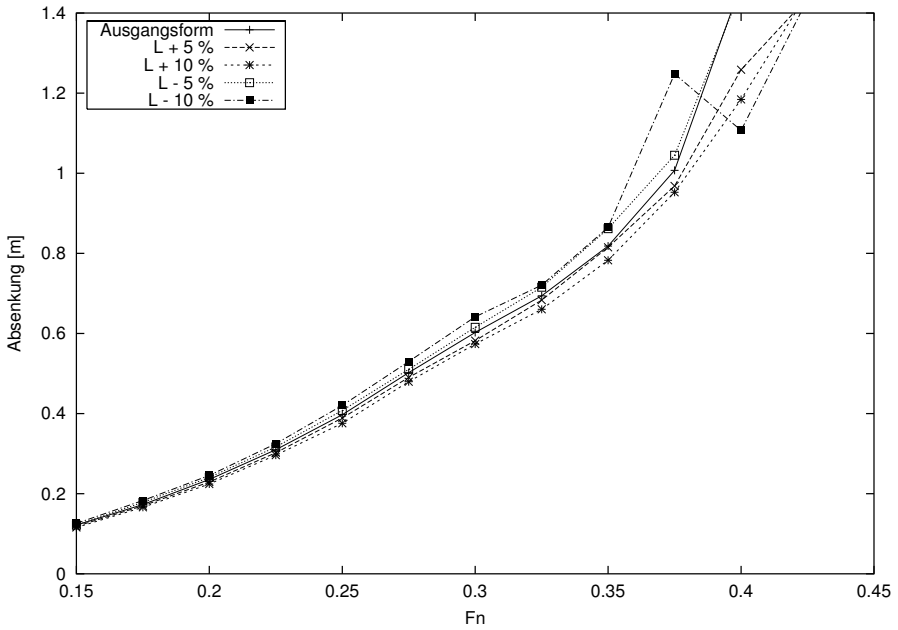

Abb. 6.5: Tauchung

Schiff - hier sind die Unterdrücke im Mittschiffsbereich am größten - im Bereich zwischen Hauptspant und hinterer Schulter ein ausgeprägtes Wellental ausgewiesen wird, ist dieses bei der gestreckten Variante nur in abgeschwächter Form vorhanden.

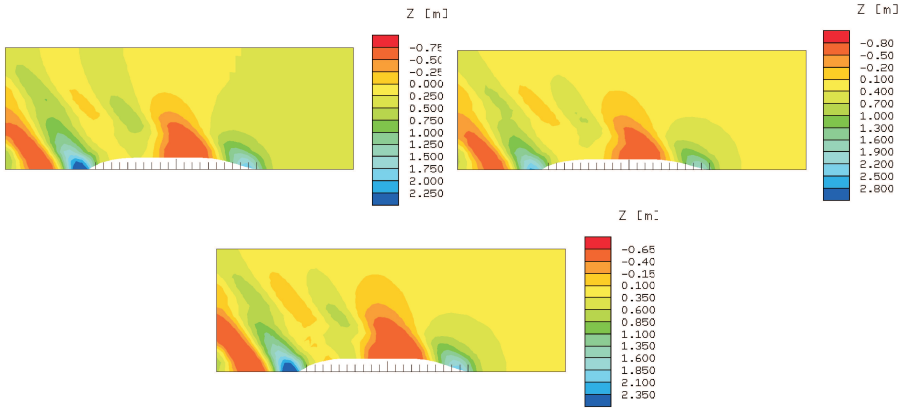

Abb. 6.6: Wellenbild für eine Froude-Zahl von $F_N = 0.3$
(von oben: Ausgangsform, L_{PP}: + 10 %., L_{PP}: -10%)

6.2 Paralleles Mittelschiff

Neben einer Skalierung des Containerschiffs in Schiffslängsrichtung wurde untersucht, welche Auswirkungen ein paralleles Mittelschiff auf Schiffswiderstand, Wellenbild und Schwimmlage hat.

Hierfür wurde, ausgehend von dem in Abschnitt 5.1 vorgestellten Netz für die Rumpfoberfläche mit Hilfe des Programms *TransformParallel*, siehe Abschnitt C.4 im Anhang, drei Varianten erzeugt.

6.2.1 Varianten

Da die Ladung des untersuchten Fahrzeugs aus Containern besteht, bietet es sich an, die Längenänderung entsprechend dem gängigen Containerabmessungen[8] durchzuführen. Daher wurde die Länge des parallelen Mittelschiffes so gewählt, dass in Längsrichtung

- ein 20-Fuß Container
- ein 40 Fuß-Container
- ein 20-Fuß- und ein 40-Fuß-Container

zusätzlich gestaut werden können. Hieraus ergibt sich eine Länge des parallelen Mittelschiffes L_P unter Berücksichtung von Minimalabständen zwischen den Containerstapeln von $6.5m$, $13m$ und $19.5m$. Das parallele Mittelschiff wurde im Hauptspant bei $x = 103m$ eingefügt. Breite, Tiefgang und Seitenhöhe wurde nicht verändert.

Einige Hauptabmessungen dieser Schiffe sind in Tab. 6.2 aufgeführt. Eine Seitenansicht der erzeugten Netze für das Ausgangsschiff wie auch für ein Fahrzeug mit $L_P = 19.5m$ ist in Abb. 6.7 zu sehen.

Modifikation	L_{PP}	∇	c_B
Original	215.00 m	42525 m^3	0.558
L_P: 6.5 m	221.5 m	44751 m^3	0.570
L_P: 13 m	228.0 m	46976 m^3	0.582
L_P: 19.5 m	234.5 m	49201 m^3	0.592

Tab. 6.2: Hauptabmessungen der Varianten mit parallelem Mittelschiff

Zu erwähnen ist, dass durch die durchgeführte Transformation im Mittschiffsbereich sehr lange, schmale Panels entstehen können. Bei der in dieser Arbeit angewandten Methodik zur Generierung eines parallelen Mittelschiffes ist dies nicht zu vermeiden.

[8] In der Containerschifffahrt gebräuchlich sind 20- (6.1 m) und 40-Fuß (12.2 m) Container.

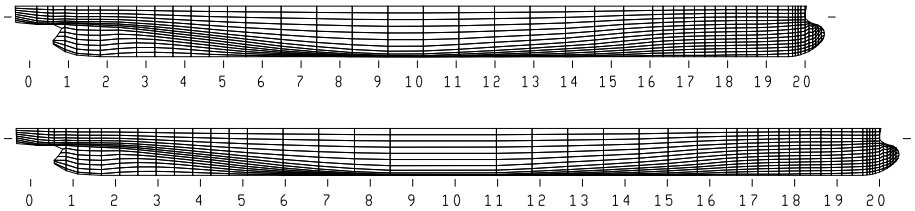

Abb. 6.7: Seitenansicht des Ausgangsschiffes und eines Schiffes mit parallelem Mittelschiff der Länge $L_P = 19.5m$ (oben: Ausgangsschiff; unten: $L_P = 19.5m$)

Durch schrittweise Vergrößerung der Panellängen kann überprüft werden, ob unerwünschte Auswirkungen auf die Berechnungsergebnisse auftreten. Da im Mittschiffsbereich i. allg. einfache, sich nur schwach ändernde Strömungsverhältnisse vorherrschen, ist eine Variation der Panellängen in diesem Bereich verglichen mit Änderungen im Bugbereich unkritisch.

6.2.2 Ergebnisse

Die für die hier vorgestellten Ergebnisse der Berechnungen gewählten Parameter[9] sind in Abschnitt 6.1.2 aufgeführt.

6.2.2.1 Wellenwiderstandsbeiwert

Der Verlauf der berechneten Wellenwiderstandsbeiwerte ähnelt dem der affin verzerrten Schiffsformen. Diese sind in Abb. 6.8 aufgeführt.

Bei geringen und mittleren Geschwindigkeiten[10] sind nur sehr geringe Unterschiede zwischen den Varianten zu erkennen. Die Widerstandsbeiwerte für eine Bereich von $F_N = 0.25$ bis $F_N = 0.3$ sind geringer als die ermittelten Beiwerte für geringere Froude-Zahlen. Dies ist wiederum auf den Bugwulst und das hierdurch erzeugte Wellensystem zurückzuführen. Die Ergebnisse für die Varianten mit parallelem Mittelschiff liegen für diese Schiffsgeschwindigkeiten geringfügig unter den Werten der unveränderten Form. Bei sehr hohen Geschwindigkeiten ist wiederum ein sehr starker Anstieg des Schiffswiderstandes zu verzeichnen.

Auffallend ist, dass für eine Froude-Zahl von $F_N = 0.325$ und $F_N = 0.35$ ein paralleles Mittelschiff von $L_P = 13m$ bzw. $L_P = 19.5m$ zu deutlich größeren Ergebnissen führt.

[9] Dichte, Vernetzung der Oberfläche sowie die numerische Behandlung der dortigen Randbedingung
[10] Bis $F_N \approx 0.225$

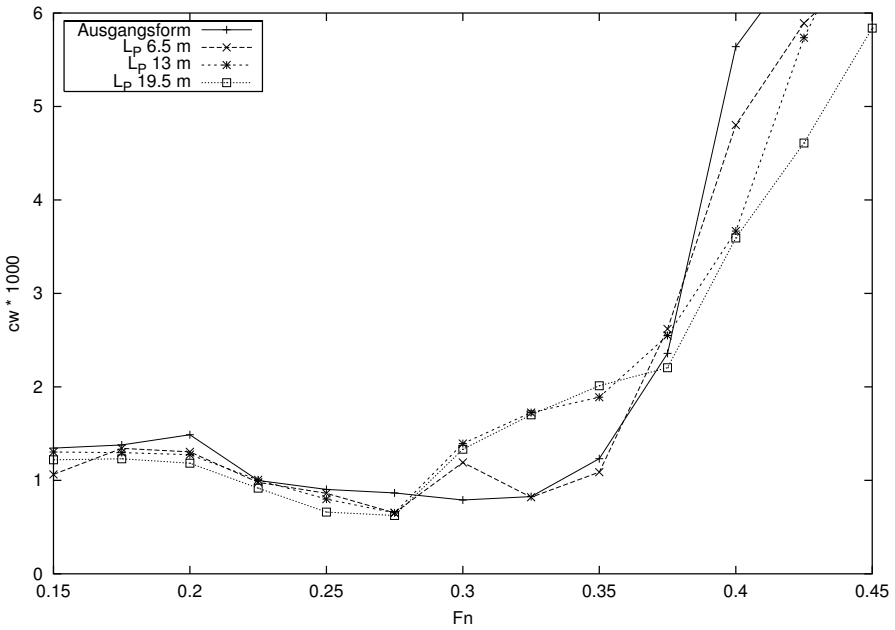

Abb. 6.8: Wellenwiderstandsbeiwerte

6.2.2.2 Druckverteilung

Die Druckverteilung über die Rumpfoberflächen der drei untersuchten Varianten wie auch der Ausgangsversion zeigt Abb. 6.9. Die Froude-Zahl beträgt $F_N = 0.325$[11].

Die Druckverläufe im Vor- und Achterschiff sind sehr ähnlich. Deutliche Unterschiede zwischen den Varianten sind nicht erkennbar.

