

Schiffsformoptimierung unter Verwendung numerischer und experimenteller Techniken in der Praxis

Vortrag zur STG Hauptversammlung 1999 anlässlich ihres 100-jährigen Bestehens

Gerhard Jensen und Friedrich Mewis, Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH

1. Einführung

Was ist eine optimale Schiffsform? Eine optimale Schiffsform ist die Schiffsform mit der eine Transportaufgabe oder bei militärischer Nutzung ein sonstiger Einsatz bestmöglich, d.h. unter Beachtung von Bau- und Betriebskosten am wirtschaftlichsten gelöst werden kann. Das bedeutet, daß nicht unbedingt die Schiffsform mit dem kleinsten Leistungsbedarf die beste ist. Vielmehr ist die Zielfunktion viel schwerer zu bestimmen. Aus Sicht der Werft ist häufig die Schiffsform die beste, mit der sich alle Vertragsbedingungen bei geringsten Baukosten erfüllen lassen. Doch auch mit dieser Zielfunktion unter Beachtung der Nebenbedingungen kann kaum ein formaler Optimierungsprozeß gestartet werden, weil der Zusammenhang zwischen Baukosten und Schiffsform zu schwach ist. Daher findet in der Praxis, meist unbewußt, ein mehrstufiger Optimierungsprozeß statt. Die Festlegung der Hauptabmessungen, Geschwindigkeit und Antriebsleistung erfolgt häufig in einem Verhandlungsprozeß zwischen Reeder und mehreren Werften, bei denen diese auf ihren Erfahrungen aufbauend und oft lediglich mit empirischen Verfahren, ihren Vorentwurf und ihre Vorkalkulation entwickeln. Der Reeder mit seinen Vergleichen verschiedener Angebote zwingt sie dabei typischerweise immer weiter an die dem globalen Stand der Technik entsprechenden Grenzen des machbaren heran.

Die eigentliche Schiffsformentwicklung im Entwurf erfolgt häufig erst nach Vertragsunterzeichnung und zielt dabei typischerweise nur darauf ab Vertragserfüllung zu erreichen. Aufgrund des vorangegangenen Prozesses zur Findung der Vertragsspezifikationen wird so allerdings in

gewissem Sinne ein technisch/wirtschaftliches Optimum erreicht.

Numerische Verfahren zur Strömungsberechnung sind heute und sicher auch auf absehbare Zeit zu aufwendig und zu ungenau, die Wechselbeziehungen zwischen Schiffsform und anderen Entwurfs- und Konstruktionseinflüssen sind zu komplex, um in einem vollständig automatischen Verfahren die Schiffsform zu finden.

Daher werden numerische, wie experimentelle Verfahren typischerweise nur für noch genauer spezifizierbare Teilaufgaben wie Größe und Form des Bugwulst, Gestaltung der Schultern, Ausrichtung der Anhänge, etc. eingesetzt.

Die Entwicklung und Nutzung numerischer Rechenverfahren zur Formbewertung von Schiffen hat keineswegs – wie noch vor 10 Jahren prophezeit – zu einer generellen Verringerung von hydrodynamischen Versuchen in den Tanks der Schiffbauversuchsanstalten geführt, wohl aber zu einer Verlagerung der Versuchstätigkeit bzgl. einfacher Serienversuchen hin zu komplizierten Sonderversuchen. Während z.B. noch vor ein bis zwei Jahrzehnten häufig eine große Zahl von Widerstandsversuchen mit systematisch variierten Schiffsformen, z.B. Bugwulstformen, durchgeführt wurden, um ein Schiff bezüglich seines Widerstandes zu optimieren, wird diese Aufgabe heute schneller, preiswerter und letztendlich auch besser mit Hilfe der unten beschriebenen Potentialströmungsmethoden gelöst. Eine vollständig richtige Berechnung des Widerstandes ist heute prinzipiell möglich, der Aufwand und die Unsicherheit erfordern aber am Ende einer Optimierung immer noch den Modellversuch. Noch weitaus schwieriger ist diese Situation in Bezug auf die komplizierten Wechselwirkungen bei der Propulsion oder den stark nichtlinearen Zusammenhängen bei der Schiffsbewegung in steilen Seegängen.

Die Autoren sind daher der Meinung, daß die direkten numerischen Simulationen der Strömung zwar eine weiter zunehmende Bedeutung für den praktischen Entwurf haben werden, sie werden aber die experimentellen Methoden in einem vorhersehbaren Zeitraum nicht verdrängen werden. Dieser Vortrag befaßt sich daher sowohl mit beiden in der Schiffsformentwicklung eingesetzten Bereichen.

2. Numerische Methoden

Seit mehr als 10 Jahren wird an Universitäten und Versuchsanstalten an der numerischen Strömungssimulation als Ergänzung zu experimentellen Methoden geforscht. Üblicherweise wird hierfür das englische Kürzel CFD für Computational Fluid Dynamics benutzt. In diesem Vortrag wollen wir hier allerdings nicht nur die direkte numerische Berechnung aus den Grundgleichungen der Strömungsmechanik verstehen, sondern auch die Verfahren, die teilweise empirische Koeffizienten benutzen

Dank maßgeblicher Förderung durch das Bundesforschungsministerium wurde in Deutschland, insbesondere bezüglich der praktischen Anwendungen bei der Entwicklung von Schiffen und Propellern eine internationale Spitzenstellung erreicht.

Die allgemeingültige Grundlage für die Berechnung der Strömung sind die Navier-Stokes-Gleichungen. Die direkte numerische Lösung dieses Systems gekoppelter, nichtlinearer Differentialgleichungen ist heute und auf absehbare Zeit für praktisch interessierende Reynoldszahlen nicht möglich.

Man verwendet daher stets Vereinfachungen:

Wenn man Druck und Geschwindigkeit in einen zeitlichen Mittelwert und einen durch die Turbulenz in der Strömung verursachten Schwankungsanteil aufteilt ergeben sich aus den Navier-Stokes-Gleichungen die Reynoldsgleichungen. Durch zeitliche Mittelung erhält man die sog. Reynolds-Averaged-Navier-Stokes Equation (RANSE). Die Reynoldsgleichungen erfordern zusätzlich die Einführung eines Turbulenzmodells, daß den Zusammenhang zwischen

Reynoldsspannungen und mittleren Geschwindigkeiten herstellt. Diese Differentialgleichungen sind zumindest bei entsprechend einfachem Turbulenzmodell auch für die typischen Reynoldszahlen von Schiffen lösbar.

Vernachlässigt man die Reibung, so erhält man aus den Navier-Stokes-Gleichungen die Euler-Gleichungen, die aber für die numerische Behandlung fast noch ebenso kompliziert sind wie die RANS-Gleichungen.

Wenn man zur weiteren Vereinfachung noch annimmt, daß die Strömung rotationsfrei ist, (was praktisch außerhalb der Grenzschicht und von Ablösegebieten mit guter Näherung gilt) ergeben sich wesentlich einfachere lineare Differentialgleichungen. Durch Einführung eines skalaren Geschwindigkeitspotentials und aufgrund der Entkopplung von Kontinuitäts- und Impulserhaltungsgleichung läßt sich in diesem Fall das Problem auf die Bestimmung einer einzigen skalaren Feldgröße (des Potentials) reduzieren. Es ergibt sich die Laplace-Gleichung, eine homogene, lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung.