Im Vergleich zur unveränderten Schiffsform wird für die um ein paralleles Mittelschiff der Länge $L_P = 6.5m$ verlängerte Variante im Bereich der vorderen Schulter ein kleineres Unterdruckgebiet ermittelt.

Bei den weiteren Varianten erstreckt sich das Gebiet starken Unterdrucks, im Gegensatz zu den anderen Rumpfformen, auch über den Boden. Am achteren Ende des parallelen Mittelschiffes bildet sich ein Überdruckgebiet aus, welches bei der Ausgangsform bzw. für die kürzeste Version des parallelen Mittelschiffs nicht zu beobachten ist.

6.2.2.3 Trimm und Absenkung

Die Auswirkungen eines parallelen Mittelschiffs auf den Trimm des Fahrzeugs sind in Abb. 6.10 dargestellt. Abb. 6.11 ist die Absenkung der Varianten in Abhängigkeit von der Froude-Zahl zu entnehmen.

Für eine Froude-Zahl von $F_N = 0.325$ und $F_N = 0.35$ sind, wie auch beim Wellenwiderstandsbeiwert c_W, deutliche Unterschiede zwischen den Varianten mit $L_P = 13m$ bzw.

[11] Diese Froude-Zahl wurde gewählt, da die ermittelten Wellenwiderstandsbeiwerte hierfür deutliche Abweichungen zwischen den Varianten aufzeigen

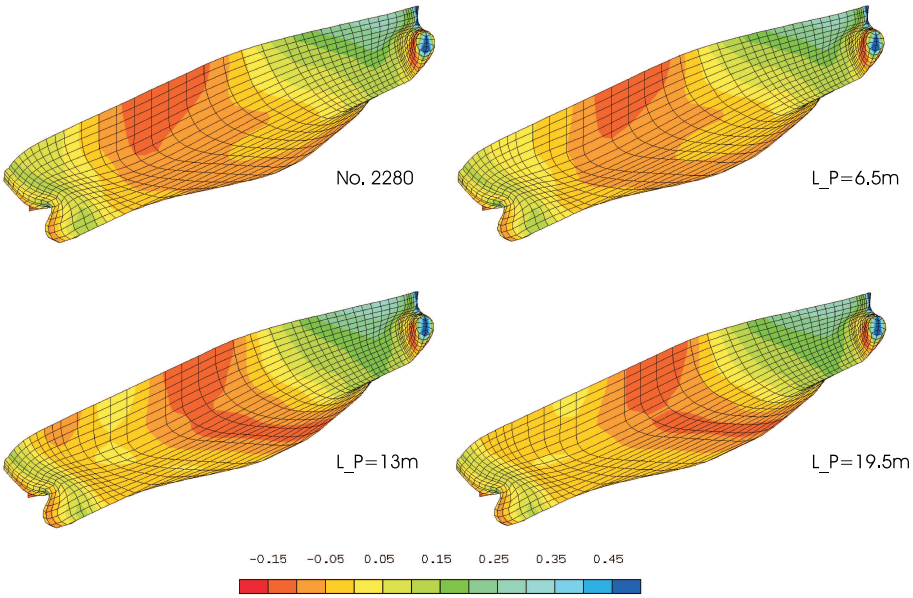

Abb. 6.9: Druckverteilung

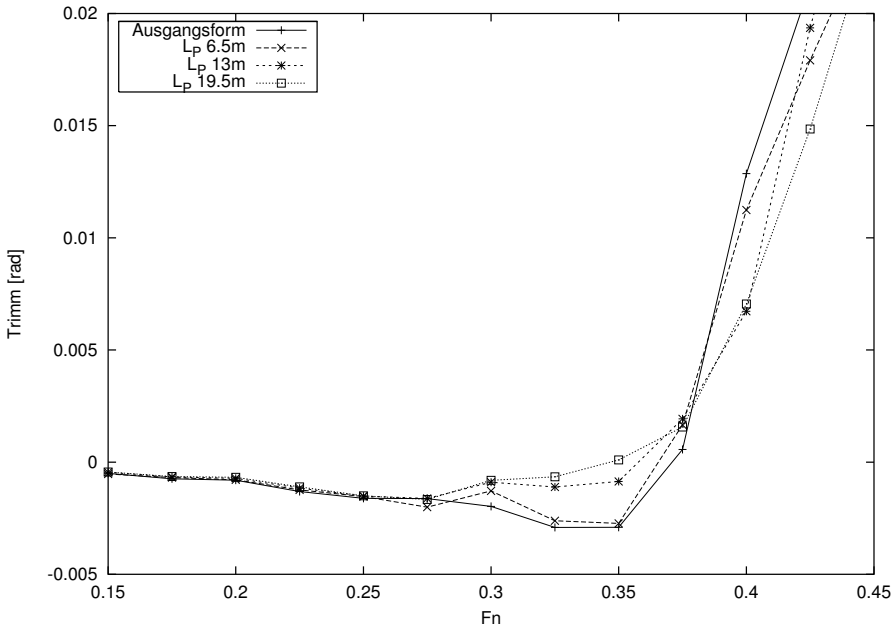

Abb. 6.10: Trimm

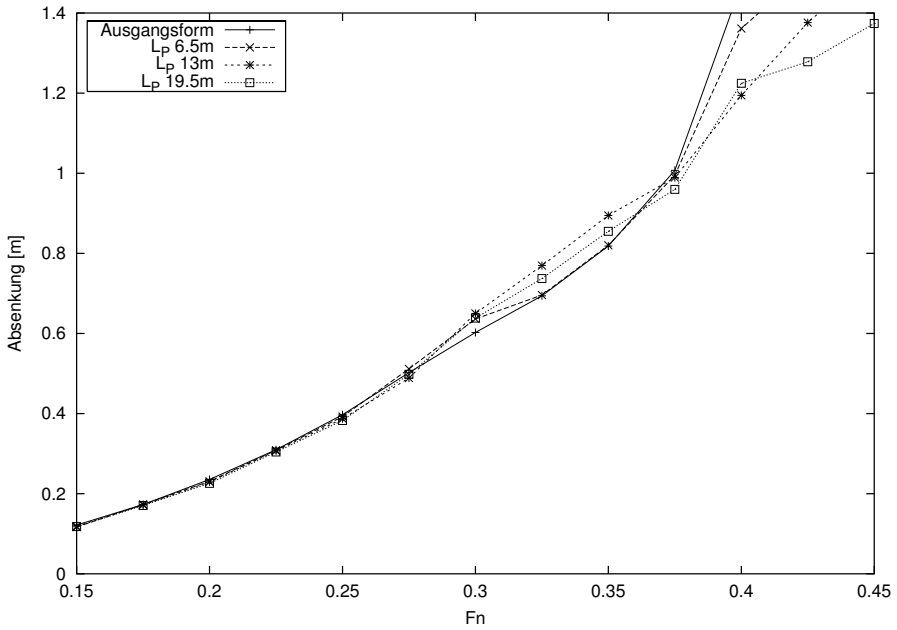

Abb. 6.11: Absenkung

$L_P = 19.5$ sowie den zwei weiteren untersuchten Schiffen zu verzeichnen. Dies ist auf die deutlich höheren Drücke am Boden im Bereich vor dem vorderen Ende des parallelen Mittelschiffes zurückzuführen. Hierdurch vertrimmt das Schiff weniger stark buglastig. Im Bereich $F_N > 0.375$ wächst die Vertrimmung stark an; die Schwimmlage wird stark hecklastig.

Bei der Absenkung sind nur sehr geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Fahrzeugen zu erkennen. Nur im Bereich sehr hoher Geschwindigkeiten treten Unterschiede zu Tage. Da allerdings nicht garantiert werden kann, dass die in dieser Arbeit angewendete Methodik der Potentialtheorie hierfür sinnvolle Ergebnisse liefert, lassen sich hieraus keine belastbaren Aussagen ableiten.

6.2.2.4 Wellenbild

Die Wellenbilder der unveränderten Form wie auch der Entwürfe mit einem parallelen Mittelschiff der Länge $L_P = 6.5m$, $L_P = 13m$ und $L_P = 19.5m$ bei einer Froude-Zahl von $F_N = 0.325$ sind in Abb. 6.12 abgebildet.

Die Wellenbilder der unveränderten Variante und der mit $L_P = 6.5m$ unterscheiden sich im Vor- und Hinterschiff nur gering.

Für $L_P = 13m$ und $L_P = 19.5m$ sind die Wellenhöhen größer als für die Versionen ohne bzw. mit kurzem parallelem Mittelschiff. Am hinteren Ende des parallelen Mittelschiffs bildet sich ein weiteres Wellensystem aus. Während im Bereich vor der parallelen Mittschiffssektion die großen Wellenhöhen durch das dort sehr deutlich ausgeprägte Unterdruckgebiet erklärt werden können, sind im Hinterschiff die zusätzlich bei dieser Form

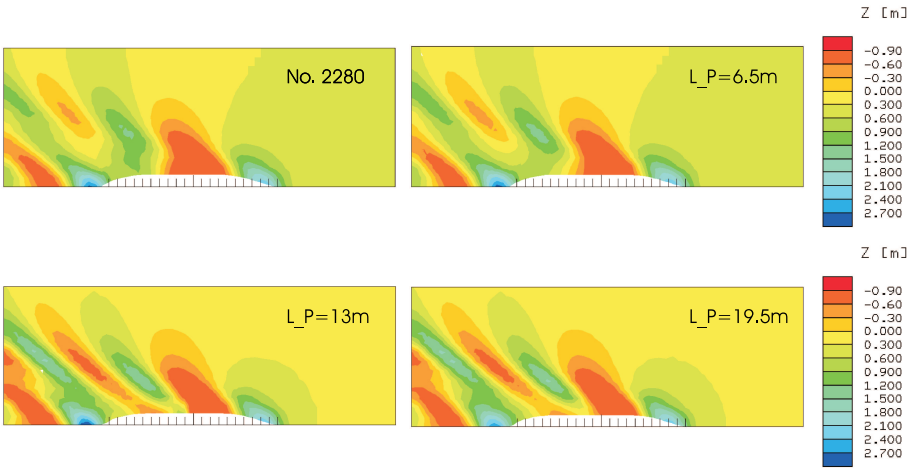

Abb. 6.12: Wellenbilder

auftretenden deutlich erkennbaren Unter- und Überdruckgebiete als Ursache zu nennen.

Da dem System Schiff durch Wellenbildung Energie entzogen wird, ist der verglichen mit den anderen Varianten hohe Widerstandsbeiwert bei $F_N \approx 0.325$ durch die starke Wellenbildung im Mittschiffsbereich zu erklären. Bei höheren und niedrigeren Froude-Zahlen treten diese zusätzlichen Gebiete mit deutlichem Unter- bzw. Überdruck nicht auf. Die Wellenwiderstandsbeiwerte sind vergleichbar mit denen der anderen Varianten.

Die in Abb. 6.13 abgebildete benetzte Oberfläche der Ausgangsversion wie auch der Variante mit $L_P = 19.5m$ stützt diese Aussage.