Für die schiffbaulichen Berechnungen haben sich zwei Lösungsmethoden etabliert: Randelementeverfahren zur Berechnung der Potentialströmung (keine Reibung)

Finite-Volumen-Verfahren zur näherungsweise Berechnung von zähen Strömungen (RANSE-Löser) und zur Lösung der Euler-Gleichungen

Die Randelementeverfahren berücksichtigen zwar nur einen Teil der physikalischen Effekte, sind aber numerisch um mehrere Größenordnungen effektiver und werden weit verbreitet in der Praxis eingesetzt.

Aber auch die Finite-Volumen-Verfahren, die in der Handhabung und vom zeitlichen Aufwand schwieriger sind werden aber schon für viele praktische Aufgaben heute eingesetzt.

2.1 Wellenwiderstand

Der Wellenwiderstand kann durch die Gestaltung der Schiffsform erheblich beeinflußt werden.

Die verbreitetsten numerischen Verfahren sind Randelemente Verfahren. Dabei wird die Reibung vernachlässigt und angenommen, daß die freie Wasseroberfläche glatt zusammenhängend bleibt (keine brechenden Wellen). Im numerischen Verfahren werden dann iterativ die Randbedingungen am Schiffskörper (kein Durchfluß) und an der Wasseroberfläche (kein Durchfluß, Druck=Luftdruck) erfüllt werden. Selbstverständlich sind die Schwimmlage und die Wellen teil der Lösung und werden im Iterationsverfahren bestimmt.

Es sind verschiedene Programme, mit gewissen Stärken und Schwächen im Einsatz, z.B. SHALLO/1/, RAPID/2/, SHIPFLOW/3/ und KELVIN/4/. SHALLO ist in Deutschland besonders weit verbreitet, während SHIPFLOW eine größere internationale Verbreitung hat. Diese Programme liefern Ergebnisse in wenigen Minuten Ergebnisse auf einem leistungsfähigen PC oder einer Workstation und sind daher gut für Optimierungen geeignet, so daß der Hauptaufwand in der Beschreibung der Schiffsform und der Netzgenerierung liegt. Da die eigentlich interessierende Größe, der Wellenwiderstand, relativ unzuverlässig berechnet wird, werden in der praktischen Anwendungen typischerweise die berechneten Wellenfelder (Abb. 1) und die Wellenerhebungen am Rumpf und in einigen Längsschnitte neben dem Schiff betrachtet.

Die Druckverteilung auf dem Körper (Abb. 2) gibt wertvolle allgemeine Hinweise über die Güte der Form, wie z.B. ob Knicke in Strömungsrichtung verlaufen oder ob es im allgemeinen Beulen gibt.

Eine typische Schwäche dieser Verfahren tritt bei eingetauchten oder eintauchenden Spiegeln auf. Hierbei kommt es entweder zum turbulenten Nachlauf oder in anderen Fällen kommt die abgelöste Strömung zu sehr steilen seitliche Gradienten der Oberfläche mit entsprechend brechenden Wellen. Bei stumpfer Wasserlinie kommt es darüber hinaus häufig auch am Bug zu erheblichen Wellenbrechungen.

Um solche Strömungsphänomene auch numerisch bearbeiten zu können werden Verfahren entwickelt, die mit finiten Volumen Verfahren verwendet werden. Man führt dazu

eine Zerlegung des Strömungsgebiets in kleine Teilvolumina ein und die eigentlich kontinuierlichen Feldgrößen werden durch diskrete Einzelwerte ersetzt. Die Differentialgleichungen werden durch entsprechende Differenzenschemata approximiert. Nach der räumlichen Integration von Masse und Impuls über jede Einzelzelle werden in einem Iterationsverfahren die entsprechenden Flüsse über die Zellgrenzen zum Ausgleich gebracht (sog. SIMPLE-Verfahren). Die Unterschiede der zahlreichen Verfahren unter dieser Überschrift liegen in den Details der Differenzenschemata, den Iterationsverfahren und damit zusammenhängend mit der Möglichkeit unterschiedliche Netztopologien zu verwenden.

Hierbei liegt die Hauptproblematik wiederum in dem unbekanntem Flüssigkeitsrand an der freien Wasseroberfläche.

Bei der überwiegenden Anzahl von Verfahren fällt die freie Oberfläche (FO) mit einem Gitterrand zusammen. Dadurch können die Randbedingungen an der FO leicht erfüllt werden. Bei der Iteration zur Bestimmung des stationären Wellenfelds muß jedoch in jedem Iterationsschritt ein großer Teil des numerischen Gitters neu erzeugt werden, um es der sich bewegenden FO anzupassen. Zudem lassen sich auf diese Weise nur glatte Wasseroberflächen und wenig gekrümmte Schiffsformen berechnen, wodurch wesentliche mögliche Vorteile gegenüber Randelementeverfahren ausfallen. Nahezu ausgeschlossen sind dann z.B. teilgetauchte Bugwülste und extremer Spantausfall.

Um diese Problem zu beseitigen wird an Verfahren gearbeitet, die ein festes Gitter verwenden und die FO durch Flüssigkeitsfüllgrade in jeder Gitterzelle modellieren. Dazu muß das Gitter bis über die FO definiert werden. Es gibt aber keine grundsätzlichen Einschränkungen bzgl. der Form der Flüssigkeitsoberfläche, so daß auch brechende Wellen und Spritzer grundsätzlich darstellbar sind. Es ergeben sich dann natürlich teilgefüllte Zellen, so daß die Erhaltungsgleichungen nicht mehr in ihrer einfachsten Form verwendet werden können. In dem in der HSVA entwickelten Verfahren /5/ werden die am Austausch beteiligten benetzten Zellränder durch eine Interpolation

der Füllgrade an den umgebenden Zellen in jedem Iterationsschritt bestimmt. In dem am IfS entwickelten Verfahren, Komet, wird eine wird auch die Luftströmung mit modelliert /6/. Abb. 3 stellt das mit dem in der HSVA entwickelten VOF Verfahren berechnete Wellensystem im Vergleich zu Messungen für ein Schiff mit $CB=0.6$ dar. Die Rechenzeit für das Netz mit insgesamt 326.000 Elementen betrug 50 Stunden auf einer 20 sepecfp95 Workstation. Eine entsprechende Rechnung mit dem Randelementeverfahren SHALLO dauert nur wenige Minuten.

In Abb. 4 wird eine berechnete Bugwelle im Vergleich zum Wellenfoto für einen völligen Tanker gezeigt. Man sieht, daß mit dem Finite Volumen Verfahren sogar die durch den Halskragenwirbel entstehende Strömung vor dem Schiff berechnet werden kann.

Abb. 5 zeigt eine perspektivische Ansicht auf den Spiegel eines halbgleitenden Schiffes bei $Fn=0.5$. Mit dem finite Volumenverfahren können die Details der Umströmung der Spiegelhinterkante errechnet und aufgelöst werden.

2.2 Zäher Widerstand und Nachstrom

Zähigkeitsbedingte Schubspannungen an der Außenhaut, sowie der zähigkeitsbedingte Druckwiderstand machen bei den meisten Schiffen mehr als die Hälfte des Gesamtwiderstands aus. Zwar macht das Integral der Schubspannungen (Reibungswiderstand), daß mit hervorragender Genauigkeit über empirische Formeln abgeschätzt werden kann, hiervon wiederum den größten Teil aus. Aber auch der Druckwiderstand und insbesondere die von Zähigkeitseffekten dominierte Zuströmung zum Propeller (Nachstromverteilung) sind von größter Wichtigkeit für den Schiffsentwurf. Da für ihre Analyse mindestens die RANS-Gleichungen gelöst werden müssen, konzentriert sich Forschung und Entwicklung auf die Weiterentwicklung und Anwendung der Finite-Volumen-Verfahren.

Bei der numerischen Lösung der RANS-Gleichungen wird, wie oben erwähnt ein Turbulenzmodell verwendet. Die Auswahl dieses Modells hat einen wesentlichen Einfluß auf die Qualität der Lösung insbesondere in

Zusammenhang mit den in räumlicher Strömung um glatte Körper beobachteten Formen der Strömungsablösung, wie sie bei Schiffen üblich sind. Wie die Abb. 6 zeigt kann der Nachstrom, hier für einen Tanker im Vergleich zur Messung gezeigt sehr gut vorausberechnet werden. Daher werden solche Berechnungen, die innerhalb weniger Tage (einschl. Netzgenerierung) durchgeführt werden können regelmäßig zur Schiffsoptimierung eingesetzt, obwohl die quantitative Bestimmung des zähen Formwiderstands noch nicht ganz die praktisch erforderliche Genauigkeit erreicht. Es ist aber zu erwarten, daß dies in wenigen Jahren der Fall sein wird.

Besonders nützlich sind solche Rechnungen auch bei der Untersuchung von Strömungsdetails. Aus der Druckverteilung auf den Wellenbockarmen (Abb. 7) erkennt man zum Beispiel deutlich, daß die Profile nicht optimal in der Strömung liegen und in welche Richtung sie gedreht werden müssen.

Aufgrund des erheblichen Aufwandes für die Gittergenerierung und die eigentliche Berechnung werden solche Verfahren noch nicht in automatischen Optimierungsalgorithmen eingesetzt, sondern es kommt immer noch darauf an, daß der Ingenieur die richtige Bewertung macht um seinen Entwurf zu verbessern. Dafür stehen ihm aber viel mehr Detailinformationen zur Verfügung als nach einem normalen Widerstands- und Nachstromversuch.

2.3 Propulsion

Der minimale Leistungsbedarf am Propeller ist das hauptsächliche Optimierungsziel bei der Schiffsoptimierung. Wellenwiderstand, zäher Widerstand und Nachstrom sind eigentlich nur Details des Gesamtproblems. Eine andere Komponente ist die Propellerfreifahrt, die für heute übliche Schiffspropeller im Bereich ihres Auslegungspunktes mit numerischen Verfahren mit sehr guter Genauigkeit berechnet werden kann. Nach der im Schiffbau üblichen Betrachtungsweise muß man nun noch die integralen Wechselwirkungsgrößen Sog und Nachstrom kennen, um eine Leistungsprognose zu machen. Gerade diese Wechselwirkungen können in der Praxis

erheblich durch Details der Hinterschiffs-, Ruder und Propellergeometrie beeinflusst werden. Zu ihrer Bestimmung hat wird bei numerischen Verfahren folgendes relativ einfaches Modell verwendet:

In einer RANSE-Rechnung wird der Propeller durch ein Kraftfeld, daß seine geschätzte Schubverteilung ersetzt simuliert. Eine solche Rehnung ist kaum aufwendiger als eine normale RANSE Rechnung, wie sie zum Beispiel zur Berechnung des Nachstroms verwendet wird. Mit diëser Rechnung läßt sich die Wechselwirkung mit allem was vor dem Propeller liegt gut annähern, nicht aber so ohne weiteres die wichtigen Wechselwirkungen mit dem Ruder.

Maksoud /7/ verfolgt eine vollständige RANSE-Berechnung, bei der die Schiffskörperumströmung (ohne Wellenbildung) zusammen mit der Strömung am Propeller berechnet wird. Aufgrund der Relativbewegung zwischen Schiff und Propeller ergeben sich besondere Anforderungen an die Gitter und die Berechnung muß instationär, d.h. durch zeitliche Integration durchgeführt werden. Es wird daher noch einige Zeit dauern, bis solche Berechnungen routinemäßig angewendet werden können.

Chao entwickelt zur Zeit ein etwas einfacheres Verfahren, bei dem innerhalb einer RANSE Berechnung der Schiffsumströmung der Propeller durch ein bewährtes Tragflächenverfahren simuliert wird. Es wird erwartet, daß so alle wichtigen Wechselwirkungen gut erfaßt werden und der Rechen- und Gittergenerierungsaufwand beherrschbar bleiben.

2.4 Manövrieren

Bei der Entstehung der Strömungskräfte am manövrierenden Schiff spielen sowohl für das Ruder als auch für den Schiffskörper Zähigkeitseffekte eine wichtige Rolle. Am IfS wurden erhebliche Fortschritte bei der Abschätzung der Kräfte auf Ruder im Propellerstrahl durch Kombination von RANSE und Randlementeberechnungen erreicht /8/. In der HSVA wurde für die Berechnung der Strömung um einen Schiffsrumpf bei Schräganströmung oder im

stationären Drehkreis ein RANSE-Lösers weiter entwickelt und erhebliche Fortschritte erreicht /8/, so daß auch numerische Verfahren immer wichtiger für die praktische Anwendung werden.

2.5 Seeverhalten und Kräfte

Seit langem werden Streifenmethoden für die Berechnung der Starrkörperbewegungen, der Biegemomente und des Seegangszusatzwiderstands erfolgreich verwendet. Solche Berechnungen sind weit verbreitet in der Auswahl von Hauptabmessungen und Schiffssformen. Entsprechende Berechnungen bei Objekten ohne Voraugeschwindigkeit lassen sich wesentlich besser mit Randlementeverfahren erzielen. Nichtlinearen Bewegungssimulationen basieren für die Berechnung der Kräfte auf den Schiffskörper i.A. auch auf potentialtheoretischen Berechnungen. Es werden dann aber für spezielle Wirkungen wie z.B. die Bewegung von Wasser in Tanks oder Leckräumen andere numerische Modelle verwendet, um die inneren Kräfte zu Berechnen. Für die Optimierung von inneren Einteilungen von RoRo-Passagierschiffen zur Erfüllung des Stockholm Agreement ist z.B. das Programm ROLLS geeignet, das gute Übereinstimmung mit entsprechenden Modellversuchen zeigt.

Für die Berechnung von örtlichen Belastungen mit hoher Genauigkeit sollten aufgrund der Spritzer mindestens die Euler-Gleichungen gelöst werden. Schumann zeigt z.B. Berechnungsergebnisse für das Eintreten eines Containerschiffsbugs in eine Welle (Abb. 8). Aufgrund des sehr hohen Rechenaufwandes für solche Berechnungen werden diese wohl erst in einigen Jahren für die praktische Schiffsformoptimierung einsetzbar sein.

3. Experimentelle Methoden

Die experimentellen Methoden haben ähnlich wie die numerischen Verfahren erheblich von den Fortschritten in der Datenverarbeitung und in der Elektronik profitiert. So konnten leistungsfähige Versuchsanstalten ihre Produktivität erheblich steigern. Für die Herstellung von Schiffs- und Propellermethoden sind numerisch gesteuerte

Fräsmaschinen, deren Programme direkt auf Basis von CAD-Daten erzeugt werden, Stand der Technik. Aber auch in der Versuchssteuerung, Meßtechnik und Datenerfassung sowie in der Versuchsauswertung ist die Datenverarbeitung zentraler Bestandteil, wie weiter unten gezeigt wird.