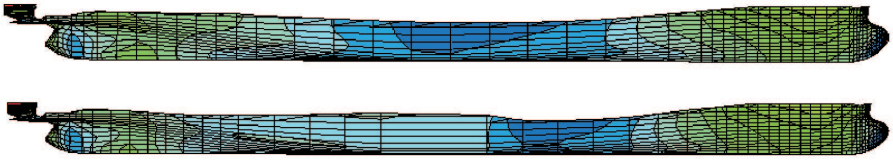

Abb. 6.13: Variation des parallelen Mittelschiffs: Benetzte Oberfläche in Fahrt bei $F_N = 0.325$ (oben: No. 2280; unten: $L_P = 19.5m$)

Während die Wellenkontur beider Schiffe im Vorschiffsbereich vergleichbar ist, ist ca. bei Spant 8 für die verlängerte Form ein Wellenberg deutlich erkennbar. Dieser beeinflußt im folgenden die Oberflächenkontur im Bereich des Hinterschiffs; ein zusätzliches Wellental wird hervorgerufen.

6.3 Zusammenfassung

In diesem Teil wurde gezeigt, welchen Einfluss affine Formvariationen auf den Wellenwiderstand, das Wellenbild wie auch die Schwimmlage haben.

Wie zu erwarten führt eine positive Skalierung des Schiffes in Schiffslängsrichtung, d. h. das Längen-zu-Breiten-Verhältnis wächst an, zu einem geringeren Schiffswiderstand. Der Trimm verringert sich. Eine Verkürzung des Schiffes bewirkt das Gegenteil.

Da die Form von Containerschiffen vielfach um die Ladung „herum“ entworfen wird, ist der Nutzen einer affinen Verzerrung in Schiffslängsrichtung nur beschränkt; zusätzliche Containerstaukapazität wird nur bedingt gewonnen.

Die Ergebnisse für die Berechnungen mit einem parallelen Mittelschiff sind in weiteren Untersuchungen zu validieren. Da für Varianten mit $L_P \geq 13.5m$ sehr lange, schlanke Panels im Mittschiffsbereich auftreten, sind insbesondere die ermittelten Abweichungen für $F_N \approx 0.325$ für Varianten mit $L_P \geq 13m$ zu untersuchen[12].

Werden affine Verzerrung und der Einsatz eines parallelen Mittelschiffs verglichen, so ist zu erkennen, dass ein paralleles Mittelschiff zu ungünstigeren Strömungsbedingungen und damit zu einem höheren Widerstand des jeweiligen Schiffes führt. Dies ist insofern verständlich, als durch ein paralleles Mittelschiff der vorher harmonisch gestaltete Übergang[13] von Vor- zum Hinterschiff gestört wird. Interessant wäre, zu untersuchen, welche Ergebnisse für die Verlängerung eines Fahrzeuges ermittelt würden, das in der Ausgangsversion ein paralleles Mittelschiff aufweist.

[12] So sollte überprüft werden, welchen Einfluss eine horizontale Teilung der Panels im Bereich des Hauptspants hat.

[13] Das Containerschiff No. 2280 besitzt in der Ausgangsversion kein paralleles Mittelschiff.

Teil 7

Lokale Formänderungen im Bugbereich

Viele moderne Schiffsformen sind heute mit einem Bugwulst ausgerüstet. In Fahrt wird durch diesen ein zusätzliches Wellensystem erzeugt, welches sich im Bereich der Dienstgeschwindigkeit mit den durch den Vorsteven hervorgerufenen Wellen und bedingt mit dem Wellensystem der vorderen Schulter überlagert. Hierdurch kommt es, sofern der Bugwulst geeignet gestaltet ist, zu einer teilweisen Auslöschung der Wellensysteme. Die Wellenhöhen werden geringer; der Wellenwiderstand sinkt.

Bei langsamen Geschwindigkeiten ist ein Bugwulst nicht vorteilhaft. Da hier der Reibungswiderstand dominiert, erhöht sich der Gesamtwiderstand durch die benetzte Oberfläche. Daher ist der Einsatz eines Bugwulstes nur bei schnellen Schiffen sinnvoll.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Untersuchungen durchgeführt, welchen Einfluss Formvariationen im Bugbereich auf Wellenwiderstand, Wellenbild und Schwimmlage ausüben. Kapitel 7.1 stellt die untersuchten Varianten vor. Einige Anmerkungen zur Geometrieerzeugung und zum Datenexport nach *Shallo* sind in Kapitel 7.2 zu finden. In Kapitel 7.3 sind die ermittelten Ergebnisse aufgeführt. Eine Zusammenfassung und Interpretation dieser Berechnungsergebnisse ist in Kapitel 7.4 zu finden.

7.1 Varianten

Neben der in Teil 5 vorgestellten Ausgangsgeometrie wurden zwei Modifikationen des Bugwulstes untersucht, nämlich:

- **Mk I:** Der Bugwulst des Containerschiffes No. 2280 wurde um ca. 2 Meter verlängert. Die Querschnittsfläche im Bereich des vorderen Lotes wurde um ca. 20 % erhöht. Die Spitze des Bugwulstes wurde geringfügig nach unten verlagert.
- **Mk II:** Anstatt des parabolischen Bugwulstes wurde ein Bugwulst mit einer eckigen Kontur eingestrakt. Das Design dieses Wulstes ist an die bei der Neptun-Werft in den 70er und 80er Jahren gebauten Schiffe angelehnt.

Bei beiden Varianten wurde der Übergang vom Bugwulst in den Vorschiffsbereich strakend gestaltet. Abb. 7.1 zeigt eine Seitenansicht der untersuchten Bugformen.

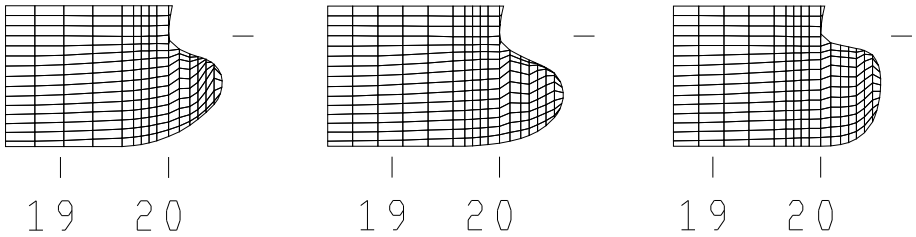

Abb. 7.1: Seitenansicht der verwendeten Netze im Bugbereich für die Varianten mit Bugwulst (von links: No. 2280 nicht modifiziert, vergrößerter parabolischer Bugwulst Mk I, kantiger Bugwulst Mk II)

Weiterhin wurden Berechnungen für Schiffsformen ohne vorstehenden Bugwulst durchgeführt. Hierfür wurde

- anlehnend an die in [13] vorgestellten Untersuchungen ein Taylor-Wulst mit senkrechtem Vorsteven,
- ein klassischer Klipperbug ohne Bugwulst

modelliert. Diese sind in Abb. 7.2 dargestellt.

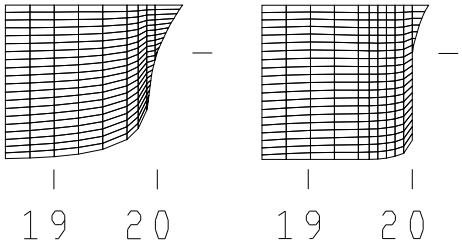

Abb. 7.2: Seitenansicht der verwendeten Netze im Bugbereich für zwei Rumpfformen ohne Bugwulst (links: Klipper-Bug; rechts: Taylor-Bug)

7.2 Geometrieerzeugung und Netzgenerierung

Basierend auf der Formdefinition des Containerschiffes No. 2280, siehe Teil 5 sowie Kapitel B im Anhang, wurden die Modifikationen im Bugbereich mit Hilfe des Programmsystems *Napa* durchgeführt[1].

[1] Die entsprechenden Dateien für die Formbeschreibung in *Napa* sind auf beiliegender CD enthalten.

Für die untersuchten Versionen mit Bugwulst wurde die Netzgeometrie auf der Rumpfoberfläche, basierend auf dem in Teil 5 beschriebenen Netz, sehr ähnlich gestaltet. Diese unterscheidet sich nur durch die Vernetzung im Bugwulstbereich. Die Netze achtern wie auch in großen Bereichen des Vorschiffes sind identisch.

Auf Grund der guten Übereinstimmung der Netzgeometrien für die Schiffe mit Bugwulst ist es möglich, die durch die Berechnungen ermittelten Ergebnisse direkt zu vergleichen. Ausführliche Konvergenz- und Variationsuntersuchungen in Bezug auf die Netzgeometrie, wie in Teil 5 durchgeführt, können entfallen.

Für die Formen ohne Bugwulst war die Aufbereitung der Geometrien für die weiteren Berechnungen mit *Shallo* nur eingeschränkt möglich. Trotz intensiver Bemühungen des Autors gelang es nicht, Netze zu erstellen, die denen der Schiffe mit Bugwulst ähneln. Vielmehr konnten erst durch eine feinere Vernetzung bedingt geeignete Netze erzeugt werden. Imperfektionen im Bugbereich mußten manuell korrigiert werden. Um eine Vernetzung des Fahrzeuges mit Taylor-Rumpf zu ermöglichen, war es notwendig, den Heckwulst zu entfernen. Eine konventionelle Form des Achterschiffs kommt zum Einsatz.

Es sei daher an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Verläßlichkeit der im folgenden aufgeführten Ergebnisse für den Taylor-Wulst wie auch für die Variante mit Klipper-Bug nur bedingt gegeben ist.

7.3 Ergebnisse

Für die Berechnungen wurde eine Fluiddichte von $\rho = 1025 kg/m^3$ angenommen. Eine nichtlineare Oberflächenbedingung kam zur Anwendung. Die Ergebnisse des jeweils dritten Iterationsschrittes wurden ausgewertet. Es wurde ein Bereich von $F_N = 0.15$ bis $F_N = 0.45$ untersucht.

7.3.1 Wellenwiderstand

Die ermittelten Wellenwiderstandsbeiwerte[2] aufgetragen über die Froude-Zahl sind in Abb. 7.3 dargestellt.

Wie bereits in Teil 5 und 6 beschrieben, ist auch hier ein sehr starker Anstieg der Wellenwiderstandsbeiwerte ab einer Froude-Zahl von $F_N = 0.375$ zu verzeichnen. Die deutliche Abweichung bei $F_N = 0.425$ für Mk II ist nach Meinung des Autors nicht relevant, sondern auf Instabilitäten bei den numerischen Lösungsalgorithmen zurückzuführen. Im Bereich $0.275 < F_N < 0.375$ sind die Widerstandsbeiwerte geringer als bei geringen Geschwindigkeiten. Der positive Effekt eines Bugwulstes wie auch die günstige Überlagerung von Bug- und Heckwellensystem kommt hier zum Tragen.

[2]Da die Unterschiede in der benetzten Oberfläche zwischen den einzelnen untersuchten Varianten sehr klein sind, ist kein wesentlicher Einfluss der Bugwulstformen auf den Reibungswiderstand festzustellen. Daher unterscheiden sich die in dieser Arbeit aus Platzgründen nicht dargestellten Reibungswiderstandsbeiwerte c_f nicht bzw. nur sehr gering.