3.1. Widerstandsversuche

Der Widerstandsversuch ist heute mehr ein Teil in der Kette der erforderlichen Versuche für die Erstellung eines kompletten Datensatzes für den Propellerentwurf als ein Mittel der Optimierung. Die eigentliche Optimierung wird anders als zur Zeit noch bei den Numerikern üblich viel richtiger unter Propulsions-Bedingungen durchgeführt, weil dann gleich der häufig bedeutende Einfluß der sich ändernden Wechselwirkungen zwischen Propulsionsorgan-Anhängen und Schiffskörper im Optimierungsprozeß mit erfaßt wird.

Trotz dieser Argumente gegen den Widerstandsversuch wird der Widerstandsversuch auch heute noch als Mittel zur Schiffsform-Optimierung verbreitet eingesetzt. In manchen Fällen, z.B. bei sehr schnellen Booten und Schiffen, wird die Größe des Modells durch technische Möglichkeiten wie Tanklänge und erreichbare Schleppgeschwindigkeit eingeschränkt, so daß in vielen Fällen Propulsionsorgane viel zu klein wären, um sinnvolle Propulsionsversuche durchzuführen. Die Entscheidung, ob Widerstands- oder Propulsionsversuche ausgeführt werden, kann außerdem auch noch durch den Preis beeinflusst werden, der in der Regel für Widerstandsversuche geringer ist.

3.2. Propulsionsversuche

Der Propulsionsversuch läßt sich noch nicht in seiner gesamten komplexen Wirkungsweise mit gleicher Genauigkeit und vergleichbarem Aufwand numerisch simulieren wie der Widerstandsversuch, so daß eine Optimierung von Schiff und Propeller im Zusammenspiel ihrer gegenseitigen Wirkungen, den sogenannten Wechselwirkungen, noch immer genauer und preiswerter im Propulsionsversuch im Modelltank vorgenommen wird. Hoffnungsvolle Ansätze

zur numerischen Lösung dieses Problems sind vorhanden, siehe oben. Es ist zur Zeit nicht abzusehen, wie schnell die Entwicklung der numerischen Programme und Computertechnik zu zuverlässigen Propulsionsberechnungen führen, die einmal den Routine-Propulsionsversuch überflüssig machen werden.

Zur Zeit steht der Propulsionsversuch als wichtiges Glied in der Kette der notwendigen Untersuchungen zur Beschaffung der Unterlagen für den Propellerentwurf noch unangefochten gleich zwei mal im normalen Optimierungsprozeß: Nach der numerischen und ingenieurmäßigen Gestaltung des Schiffskörpers und der Auswahl und Anordnung der Propulsionsorgane werden Propulsionsversuche mit vorhandenen Propellern, den sogenannten Stockpropellern, durchgeführt, die dazu dienen, die Wechselwirkungskoeffizienten, Sogziffer, Nachstromziffer und Gütegrad der Anordnung zu bestimmen und eine Aussage zur erreichbaren Geschwindigkeit bzw. zum Leistungsbedarf zu erhalten. Ein zweiter Propulsionsversuch wird häufig mit dem Modell des aktuellen Propellers durchgeführt, bevor die Kavitationsuntersuchungen beginnen. Bei diesem zweiten Propulsionsversuch wird der endgültige Leistungsbedarf ermittelt sowie das Drehzahl-/Leistungs-Verhältnis festgestellt, das manchmal noch zur Korrektur der Propellersteigung führt.

Auch bei gründlicher Voroptimierung der Schiffsform kommt es vor, daß mit der konzipierten Antriebsleistung die vertraglich vereinbarte Schiffsgeschwindigkeit nicht erreicht wird. In solchen Fällen ist nach wie vor die Ingenieur Erfahrung von größter Bedeutung, weil eine Vielzahl von Maßnahmen ergriffen werden können, um die letzten notwendigen Prozente zu erreichen. Die Palette der möglichen Maßnahmen reicht von großräumigen Schiffsformänderungen, ganz neuen Schiffsentwürfen bis hin zu lokalen Änderungen, aber auch Änderungen der Anordnung der Propulsionsorgane, Modifikation der Propulsionsorgane oder auch Anbringung von zusätzlichen Strömungselementen vor oder hinter dem Propeller. Im nachfolgenden werden einige Beispiele erfolgreicher Optimierungsergebnisse wiedergegeben:

Die Wechselwirkungen zwischen Schiffskörper, Propeller und Ruder können beim Einschraubenschiff von wesentlicher Bedeutung für den Leistungsbedarf sein. Durch Verschiebung der Propellerlage oder des Ruders in Längsrichtung, also Veränderung des Abstands zwischen Schiffskörper und Propeller, Propeller und Ruder oder auch durch Veränderung der Rudergeometrie sind Änderungen der Antriebsleistung in der Größenordnung von jeweils bis zu 2% möglich. Dieses nicht unerhebliche Potential läßt sich durch systematische Propulsionsversuche mit relativ geringem Aufwand ausschöpfen. Das Gleiche gilt für Costabirnen am Ruder, durch die nach wie vor Leistungseinsparungen möglich sind. In der Abb. 9 ist ein Beispiel für ein großes Containerschiff wiedergegeben, bei dem durch Rudermodifikation und Costabirne zusammen eine Verringerung der Leistung um 3,4% erzielt wurde.

Eine weitere meist erfolgversprechende Maßnahme ist eine Verschiebung des eingetauchten Spiegels nach hinten durch einen sogenannten „Ducktail“ was einer Heckverlängerung entspricht. Einsparungen von bis zu 3% sind gemessen worden.

Mit Staukeilen können bei Schiffen mit höheren Froudezahlen erhebliche Leistungseinsparungen erzielt werden. Abb. 10 zeigt als Beispiel eine Staukeilausführung an einer schnellen RoRo-Fähre, mit der bei $F_n = 0,36$ ein Leistungsgewinn von 8% erzielt wurde.

Bei Zweischraubenschiffen steht immer die Frage nach der propulsionsgünstigen Propellerdrehrichtung sowie dem dazugehörigen optimalen Ruderwinkel, die sich im Propulsionsversuch leicht beantworten läßt. In der Abb. 11 ist ein Beispiel für die oben erwähnte RoRo-Fähre dafür wiedergegeben.

In den letzten Jahren haben sich verstärkt Pod-Antriebe durchgesetzt, die weitere Optimierungsspielräume besitzen. Neben der eigenen Form und Gestaltung der äußeren Hülle des Pod-Antriebes sind der Anordnung des Antriebsaggregates im Hinterschiff wesentlich weniger Grenzen gesetzt als beim herkömmlichen Zweischrauber. So ist die Lage in Längs- und Querrichtung eigentlich frei

wählbar, aber auch die Anstellwinkel in vertikaler Richtung und horizontaler (Ruderwinkel) sind optimierbar. Die Abb. 12 zeigt ein Beispiel für eine derartige Optimierung für ein Kreuzfahrtschiff mit zwei Pod-Antrieben.