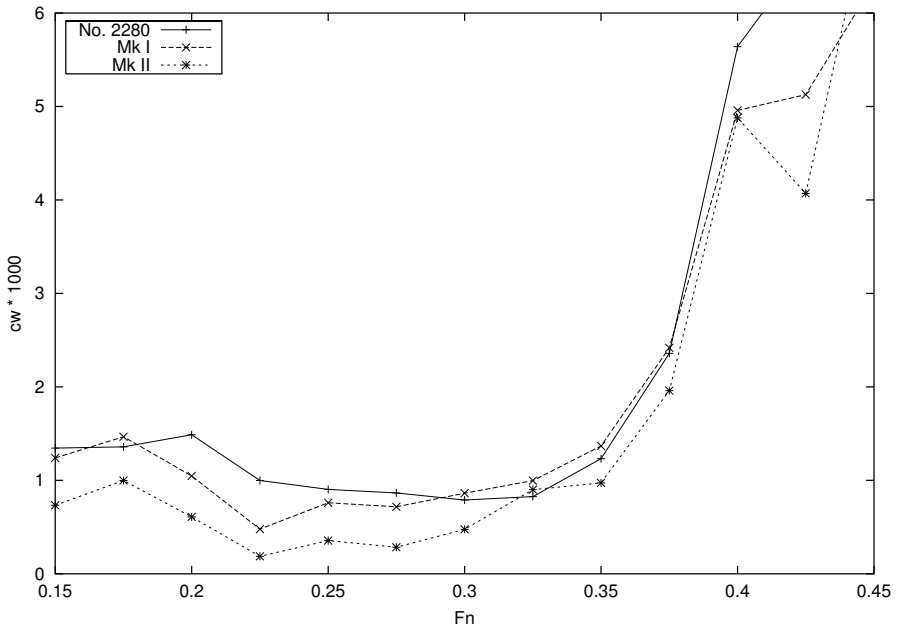

Abb. 7.3: Wellenwiderstandsbeiwerte

Im Bereich von $F_N = 0.2$ bis $F_N = 0.275$ zeigt sich, dass der vergrößerte elliptische Bugwulst der nicht modifizierten Form überlegen ist. Bei größeren Geschwindigkeiten ist die Abweichung zwischen den Ergebnissen dieser beiden Varianten nicht signifikant.

Der kantige Bugwulst Mk II weißt für eine Froude-Zahl kleiner $F_N = 0.325$ einen deutlich geringeren Wellenwiderstandsbeiwert auf als die elliptischen Formen. Da derartige Formen vielfach als veraltet angesehen werden, ist dieses Ergebnis überraschend.

Die für den Klipperbug sowie für den Taylorbug durch *Shallo* ermittelten Widerstandsbeiwerte sind nach der Meinung des Autors nicht verläßlich und belastbar[3]. Auf eine Darstellung in Abb. 7.3 wird daher verzichtet.

7.3.2 Druckverteilung

Für eine Froude-Zahl von $F_N = 0.225$ ist die Druckverteilung über die Schiffsoberfläche in Abb. 7.4 zu sehen. Abb. 7.5 zeigt die im Bugbereich wirkenden Drücke in einer vergrößerten Ansicht.

Die Druckverteilung im Achterschiff ist für alle Varianten ähnlich[4]. Im Vorschiff der Varianten mit Bugwülsten sind dicht unterhalb der Konstruktionswasserlinie abwechselnd Über- und Unterdruckgebiete vorhanden. Für eine Froude-Zahl von $F_N = 0.225$ ist der Unterdruckbereich bei Spant 18 für Mk II, d. h. für den kantigen Bugwulst geringfügig

[3]Es sind große Schwankungen zwischen den Iterationsschritten zu verzeichnen. Für mehrere Geschwindigkeiten werden nicht realistische, negative Widerstandsbeiwerte ausgegeben.

[4]Ausgenommen ist hiervon die Rumpfform mit Taylor-Wulst. Da hier die Form des Hinterschiffs geändert wurde, sind die erzielten Ergebnisse nicht mit den anderen Varianten vergleichbar.

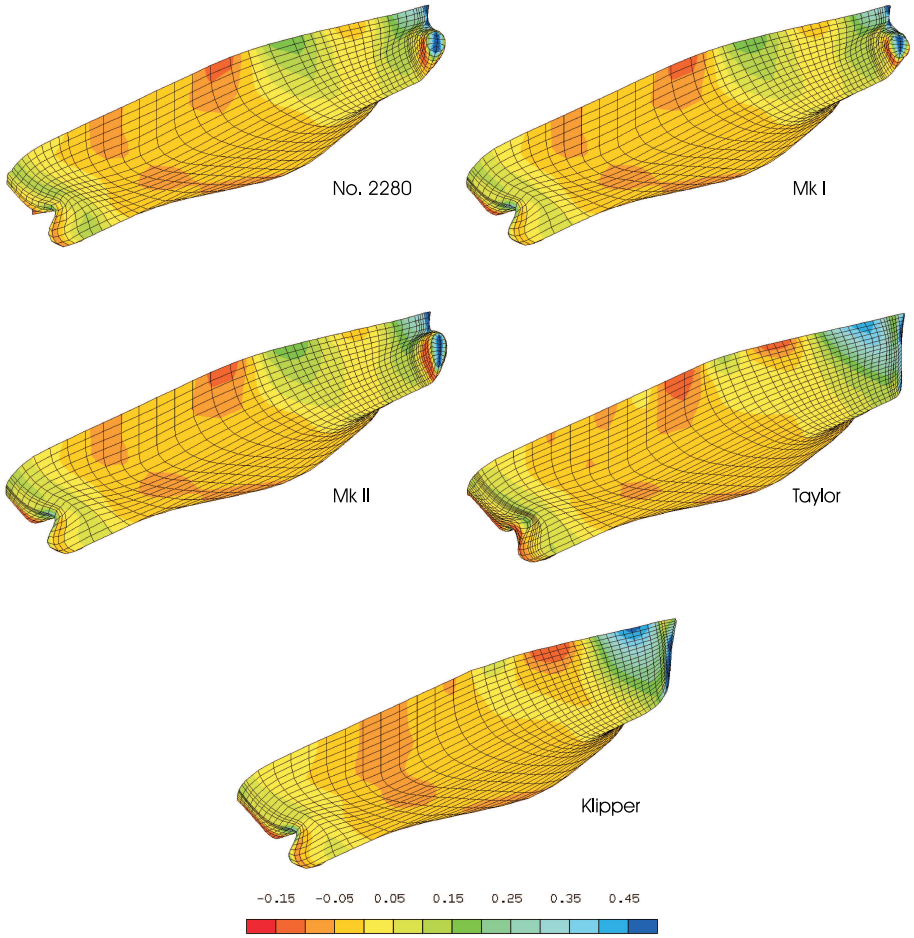

Abb. 7.4: Druckverteilung für eine Froude-Zahl von $F_N = 0.225$

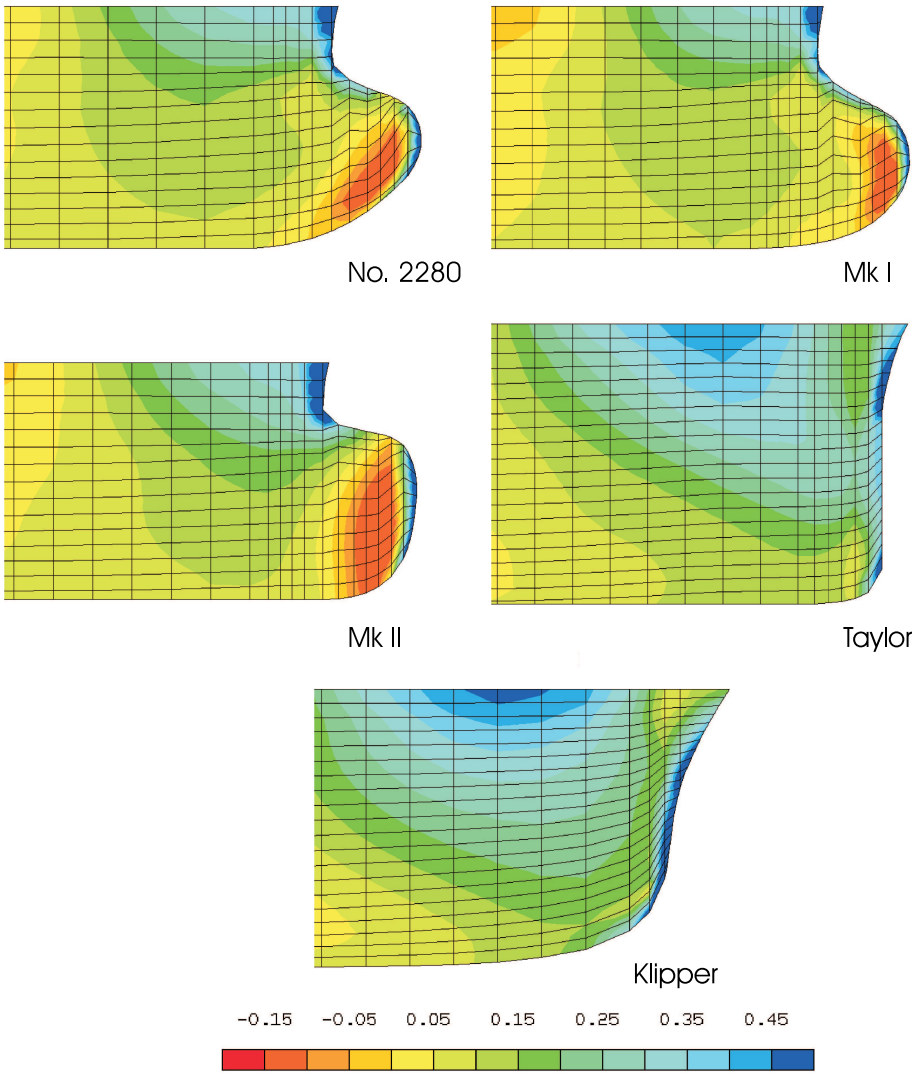

Abb. 7.5: Druckverteilung im Bugbereich für eine Froude-Zahl von $F_N = 0.225$

kleiner. Die Druckverteilung auf dem Bugwulst, siehe Abb. 7.5, zeigt, dass das Unterdruckgebiet für den vergrößerten elliptischen Bugwulst Mk I kleiner ist; die horizontale Ausdehnung ist geringer. Dieses bildet sich im Gegensatz zur Ausgangsform nicht nur im unteren Bereich des Bugwulstes, sondern über die gesamte Höhe. Für den Bugwulst Mk II wird ein größeres Unterdruckgebiet im vorderen Bereich des Bugwulstes ermittelt.

Klipperbug wie auch Taylorbug weisen keine deutlich ausgeprägten Unterdruckgebiete im Vorschiffsbereich auf. Stattdessen werden hier deutliche Überdrücke aufgezeigt. Im Bereich der vorderen Schulter wird für einen Taylorbug ein weiteres Unterdruckgebiet berechnet. Für den Klipperbug verlagert sich dieses Unterdruckgebiet im Vergleich zu den Varianten mit Bugwulst nach vorne.

7.3.3 Trimm und Absenkung

Absenkung und Trimm, aufgetragen über die Froude-Zahl, sind für die untersuchten Varianten in Abb. 7.6 und Abb. 7.7 dargestellt.

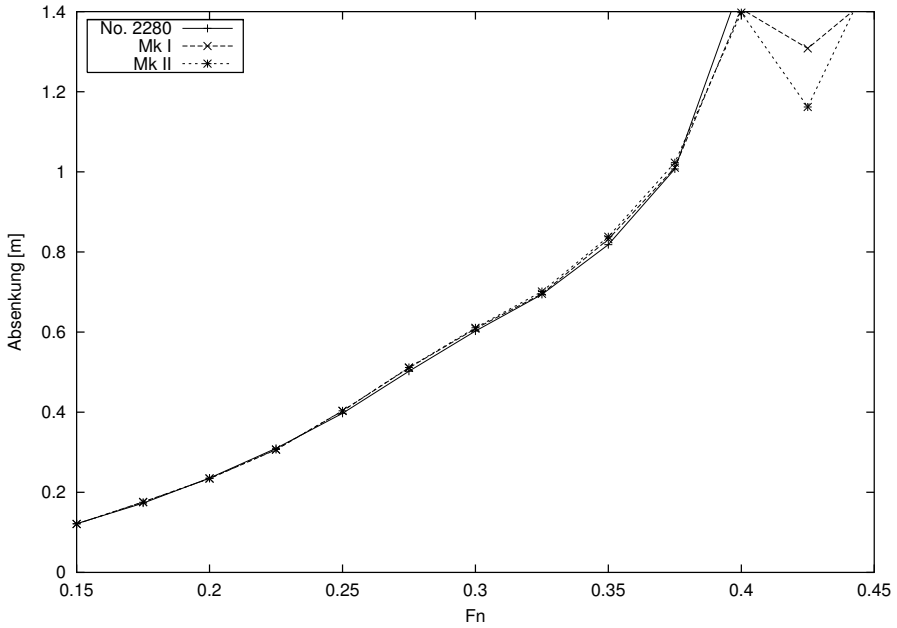

Abb. 7.6: Absenkung für $F_N = 0.225$

Für die Schiffe mit Bugwulst sind, abgesehen von sehr hohen Geschwindigkeiten, keine Unterschiede in der ermittelten Absenkung ersichtlich. Die Abweichungen bei sehr hohen Geschwindigkeiten, insbesondere bei einer Froude-Zahl von $F_N = 0.425$, sind nach Auffassung des Autors nicht aussagekräftig, sondern auf Instabilitäten der numerischen Lösung zurückzuführen. Es ist zu klären, ob bei diesen Froude-Zahlen die Potentialtheorie verläßliche Aussagen ergibt.

Eine ähnliche Situation zeigt sich für den Trimm, Abb. 7.7. Für eine Froude-Zahl von $F_N = 0.225$ sind die Auswirkungen der unterschiedlichen Druckverteilungen im Bug-

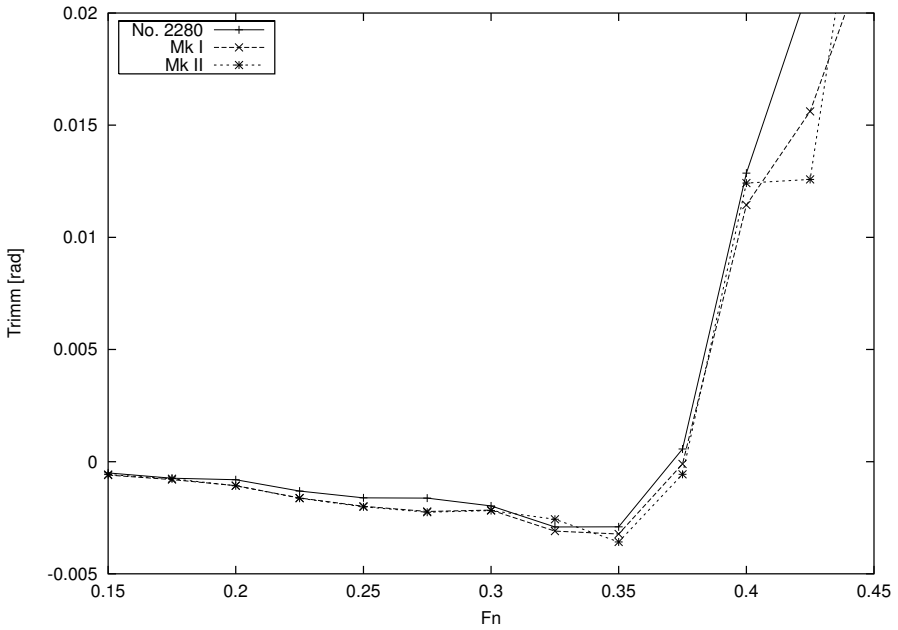

Abb. 7.7: Trimm für $F_N = 0.225$

wulstbereich erkennbar. Die Ausgangsform mit dem nur im unteren Bereich des Bugwulstes vorhandenen Unterdruckgebiet weisst einen geringeren buglastigen Trimm auf als die Versionen Mk I und Mk II.

7.3.4 Wellenbild

In Abb. 7.8 sind die Wellenbilder der Ausgangsversion No. 2280 sowie der vier Varianten abgebildet.

Die Wellenbilder der Varianten mit Bugwulst unterscheiden sich nicht signifikant. Da anzunehmen ist, dass durch eine Modifikation der Bugwulstform eine Veränderung des Wellensystems auf Grund der Überlagerung von Wellen des Vorstevens wie des Bugwulstes verursacht wird[5], ist dieses Ergebnis zu hinterfragen. Möglich ist, dass durch die geringe Detaillierung die ermittelte Wellensituation im Vorschiffsbereich nur eingeschränkt wiedergegeben werden kann. Daher ist aus Abb. 7.8 nicht eindeutig zu entnehmen, ob es zu differierenden Wellenhöhen kommt.

Im Gegensatz dazu zeigen die zwei Rumpfformen ohne Bugwulst ein deutlich anderes Wellensystem. Am Vorsteven wird eine Bugwelle von großer Höhe ausgegeben. Für den Taylorwulst bildet sich, verursacht durch ein zusätzliches Unterdruckgebiet im Vorschiffbereich[6], der Wellenkamm deutlich stärker aus.

Eine Seitenansicht der benetzten Oberfläche in Fahrt wird in Abb. 7.9 gegeben. Wie

[5]Insbesondere ist eine Variation der Wellenhöhen zu erwarten.

[6]Bzw. durch eine deutlich stärkere Ausprägung dieses Gebietes im Vergleich zu den Versionen mit Bugwulst.

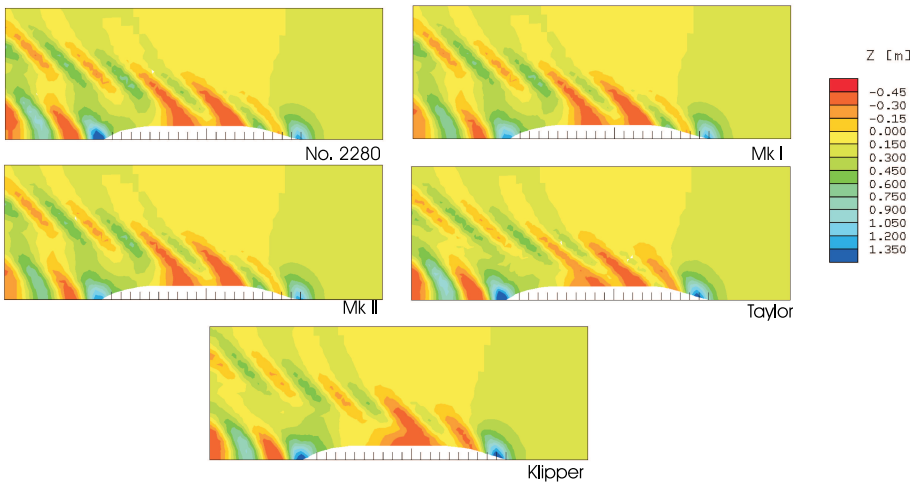

Abb. 7.8: Wellenbild bei einer Froude-Zahl von $F_N = 0.225$.

bereits bei aus den Wellenbildern zu entnehmen, ist für den Taylor- und Klipperbug eine deutlich größere Wellenhöhe des Wellenbergs am Vorsteven zu erkennen. Allerdings sind hier die Einschränkungen auf Grund der nicht idealen Vernetzung im Vorstevenbereich sichtbar.

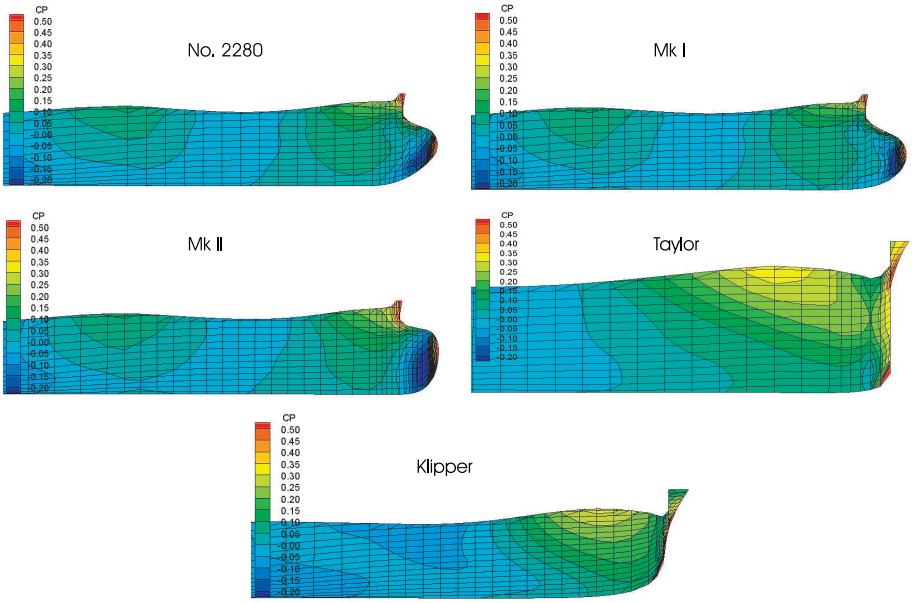

Abb. 7.9: Benetzte Oberfläche in Fahrt bei $F_N = 0.225$

Während für die Ausgangsversion No. 2280 wie auch für Mk I ca. 5 Meter hinter dem vorderen Lot ein Wellenberg[7] ausgegeben wird, verläuft die Schwimmwasserlinie in Fahrt für Mk II „harmonischer“; der Wendepunkt bei $x \approx 210m$ ist nicht vorhanden.

[7]Wenn auch von sehr geringer Höhe.

7.4 Zusammenfassung

Die in Teil 7 vorgestellten Ergebnisse sind nur bedingt aussagefähig.

Für die nach heutigem Wissensstand veralteten Bugformen ohne Wulst werden deutlich ungünstigere Druckverteilungen über die Rumpfoberfläche ermittelt. Das Wellenbild wie auch die benetzte Oberfläche unterstützen die Aussage, dass derartige Formen den modernen Formen mit Bugwulst insbesondere bei mittleren und hohen Geschwindigkeiten unterlegen sind.

Für Bugwulstmodifikationen ergibt sich ein weniger eindeutiges Bild. Im Gegensatz zu den erwarteten, deutlich differierenden Wellenbildern sind hierfür keine Unterschiede zu erkennen. Die Druckverteilungen auf dem Schiffsrumpf weisen Differenzen auf, deren qualitative und quantitative Auswertung allerdings ohne belastbare Rückschlüsse auf den Schiffswiderstand nur eingeschränkt möglich ist[8].