3.3. Nachstrommessungen

Die Kenntnis des Nachstromfeldes in der Propellerebene gehören zu den Grundlagen, die für einen erfolgreichen Propellerentwurf erforderlich sind. Im Gesamtkonzept der Schiffsformoptimierung ist immer eines der Ziele, ein möglichst ausgeglichenes Nachstromfeld dem Propeller anzubieten, so daß die propellererzeugten Druckimpulse so klein wie zur Lösung der Aufgabenstellung erforderlich werden können. Nachstromfelder können heute schon mit ausreichender Genauigkeit, aber hohem Aufwand berechnet werden, so daß abzusehen ist, daß die Anzahl der Nachstrommessungen im Schlepptank in nächster Zukunft nachlassen wird. Zur Zeit werden numerische Nachstromfelder wegen des hohen Rechenaufwandes noch nicht in automatischen Optimierungsalgorithmen benutzt, wohl aber Formvarianten miteinander verglichen und nach aus Erfahrungswerten festgelegten Kriterien im Zusammenspiel mit Druckimpulsberechnungen für eine Vorauswahl von Schiffsformvarianten benutzt.

In den meisten Fällen werden zur Zeit aber noch Nachstrommessungen mit dem Modell der aktuellen Schiffsform im Schlepptank vorgenommen und die so gewonnenen Nachstromfelder dem Propellerentwerfer zur Verfügung gestellt.

Die heute verwendete Meßtechnik gestattet das Aufmessen aller drei Geschwindigkeitskomponenten in der Propellerebene auf ausreichend vielen Radian, so daß ein sogenanntes 3d-Nachstromfeld erzeugt wird. Im Gegensatz zu noch vor wenigen Jahren werden die drei Geschwindigkeitskomponenten auch tatsächlich für den Propellerentwurf gebraucht und genutzt. Bei entsprechend schneller Auswertsoftware auf dem Schleppwagen steht den Kunden schon am Ende des Versuchs das Nachstromfeld zur Verfügung, was von außerordentlichem Vorteil für die schnelle

Gesamtbeurteilung des Strömungszustandes des Schiffes ist.

Die richtige Anstellung der Wellenbockarme bei Zweischraubenschiffen mit Wellenböcken ist für das Kavitationsverhalten, aber auch für den Leistungsbedarf von besonderer Bedeutung. Zur Ermittlung dieser Winkel wird in der HSVA der 3d-Nachstrom in der Ebene der Wellenbockarme aufgemessen, siehe dazu Abb. 13. Im allgemeinen wird ein mittlerer Winkel für den gesamten Wellenbockarm gewählt, wenn die Verdrehung nur gering ist wie in Abb. 14. Bei stärkerer Verdrehung der Strömung werden die Wellenbockarme im besonderen bei Marineschiffen verdrillt ausgeführt.

3.4. Manövrieren

Bei der hydrodynamischen Gesamtoptimierung eines Schiffes spielen die Forderungen zum Manövrierverhalten häufig eine entscheidende Rolle. Zur Absicherung des Drehvermögens werden im allgemeinen die Steuerorgane aus Erfahrungswerten so ausgewählt, daß die Forderungen erfüllt werden. Bei herkömmlichen Schiffen liegen ausreichend Erfahrungswerte vor, um die Auslegung der Steuerorgane vorzunehmen. Bei besonderen Bauformen und neuen Schiffsentwicklungen sind Manövrierversuche zur Absicherung guter Steuereigenschaften erforderlich. Im Ergebnis dieser Manövrierversuche werden die Steuerorgane mit Hilfe von Berechnungsverfahren so ausgelegt, daß die erforderliche Manövrierfähigkeit erzielt wird, siehe dazu STG-Vortrag von Dr. Oltmann und Dr. Cura Hochbaum.

Bei völligen und / oder kurzen Schiffen (kleines L/B) ist das Problem der Gierstabilität von besonderer Bedeutung. Insbesondere widerstandsgünstige Hinterschiffe neigen zur erhöhten Gierinstabilität, die das Kurshalten auch mit Hochleistungsrudern schwer macht. In solchen Fällen muß die Hinterschiffsform in einem weit nach vorn reichenden Bereich verändert werden, um die Gierstabilität zu erhöhen. Diese Formänderungen sind meist mit einer Widerstandserhöhung verbunden, die zu einem höheren Leistungsbedarf führt. Der gesamte Optimierungsprozeß führt hier zu einem Ergebnis, das in der Regel ein Kompromiß zwischen guten Widerstands /

Propulsionseigenschaften und ausreichender Kursstabilität ist.

3.5. Seeverhalten

Das Seeverhalten eines Schiffes kann von existentieller Bedeutung für das Schiff und die Besatzung sein. Insbesondere gekoppelt mit dem Manövrierverhalten (Broaching) kann es für die Sicherheit von Bedeutung sein.

Experimentelle Untersuchungen und Optimierungen beziehen sich daher meist auf die folgenden Fragen:

Kentersicherheit in nachlaufender See

Hier werden insbesondere bei Schiffen mit höheren Froudezahlen häufig der Einfluß der Hinterschiffsform und der Kontrollorgane auf das Mindest-GM für den sicheren Betrieb in nachlaufender See untersucht.

Überkommendes Wasser

Diese Frage ist insbesondere bei lukendeckellosen Containerschiffen von großer Bedeutung. Der Nachweis entsprechend IMO/SOLAS ist durch entsprechende Modellversuche zu führen. Dabei werden die Lukensäule, Back- und Schanzkleid häufig in mehreren Schritten variiert, bis die überkommenden Wassermengen unter den Grenzwerten liegen.

Lecke RoRo-Passagierschiffe

Nach dem unter dem Stichwort „Stockholm-Agreement“ bekannten Anhang zu SOLAS muß für RoRo-Passagierschiffe im Bereich von Nord- und Ostsee sowie dem Englischen Kanal die Überlebensfähigkeit im Leckfall durch hydrostatische Berechnungen unter Berücksichtigung von einer bestimmten Wassermenge auf dem Fahrzeugdeck oder durch entsprechende Versuche mit lecken Modellen im Seegang nachgewiesen werden. Die Optimierungen zielen hierbei auf die innere Einstellung (Längs- und/oder Querschotte) und das erforderliche mindest GM.

Die Forderung und die Anforderungen an das Seeverhalten nehmen insbesondere auch von Betreiberseite zu und schließen auch Komfortkriterien ein, die durch entsprechende Modellversuche nachzuweisen sind.

3.6. Kavitation

Die Minimierung der Kavitationserscheinungen an Propellern und Bauteilen und damit in Verbindung stehend die Verringerung der propellererregten Druckimpulse ist ein wichtiger Teil des hydrodynamischen Optimierungsprozesses, der erheblichen Einfluß auf die Gestaltung des Hinterschiffes besitzt. Kavitationsversuche und Druckimpulsmessungen in Kavitationstunneln, die es gestatten, ganze Schiffsmodelle hineinzustellen und zu untersuchen, bilden nach wie vor die Grundlage für diesen Teil des Optimierungsprozesses.

Propellermodifikationen aber auch Schiffsformänderungen sind häufig das Ergebnis dieser Untersuchungen. Über den aktuellen Stand der Kavitationsforschung berichten Friesch und Weitendorf in ihrem STG-Vortrag /9/.