Dennoch zeigt sich, dass das durch die *VWS* entworfene Containerschiff No. 2280 im Vorschiff nicht optimal gestaltet ist. Der Trimm für die zwei Bugwulstmodifikationen Mk I und Mk II ist im Bereich der Dienstgeschwindigkeit auf Grund der günstigeren Druckverhältnisse im Vorschiffsbereich geringer. Insbesondere für die Variante Mk II bildet sich eine günstigere Schwimmwasserlinie in Fahrt aus; ein Wellenberg im Bereich kurz hinter dem Vorsteven wird vermieden.

Die ermittelten Wellenwiderstände erscheinen auf Grund dieser Tatsache zumindest zum Teil plausibel. Dennoch ist näher zu untersuchen, ob die als veraltet angesehene Bugwulstform Mk II in Realität den neueren Bugformen Mk I bzw. der nicht modifizierten Form überlegen ist.

Daher sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um z. B. den unerwünschten Einfluss durch die verwendete Vernetzung zu bestimmen bzw. numerische Unsicherheiten zu überprüfen. Es ist zu überlegen, ob neue Verfahren eine Möglichkeit bieten, aus den bestimmten Druckfeldern den Wellenwiderstand zu ermitteln.

[8] Im Gespräch mit den Entwicklern von *Shallo* wurde darauf hingewiesen, dass die in dieser *Shallo*-Version verwendete Methodik zur Bestimmung von Wellenwiderstand und Beiwert unter bestimmten Bedingungen fehlerhafte Ergebnisse liefern kann.

Teil 8

Fazit und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden Ergebnisse zu den Auswirkungen von globalen wie lokalen Formvariationen auf Wellenwiderstand, Wellenbild und Schwimmlage vorgestellt. Insbesondere wurden die Änderungen des Wellenwiderstandsbeiwerts c_W, der Druckverteilung über die Schiffsoberfläche sowie Wellenbild und Trimm begutachtet.

Die erarbeiten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Eine realitätsnahe Bestimmung von Wellenwiderstand, Wellenbild und Schwimmlage ist mit Hilfe der in *Shallo* verwendeten Potentialtheorie möglich. Die Abweichungen zwischen numerisch und experimentell gewonnenen Daten sind bei sorgfältiger Modellierung kleiner 10%. Bei mittleren Geschwindigkeiten kann ein Fehler kleiner 5% erreicht werden. Daher eignet sich das Programmsystem *Shallo* für die lokale wie globale Formoptimierung in der frühen Entwurfsphase. Hierdurch können Varianten schnell und kostengünstig verglichen werden.

- Insbesondere bei hohen Froude-Zahlen hat die Vernetzung der Rumpfoberfläche entscheidenden Einfluß auf die Ergebnisgüte. Die Netzgenerierung stellt daher hohe Anforderungen an die Qualifikation und Erfahrung des Anwenders. Stehen keine Daten zur Validierung der numerischen Ergebnisse zur Verfügung, so ist die Auswahl eines geeigneten Netzes schwierig.

- Eine Streckung des untersuchten Schiffes führt zu einer Senkung des Wellenwiderstandsbeiwerts; eine Stauchung bewirkt das Gegenteil. Ein paralleles Mittelschiff kann für das Containerschiff No. 2280 nur bedingt empfohlen werden. Während bei einer kurzen parallelen Mittschiffssektion eine Verringerung des Widerstands zu verzeichnen ist, führt ein längeres paralleles Mittelschiff zu einer signifikanten Erhöhung des Wellenwiderstandsbeiwerts. Dies ist auf eine ungünstige Ausbildung des Wellensystems und der Druckverteilung auf der Rumpfoberfläche zurückzuführen.

- Die hydrodynamischen Eigenschaften der Varianten des Containerschiffs No. 2280 ohne Bugwulst zeigen, dass derartige Schiffsformen nach heutigem Stand der Technik veraltet sind. Eine ungünstige Druckverteilung sowie sehr starke Wellenbildung

sind zu verzeichnen. Weiterhin ist die durch die *VWS*entworfene Bugform nicht optimal. Es ist zu sehen, dass eine Vergrößerung des Bugwulstes im Bereich der Dienstgeschwindigkeit zu einer signifikanten Verringerung des Widerstands führt. Es sollte allerdings untersucht werden, ob durch weitere Modifikation der untersuchten Varianten, insbesondere der Bugform Mk II, eine zusätzliche Widerstandsabsenkung erreicht werden kann.

- Es erscheint fraglich, ob viskoser und gravitationsbedingter Widerstand getrennt ermittelt werden können, wie in *Shallo* durchgeführt, oder ob kombinierte Lösungsverfahren, wenn auch zu Lasten höherer Rechenzeiten, bessere Ergebnisse liefern können. Diese Problematik wird z. Zt. in Forschungsvorhaben untersucht; geeignete Lösungsansätze werden entwickelt.

Allerdings können die hohen Anforderungen der Auftraggeber an die Genauigkeit der Ergebnisse für den endgültigen Entwurf z. Zt. noch nicht ausschließlich auf numerischem Wege erfüllt werden. Daher ist es erforderlich, für den endgültigen Entwurf die numerisch bestimmten Ergebnisse durch experimentelle Modellversuche zu verifizieren. Es ist möglich, durch numerische Verfahren die Anzahl der Modellversuche stark zu verringern wie auch die endgültige Schiffsform in einem kürzeren Zeitraum zu entwickeln.

Daher spiegelt der anfangs aufgeführte Vers von Marshall Tulin nur bedingt die heutige Situation wider. Zwar können durch die moderne Rechentechnik Probleme gelöst werden, die vorher nur experimentell zu lösen waren; der „numerische Schlepptank“ ist allerdings noch nicht verfügbar.

Neben einer Verbesserung der den Berechnungen zugrunde liegenden mathematischen Modelle erscheint dem Autor die Vernetzung als ein Aspekt, der weiterer Bearbeitung bedarf. Wie erwähnt ist in der verwendeten Version von *Shallo* der Geometrieimport wie auch die anschließende Vernetzung nicht optimal gelöst. Zu wünschen wären hier Verfahrensweisen, die es dem Anwender unproblematisch ermöglichen, mit minimalem Arbeitsaufwand zufriedenstellende Netze zu erstellen. Dies ist allerdings nur durch zumindest bedingt intelligente Mesh-Tools zu erreichen. Inwiefern derartige Lösungen in der Lage sind, ohne Eingreifen des Anwenders das gewünschte Ziel für die gängigen Schiffsformen zu erreichen, ist im Rahmen der Entwicklung derartiger Applikationen zu prüfen.

Als Vision für die Zukunft ist ein System denkbar, das ausgehend von einem gegebenen Entwurf sowie diverser relevanter Rahmenbedingungen eine Vielzahl von Modifikationen automatisch erstellt und untersucht. Ein Optimierungszyklus wird durchlaufen. Vielversprechende Formen werden dem Anwender zur Begutachtung vorgestellt, so dass dieser den jeweiligen Entwurf auf Qualität wie auch Praxistauglichkeit überprüfen kann.

Die Auswertung und Beurteilung einer komplexen Problematik wie sie beim Schiffsentwurf zu finden ist, ist allerdings nach Meinung des Autors nicht ausschließlich durch mathematische Verfahren zu erreichen. Zu vielfältig sind die Aspekte, die bei der Entwicklung eines Schiffes zu berücksichtigen sind. Die Komplexität der Beziehungen zwischen den einzelnen Problempunkten ist nicht durch Gleichungen exakt wiederzugeben, sondern kann nur durch den erfahrenen Anwender abgeschätzt werden. Daher kann auch das hier beschriebenes Optimierungsverfahren kein Ersatz für fachkundige Ingenieure darstellen.

Literaturverzeichnis

[1] Kap. Resistance In: VAN MANEN, J. D. ; VAN OOSSANEN, P.: *Principles Of Naval Architecture*. Bd. II. 1st edition. SNAME, 1988

[2] JENSEN, G.: Ein Programmsystem zur 2-dimensionalen Berechnung der Potentialströmung um Körper in unbeschränkter Flüssigkeit / Institut für Schiffbau der Universität Hamburg. 1984 (Nr. 442). – Forschungsbericht

[3] BERTRAM, Volker: Numerische Schiffshydrodynamik in der Praxis / Institut für Schiffbau der Universität Hamburg. 1994 (Nr. 545). – Forschungsbericht

[4] BERTRAM, Volker ; HUGHES, Michael: A Higher-Order Panel Method for 3-D Free Surface Flows / Institut für Schiffbau der Universität Hamburg. 1995 (Nr. 558). – Forschungsbericht

[5] SÖDING, Heinrich: *Numerische Berechnung inkompressibler Potentialströmungen*. 1995. – Zur Vorlesung Numerische Methoden der Strömungsmechanik

[6] UHLENBROCK JANSE, Santiago: *Untersuchungen zum dynamischen Verhalten von Steg- und Auslegersystemen*, Universität Rostock, Diplomarbeit, 2002

[7] SÖDING [u. a.]: Absenkung und Vertrimmung von Schiffen durch Fahrt in flachem Wasser. In: *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft* (1989)

[8] KREYSZIG, E: *Advanced Engineering Mathematics*. 8th edition. Wiley & Sons, 1999

[9] JENSEN, G.: Berechnung der stationären Potentialströmung um ein Schiff unter Berücksichtigung der nichtlinearen Randbedingung an der Wasseroberfläche / Institut für Schiffbau der Universität Hamburg. 1988 (Nr. 484). – Forschungsbericht

[10] ZOU, Zaojian: Berechnung der Potentialströmung um einen schräg fahrenden Schiffsrumpf auf tiefem und flachem Wasser / Institut für Schiffbau der Universität Hamburg. 1994 (Nr. 541). – Forschungsbericht

[11] BERTRAM, Volker: *Practical ship hydrodynamics*. 1. Auflage. Butterworth-Heinemann, 2000

[12] DUDZUS ; DANKWARDT: *Schiffstechnik - Einführung und Grundbegriffe*. 1. Auflage. VEB Verlag Technik, 1982

[13] Geistert, K.: Systematische Modellversuche zur Auswahl optimaler Schiffsformen für schnelle Containerschiffe / Forschungszentrum des Deutschen Schiffbaus. 1979 (Nr. 93). – Forschungsbericht

[14] Schmitz, Gerhard: *Hydrodynamik*. Bd. 1 und 2. Wilhelm-Pieck-Universität Rostock

[15] Kleinau, D.: *Grundlagen strömungsmechanischer Entwurfsverfahren*. 2001. – Manuskript zur Vorlesung

[16] Kleinau, D.: *Theorie des Schiffes*. 2002. – Manuskript zur Vorlesung

[17] White, Frank M.: *Fluid Mechanics*. Mc Graw-Hill, 1999

[18] Kopka, Helmut: *Latex Einführung*. Bd. 1. 2. Auflage. Addison-Wesley, 1996

[19] Flanagan, David: *JAVA in a nutshell*. 3. Auflage. O' Reilly, 1999

[20] Hawlitzek, Florian: *Java 2*. 1. Auflage. Addison-Wesley, 2000

[21] *Introduction to NAPA*. Napa Oy (Ltd), 1996

[22] Schaaf, Dennis: *Perl*. 1. Auflage. bhv, 2000

Anhang A

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

A.1 Abkürzungen

HSVA	Hamburgische Schiffbau Versuchsanstallt, GmbH
VWS	Versuchsanstalt für Wasserbau und Schifffahrt