4. Schlußbemerkung

Die Anforderungen an die Entwicklung von Schiffsformen sind in den letzten Jahren gestiegen. Die Versuchstechniken und die numerischen Strömungssimulationen sind aber erheblich weiterentwickelt worden. Für die überschaubare Zukunft kann erwartet werden, daß numerische und experimentelle Verfahren, die jedes für sich seine Stärken und Schwächen haben, komplementär verwendet werden, um so optimale Lösungen und die größtmögliche technische Sicherheit zu erreichen.

Literatur:

/1/ G. Jensen, Berechnung der stationären Potentialströmung um ein Schiff unter Berücksichtigung der nichtlinearen Randbedingung an der Wasseroberfläche, Institut für Schiffbau, Bericht Nr. 484, Juli

/2/ H.C. Raven, A practical nonlinear method for calculating ship wave making and ship wave making resistance, 19th Symposium on Naval Hydrodynamics, Seoul 1992

/3/ L. Larson, CFD as a tool in ship design, CFD-SRI Workshop, Tokyo 1994

/4/ H. Söding, Advances in panel methods, 21st Symposium on Naval Hydrodynamics, Trondheim 1996

/5/ C. Schumann, Berechnungen von Schiffsumströmungen mit brechenden Wellen, HSWA Bericht 1624, Juni 1998

/6/ S. Muzaferija und M. Peric, Computation of free surface flows using finite volume and moving grids, Numer. Heat Transfer, Part B, 32, 369-384, 1997

/7/ Maksoud, M., Menter, F., Wuttke, H., Viscous Flow Simulations for Conventional and High-Skew Marine Propellers, Schiffstechnik, Mai 1998

/8/ A. Cura-Hochbaum und P. Oltmann, Entwicklung der Manövriertechnik in den zurückliegenden 100 Jahren

/9/ J. Friesch und E.A. Weitendorf, Kavitation im Schiffbau, Vortrag zum 100ten Jubiläum der STG, Berlin 1999