A.2 Formelzeichen

Zeichen	**Beschreibung**	**Einheit**
c_B	Blockkoeffizient	$-$
B	Breite	m
D	Seitenhöhe	m
L	Schiffslänge	m
L_{c_B}	Abstand zwischen hinterem Lot und Auftriebsschwerpunkt	m
L_P	Länge des parallelen Mittelschiffs	m
L_{PP}	Länge zwischen den Loten	m
L_W	Wellenlänge	m
∇	Verdrängung	m^3
S	Benetzte Oberfläche des Schiffskörpers	m^2
T	Tiefgang	m
x, y, z	Koordinatenachsen	m
ζ	Koordinate der Wellenerhebung in z-Richtung	$-$
$\vec{n}$	Einheitsnormalenvektor auf eine Oberfläche	$-$
Ω	Betrachtetes Flüssigkeitsgebiet	$-$
Ω_S	Oberfläche des Schiffsrumpfs	$-$
F_N	Froude-Zahl	$-$

u, v, w	Geschwindigkeitskomponenten in die drei Koordinatenhauptrichtungen x, y, z	m/s
$\vec{u}$	Geschwindigkeitsvektor bestehend aus u, v, w	m/s
μ	Viskosität des Fluids	$kg/(m \cdot s)$
ρ	Dichte des Fluids	kg/m^3
p	Druck	N/m^2
ϕ, φ	Potential	
Γ	Zirkulation eines Wirbels	
Q	Ergiebigkeit einer Quelle oder Senke	
c_F	Wellenwiderstandsbeiwert	$-$
c_T	Gesamtwiderstandsbeiwert	$-$
c_W	Reibungswiderstandsbeiwert	$-$
F_i, M_i	Am Schiff angreifende Kräfte bzw. Momente	N, Nm
f_x, f_y, f_z	Auf den Körper einwirkende Volumenkraft	N
R_V	Reibungswiderstand	N
R_T	Gesamtwiderstand	N
R_W	Wellenwiderstand	N

Anhang B

Definitionsdatei des Containerschiffs No. 2280 für *Napa*

```
@@ redraw, delete old curves
!e
@@ define mode
def


@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
@@ Hinterschiff 2280
@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
cur FRA @@ Hauptspant
x 75.25
yz * (16.1 16) /90 90/ (16.1 10) /90 (14 4.06) (9 1.4) 7/ (0.33 0) /- ,
     (0 0)

cur STERN
y 0
xz * (-4.06 16) -/ (-3.85 8.95) /- 0/ (8.19 8.95),
     (8.81 7.64) (6.20 3.92) 0/ (21.5 0) 0/ FRA

cur FBA @@ Bodeneinlauf aft
z 0
xy * STERN/x=25 /90 0/ (26 0.33) /0 0/ FRA/y=0.33

cur DECKA
Z 16
xy * FRA /0 0/ (43 16.1) /0 -/ (-4.06 7) /- 90/ STERN

cur TRANSOM
xz (-4.06 16) (-3.85 8.95)
yz STERN/z=8.95 /0 43/ DECKA/y=7
SC -//-

cur FSA @@ Seiteneinlauf aft
y 16.1
xz DECKA/x=43 -15/ FRA/z=10
SC P

cur TA1 @@ Knuckle
@@xyz FRA/z=3.5  (43 10.15 7.3) (10.75 3.20 9.29) TRANSOM/z=8.95
xyz FRA/z=3.5  (43 10.15 7.3) (10.75 3.20 9.29) TRANSOM/z=8.95

cur fr06
x 64.5
yz * TA1 /34 13/ FBA
```

```
cur fr04
x 43
yz * FSA TA1 (2.0 2.20) FBA

cur fr03
x 32.25
yz * TA1 (2.06 4.27) FBA

cur fr02
x 21.5
yz * DECKA /60 -/ TA1 /13 (2.1 7.1) (1.58 4.7) /90 90/ (1.93 2.2) /90,
     0/ STERN

cur fr01
x 10.75
yz * TA1 /0  90/ (0.34 7.67) 110/ (2.0 3.85) /78  0/ STERN

cur fr00.75U
x 8.06
yz * STERN/z>8.8 /0 TA1

cur fr00.75L
x 8.06
yz * STERN/z=#6.54  110/ (1.24 4) /90 0/ STERN/z=#2.5

cur fr00.50
x 5.375
yz * STERN /0 TA1 /35

cur wl14
z 14
xy * STERN /90 -/ TRANSOM

cur wl11
z 11
xy * STERN /90 -/ TRANSOM

cur wl08
z 8
xy * STERN /90 fr01 fr02 fr03

cur wl07ca
z fr00.75L/STERN/z>6
xy * STERN /90 fr01 fr02

cur wl04
z 4
xy * STERN /90 fr00.75L fr01 fr02 fr03 fr04 fr06

cur wl03ca
z fr00.75L/STERN/z<3
xy * STERN /90 fr01 fr02


@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
@@ Vorschiff2280
@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
cur stem
y 0
xz *   (75.25 0) -/ /- (209.625 0) (212.31 0.27) (215 1) (218.44 3.1648),
       (220.375 6.33) (218.44 8.804) 90/ (215 11) /90 (216.1 16)

cur decksl
z 16
xy *  (75.25 16.1) /0  0/ (148 16.1) (150.5 15.75) (161.25 14.7),
      (182.7 10) (193.5 6.8) (209.625 2.15) (215 0.7) stem/x=#216.1

cur seite
```

```
y 16.1
xz * (75.25 10) /-15 (107.5 4) (129 8) (139.75 12.5) decksl/x=#148

cur boden
z 0
xy *  FRF/y=0.33 (86 1) (107 7) (139.75 1.5) (161.25 0.7) (172 0.5),
      (182.7 0.45) (193.5 0.4) (204.25 0.1) stem/x=209.625

cur FRF
x 75.25
yz * (0 0) -/ /0 (0.33 0) /7 (9 1.4) (14. 4.06) 90/ (16.1 10),
      -/ /- (16.1 16)

cur Spt10
x 107.5
yz * boden -/ /0 (12 0.5) (14 1.2) 90/ seite

cur Spt12
x 123
yz * boden -/ /0 (12 1.3) (15 3.75) seite

cur Spt14
x 150.5
yz * boden -/ /0 (6 1) (10 2.9) (14 7.85) decksl

cur Spt16
x 172
yz * boden (3 1.25) (8 6.1) (12 13.85) decksl

cur Spt18
x 193.5
yz * boden /0    (2 2.2) (3 3.75) (4 5.9) (5 11.3) decksl

cur Spt19
x 204.25
yz * boden /0  (2 3.1)   (3.3 7) (2.2 11.5) decksl

cur Spt20unten
x 215
yz * stem/z<6 /0  (1.6 3) (2.1 4) (2.6 6.5) (2 8.8) (1 9.6) 90/,
     stem/z=11 decksl

cur Spt20.5
x 219.13
yz * stem/z<6 /0  (2.1 6.5) 0/ stem/z>6

cur Wl3
z 3
xy *  FRF Spt10 Spt12 Spt14 Spt16

cur Wl2
z 2
xy * FRF Spt10 Spt12 Spt14 Spt16 Spt18 Spt19 Spt20unten

cur Wl1
z 1
xy * FRF Spt10 Spt12 Spt14 Spt16

cur Wl6
z 6
xy * Spt14 Spt16 Spt18 Spt19 Spt20unten Spt20.5 stem

cur Wl9
z 9
xy * Spt14 Spt16 Spt18 Spt19 Spt20unten stem

cur Wl11.5
z 11
```

```
xy *  Spt14 Spt16 Spt18 Spt19 Spt20unten stem

cur Wl14F
z 14
xy *  Spt14 Spt16 Spt18 Spt19

cur sente1
yz stem/Wl6 Spt20unten/z=3
xz Spt20unten/z=3 Spt20.5 stem/Wl6

cur sente2
yz stem/Wl6 Spt20unten/Wl9
xz Spt20unten/Wl9 Spt20.5 stem/Wl6

@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
@@ Lines & Plotting
@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
pro f    @@Projektion hinten
id off  @@ id curves with name in plot
axes    @@ draw axes in plot
col 4

plo stem decksl seite boden sente1 sente2,
    Wl1 Wl2 Wl3 Wl6 Wl9 Wl11.5 Wl14F FRF Spt10 Spt12 Spt14 Spt16,
    Spt18 Spt19 Spt20unten  Spt20.5

col 3
plo FRA STERN FBA DECKA TRANSOM FSA TA1 fr06 fr04 fr03 fr02 fr01,
    fr00.75U fr00.75L fr00.50 wl14 wl11 wl08 wl07ca wl04 wl03ca


@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
@@ Surfaces & Plotting
@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
sur hullf
thr sente1 sente2   Wl1 Wl2  Wl3 Wl6 Wl9 Wl11.5 Wl14F,
    stem seite decksl boden FRF Spt10 Spt12 Spt14 Spt16 Spt18,
    Spt19 Spt20unten Spt20.5

pre hullf

sur hulla
thr FRA STERN FBA DECKA TRANSOM FSA TA1 fr06 fr04 fr03 fr02 fr01,
    fr00.75U fr00.75L fr00.50 wl14 wl11 wl08 wl07ca wl04 wl03ca

pre hulla

sur hull
com hullf hulla

col 1
plo hull

col *     @@ Farbe gemaess Kruemmungsverlauf
sec hull  @@Abstand von Zwischenspanten d=<>
x d=1
@@z d=0.5
@@y d=0.3
```

Anhang C

Programme

Im Rahmen dieser Arbeit wurden diverse Programme entworfen und entwickelt mit dem Ziel, Probleme in den vorhandenen Softwaresystemen zu umgehen bzw. Pre- und Postprocessing zu vereinfachen und zu automatisieren. Dieses Kapitel gibt eine kurze Beschreibung der Programme; der Quellcode sowie ausführbare Dateien sind auf der beiligenden CD-ROM verfügbar.

Da Berechnungen wie auch die anschließende Auswertung und Dokumentation der gewonnen Ergebnisse sowohl unter Windows wie auch Linux durchgeführt wurden, wurde die plattformübergreifende Programmiersprache JAVA eingesetzt. Die bei dieser zur Laufzeit interpretierte, im Vergleich zu Maschinencode geringere Ausführungsgeschwindigkeit ist bei den entwickelten, wenig rechenintensiven Applikationen zu vertreten. Als IDE kam Borland JBuilder 6 Personal zum Einsatz.

C.1 WigMesh

Da ein Export der mit Hilfe von NAPA erstellten Rumpfgeometrie für das Wigley-Schiff nicht möglich ist, wurde die Applikation *WigMesh* entwickelt. Ausgehend von

- der Länge L
- den Verhältnissen Länge L zu Breite B, Länge L zu Tiefgang T, Länge L zu Seitenhöhe D
- sowie der Anzahl von Panels in horizontaler und vertikaler Richtung

wird durch dieses Programm eine Datei erstellt, die direkt in Shallo als Netz eingelesen und weiterverwendet werden kann. Ein Screenshot ist in Abb. C.1 zu sehen. Die Option „Write Series“ ermöglicht es, für das auf der linken Spalte des Fensters definierte Wigley-Schiff die Vorarbeiten für mehrere Berechnungen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit durchzuführen. Eine entsprechende Verzeichnisstruktur, Batch-Dateien zum Pre- und Postprocessing, zur Berechnung sowie die von Shallo benötigte Datei <steuer.ctl> werden erstellt.