Abbildungen

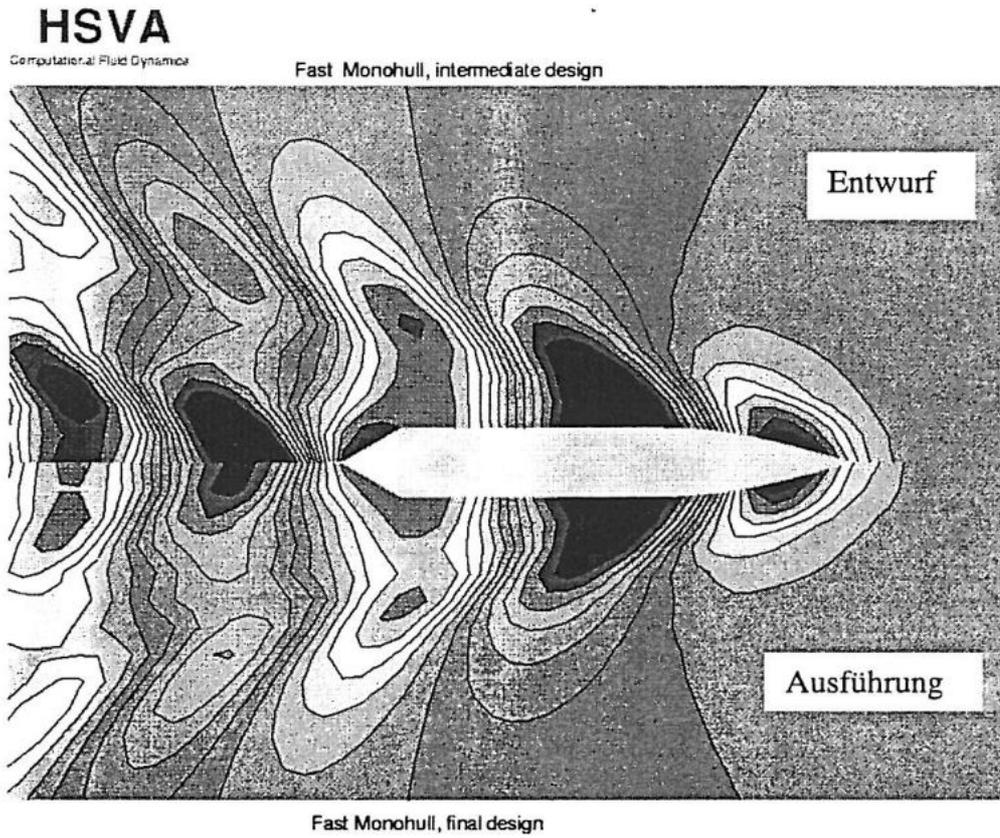


Abb. 1: Blohm+Voss Fast Cruise Liner, Wellenfeld für Vorentwurf und Ausführung

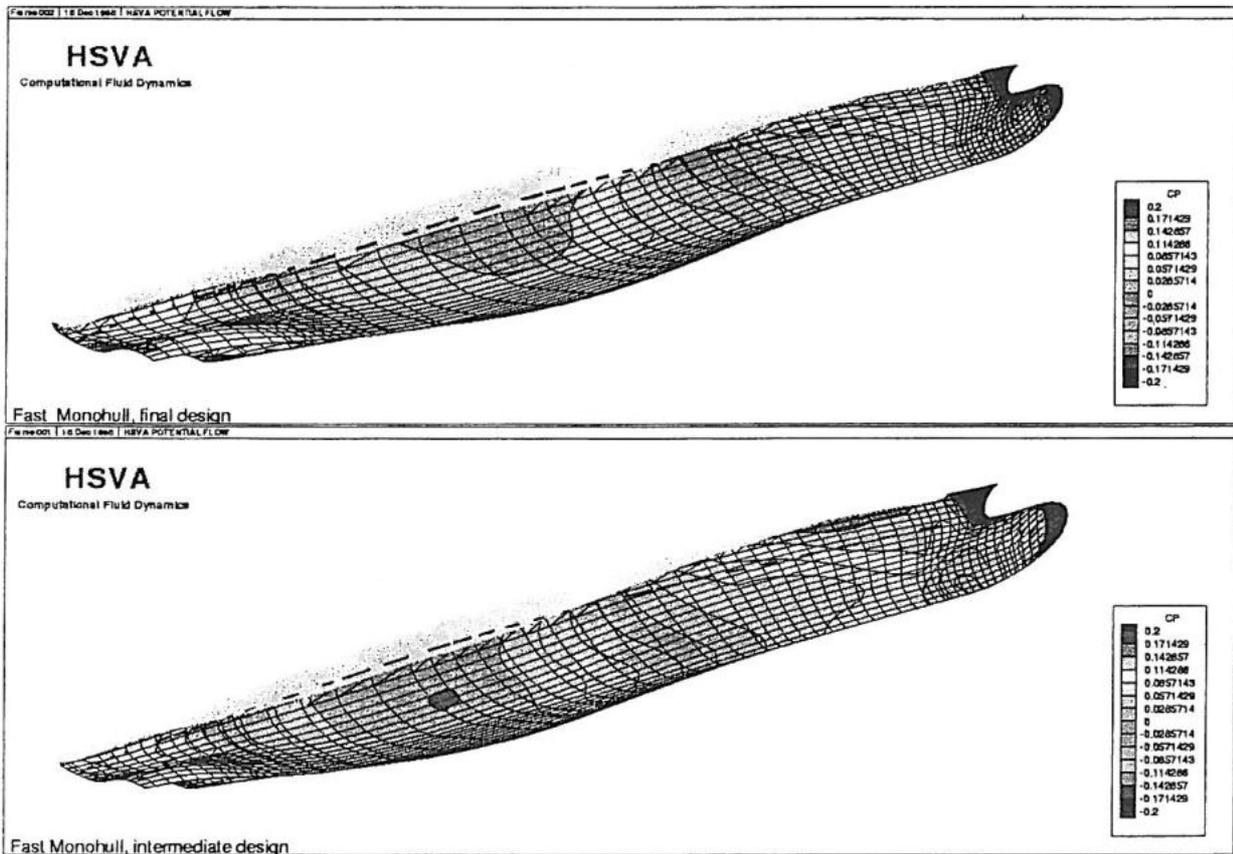


Abb. 2 Druckverteilung potentialtheoretisch

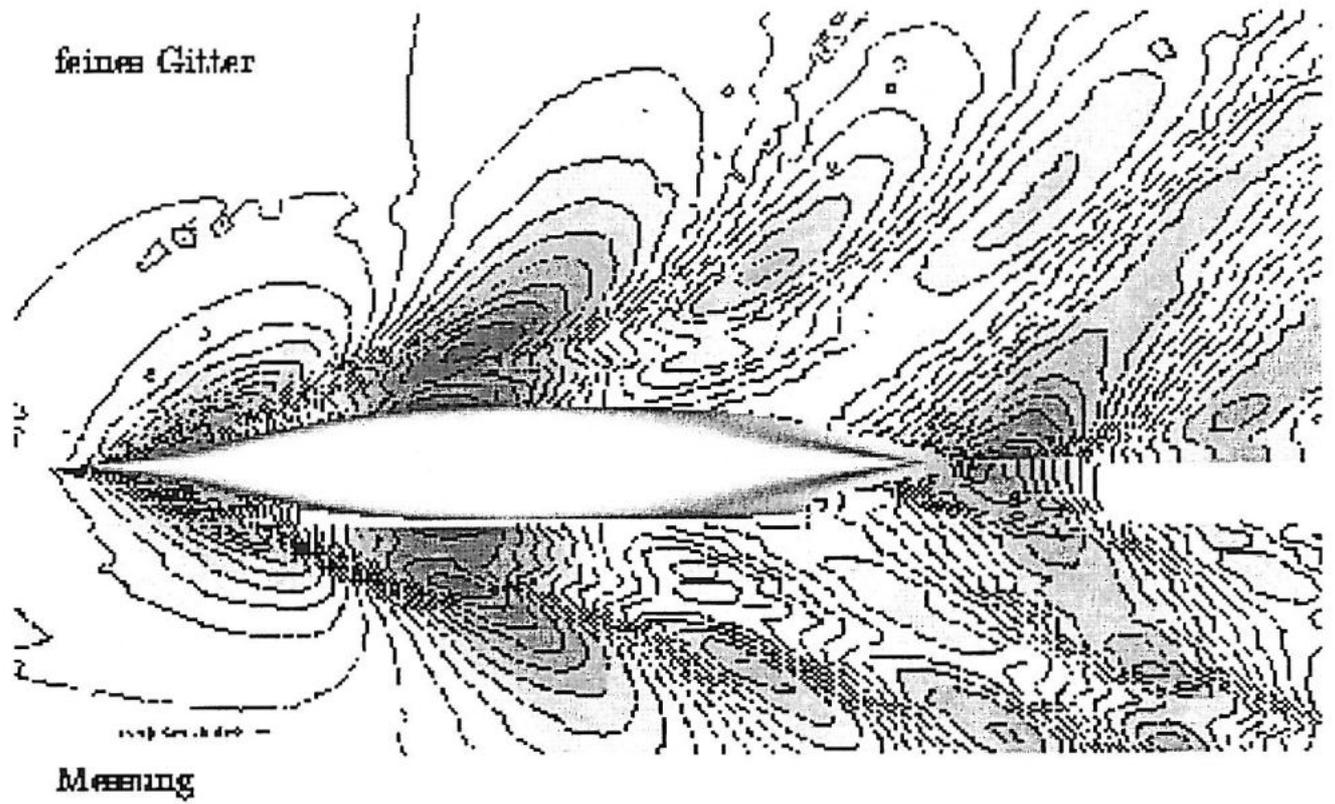


Abb. 3 : VOF Berechnung des Wellenfeldes im Vergleich zu Messungen