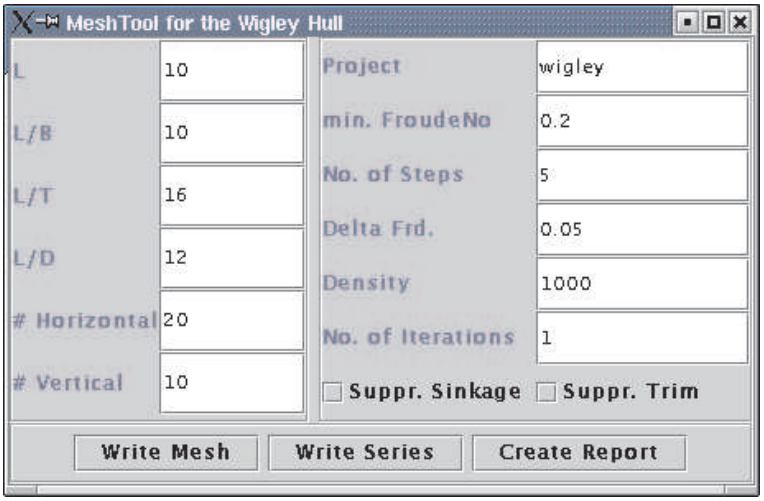

Abb. C.1: Screenshot des Programms *WigMesh*

Weiterhin wird eine Datei <Projektname.log> erstellt, in der für die spätere Auswertung wichtige Informationen geschrieben werden.

Hierbei bedeutet:

- Poject: Der Projektname, unter welchem das entsprechende Panelfile abgespeichert wird
- min. FroudeNo: Die geringste Froude-Zahl, für die die Berechnung durchgeführt werden soll
- No. of Steps: Die Anzahl der Froude-Zahlen, die berechnet werden sollen
- Delta Frd.: Die Differenz zwischen zwei benachbarten Froude-Zahlen
- Density: Die Dichte des Fluids
- No. of Iterations: Die Anzahl der Iterationen, die Shallo bei der Lösung durchführen soll
- Suppr. Sinkage / Trim: Hierdurch können Tauchung und / oder Vertrimmung bei der Lösung behindert werden

Nach Erstellen der entsprechenden Verzeichnisstruktur sind unter Windows die Batch-Dateien wie folgt abzuarbeiten:

1. PreProc.bat: Erstellt die für die anschliessende Berechnung notwendigen Dateien, erzeugt das Netz an der Wasseroberfläche etc.
2. Calc.bat: Durchführung der Berechnungen

3. PostProc.bat: Erzeugt die aus den Berechnungen sich ergebenden Plots für Wellenbild, Druckverteilung, Geschwindigkeitsfeld etc.

„Create Report“ fasst die Daten zusammen, die durch die Berechnungen gewonnen wurden, und schreibt diese übersichtlich geordnet in eine zu wählende Datei. Die für die jeweilige Geschwindigkeit bei den einzelnen Iterationsschritten gewonnenen Ergebnisse werden hierbei von links nach rechts aufsteigend aufgelistet.

C.2 GenMesh

Basierend auf der Applikation *WigyMesh* dient *GenMesh* dazu, für eine vorhandene Datei, welche das Netz der Rumpfgeometrie für Shallo enthält, eine im vorhergehenden Kapitel beschriebene Verzeichnisstruktur sowie die entsprechenden Batch-Dateien zu erzeugen. Eine Report-Datei kann ebenfalls erstellt werden, um eine übersichtliche Zusammenfassung der Ergebnisse zu erzielen.

Abb. C.2 zeigt den Screenshot dieser Anwendung. Neben den für das Erstellen der Verzeichnisstruktur notwendigen Parametern auf der rechten Seite ist die Angabe der Länge zwischen den Loten L sowie des Tiefgangs vorne T_{vorne} und hinten T_{hinten} erforderlich.

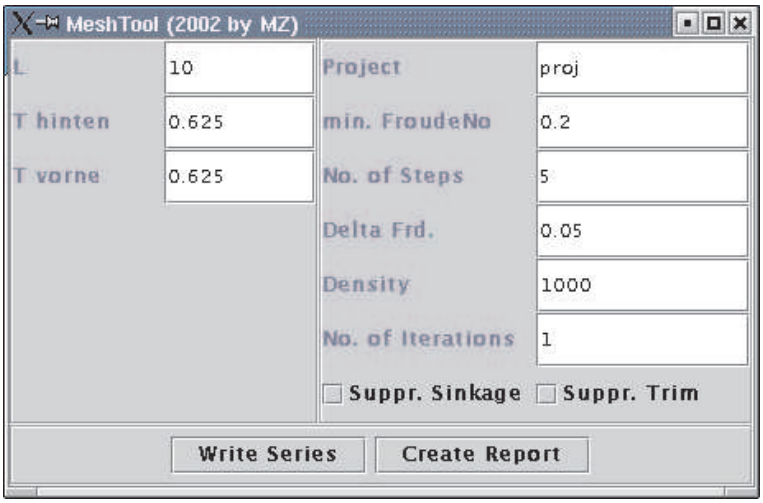

Abb. C.2: Screenshot des Programms *GenMesh*

C.3 Transform

Dieses Programm stellt grundlegende Funktionen für affine Abbildungen eines Schiffsrumpfes zur Verfügung.

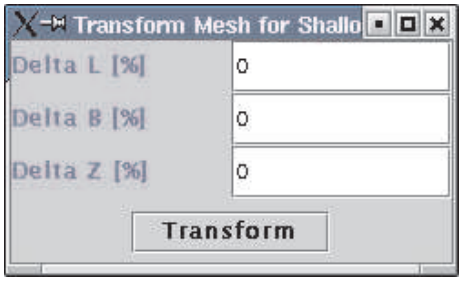

Abb. C.3: Screenshot des Programms *Transform*

Basierend auf einem Netz-File aus Shallo können prozentual die Änderung in den drei Koordinatenrichtungen angegeben werden, siehe Abb. C.3. Hierbei wird die vorliegende Netzstruktur nicht geändert. Es erfolgt ausschließlich eine Verschiebung der Aufpunkte, welche für die Definition der Panels Verwendung finden.

Die Aktion „Transform“ ermöglicht es, die zu ändernde Datei auszuwählen wie auch die Ausgabedatei anzugeben.

C.4 TransformParallel

TransformParallel wurde entwickelt mit dem Ziel, ausgehend von einer gegebenen, für Shallo aufbereiteten Geometriedatei die Länge des parallelen Mittelschiffes zu verändern bzw., so ein paralleles Mittelschiff nicht vorhanden ist, dieses einzufügen.

Hierzu werden alle Eckpunkte von Panels, deren Position in Längsrichtung vor einer anzugebenden Ebene ist, um eine bestimmte Distanz nach vorne verschoben. Abb. C.4 zeigt einen Screenshot des Programms.

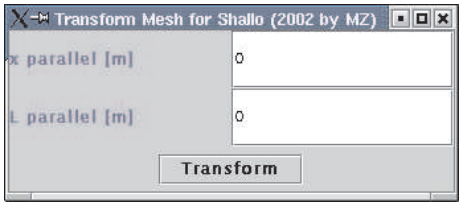

Abb. C.4: Screenshot des Programms *TransformParallel*

Ähnlich wie bei dem Programm *Transform* wird auch hier die Netzstruktur nicht geändert. Lediglich die Panels im Bereich des erzeugten parallelen Mittelschiffes werden in Schiffslängsrichtung gestreckt. Dies bedeutet allerdings, dass eine derartige Streckung des Schiffes nur in Grenzen möglich ist, da ansonsten ein schlecht konditioniertes Netz[1] erzeugt wird.

[1] Das Längen-Breiten-Verhältnis der gestreckten Panels wird ungünstig.

Anhang D

How-To - Transformation of ship hulls using the *Napa* transformation module

D.1 General

In the design process transformations are useful modifications to vary and optimize an existing hull surface fast and efficiently. As part of *Napa*, a powerful software tool for the initial design of ships, a separate module exists to perform the necessary tasks.

Unfortunately this module is rather complex as well as the documentation poor. Bugs exist which make it necessary to find alternative solutions. Therefore it took the author a long time to find out how to perform transformations.

With the focus on a step-by-step description for transformations in mind this manual, written in an informal English, is aimed to give the reader a basic idea how the transformation module of *Napa* can be used and how some of the traps can be avoided.

D.2 Step-by-Step

Starting with a project named <prj> it is assumed that version <A> contains the hull surface <hull> which should be transformed. The result of the transformation should be stored as surface <hull> in version <B>.

First we create a new version <B> using the version control system integrated in *Napa*. This new version should be based on the already existing version <A>. The reference system should be copied as well.

Using version <B> in the main *Napa* task the transformation module of *Napa* is called by entering

```
task?> tra
```

The command

```
tra?> args
```

gives an overview over some of the options available.

```
PARENT proj/B
RESULT B
TRANSFORM HULL
DESTROY OFF
DIMENSION
ACCURACY
FORCE OFF
DATA OFF
PREPARE ON
REF ON
FRAMES OFF
```

It can be seen that, based on the parent version <parent> the result of the transformation will be stored in version <result>. The object to transform is given by <transform>. In this example, the original surface is also named hull, so that we do not need to change this.

A complete list of all commands available can be seen with the command <!com>. It is advisable to use the <args> command at the beginning of every transformation. If not, due to compatibility issues with older versions of *Napa*, the transformation might start without us really wanting it to happen at this moment.

Now, the parent project and version - i.e. the version the transformation is based on - is defined by

```
tra?> parent proj/A
```

Because version <B> already exists, it is necessary to allow overwriting of existing versions with

```
tra?> destroy on
```

Furthermore we want additional checks to be done with the input data:

```
tra?> force on
```

The frame system should be transformed as well:

```
tra?> frame on
```

Finally the transformation is defined with the command

```
tra?> dim <options>
```

The options available can be found in the *Napa* manual as well as the online documentation and are quite easy to understand and use. E. g. an affine transformation with a change of Length of 10 meters is defined by

```
tra?> dim l=+10 cb=+0
```

All necessary options being set the transformation is started with

```
tra?> ok
```

After the transformation is finished successfully it is necessary to tell *Napa* that the newly created hull should be used for calculations of displacement etc. This is done with

```
tra?> hull hull/B/proj
```

The commands <info ref> and <info hull> give further information about the reference system used as well as about basic dimensions of the transformed hull surface. These commands can be used as a first quick check whether the transformation worked as expected.

D.3 Remarks

Exporting the original or transformed hull surface to the CFD code *Shallo*, as done in this paper, might not work properly.

The author's experience is that, even if the transformation worked flawlessly and the modified hull surface doesn't produce any errors in *Napa*, the export macros provided by *HSVA*[1] might produce errors. A solution to avoid these errors is not known.

In this case it might be possible to export the surface to an IGES-file and use this file to create the CFD mesh from.

[1]Hamburgische Schiffbau Versuchsanstalt GmbH, Hamburg, Germany