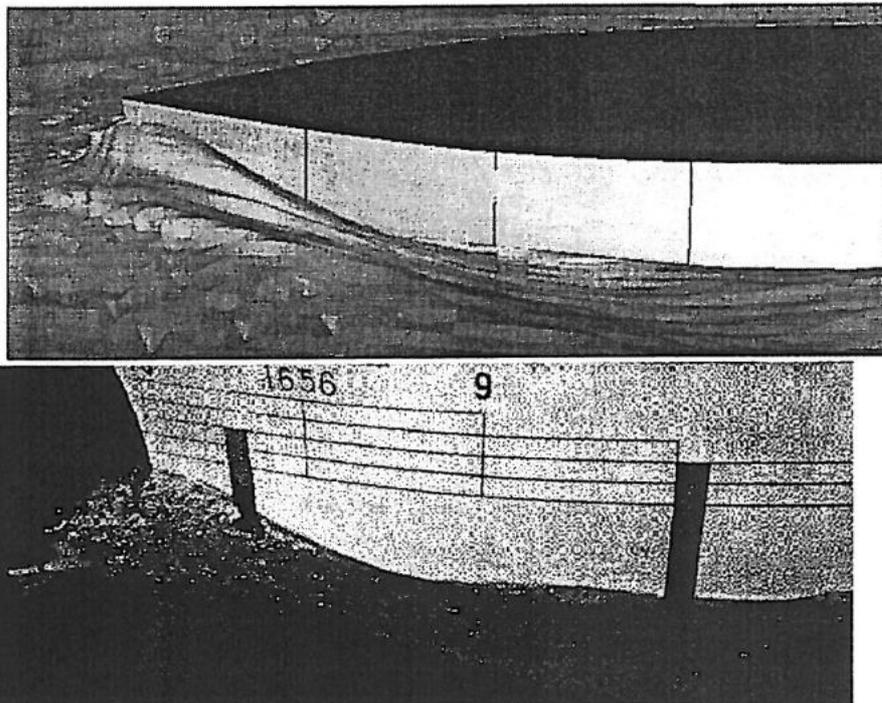


Abb. 4 : VOF Berechnung und Wellenfoto für ein Tankervorschiff

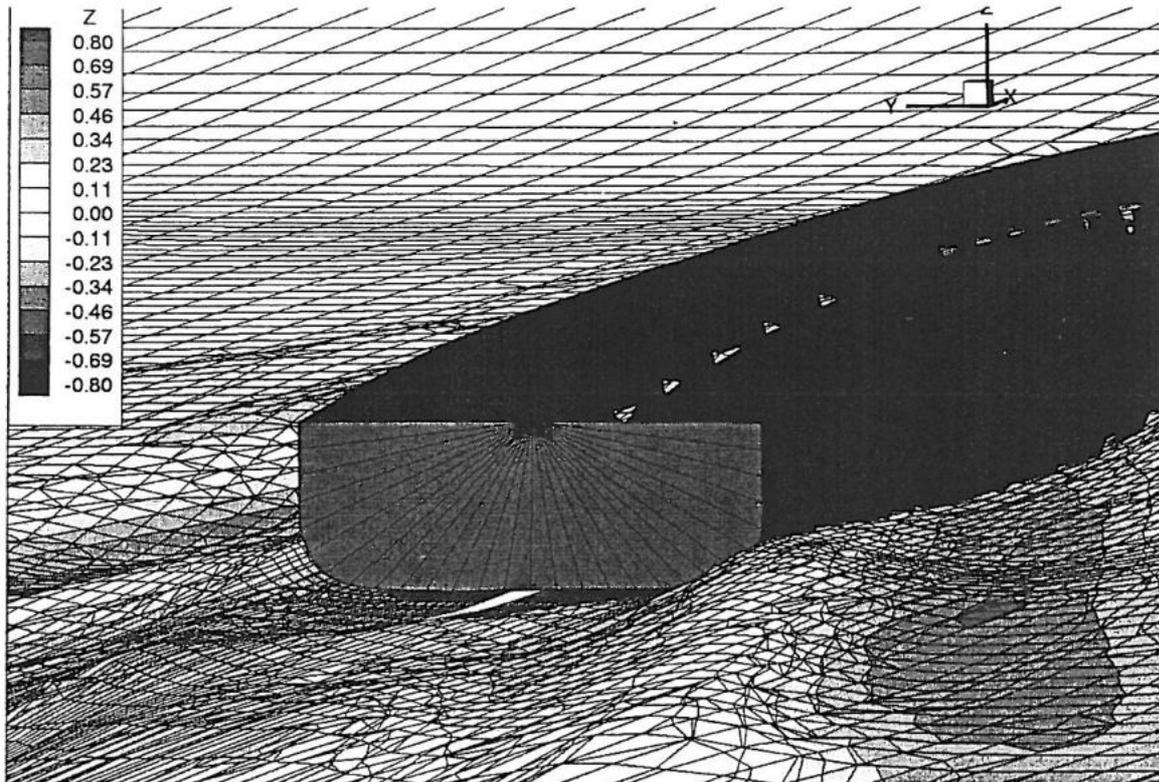


Abb. 5: Wellenbildung am Spiegel eines Halbgleiters

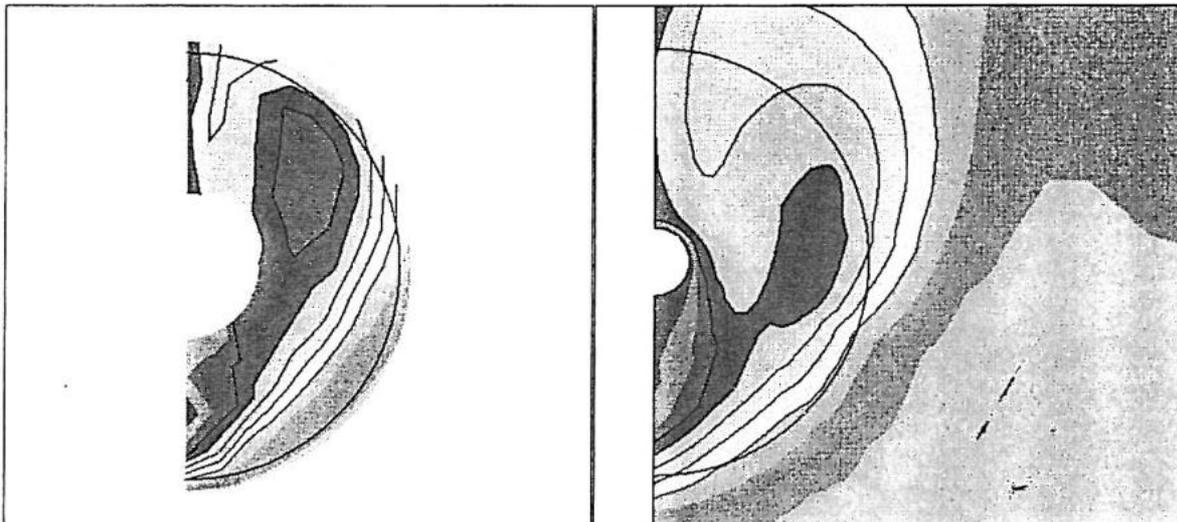


Abb. 6: Gemessener (links) und berechneter(rechts) Tankernachstrom im Vergleich

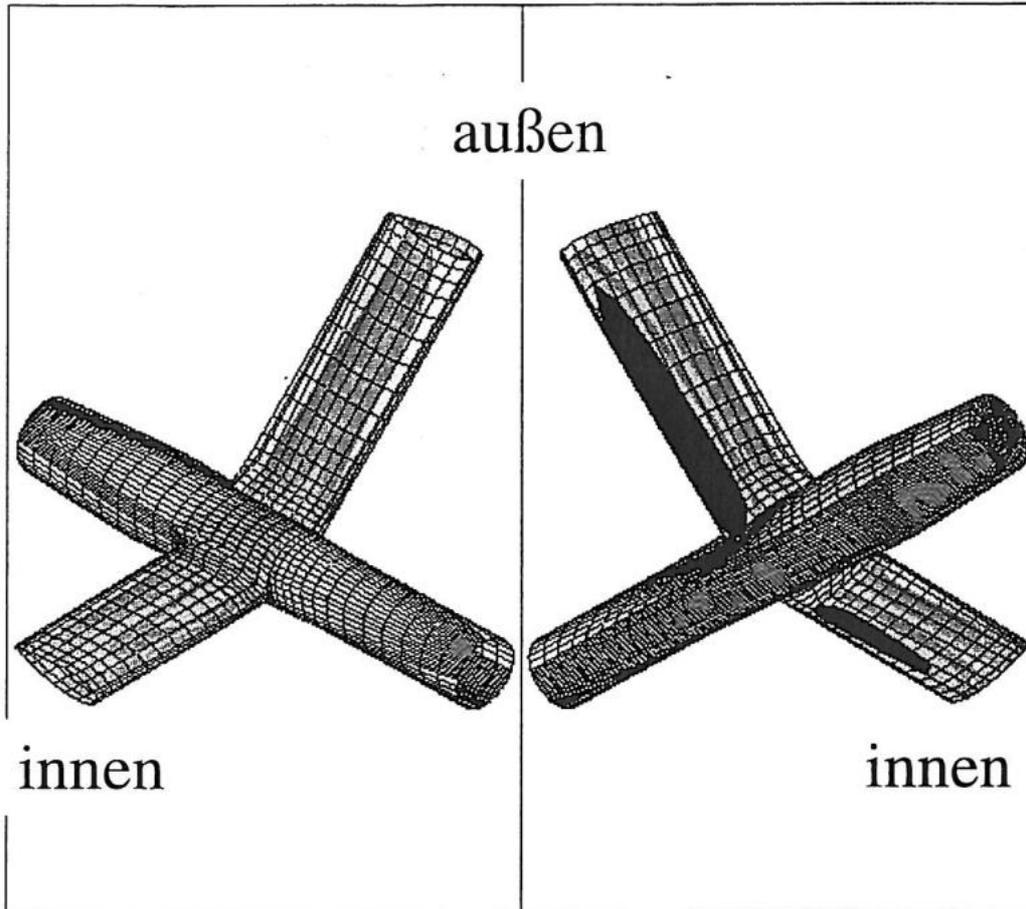
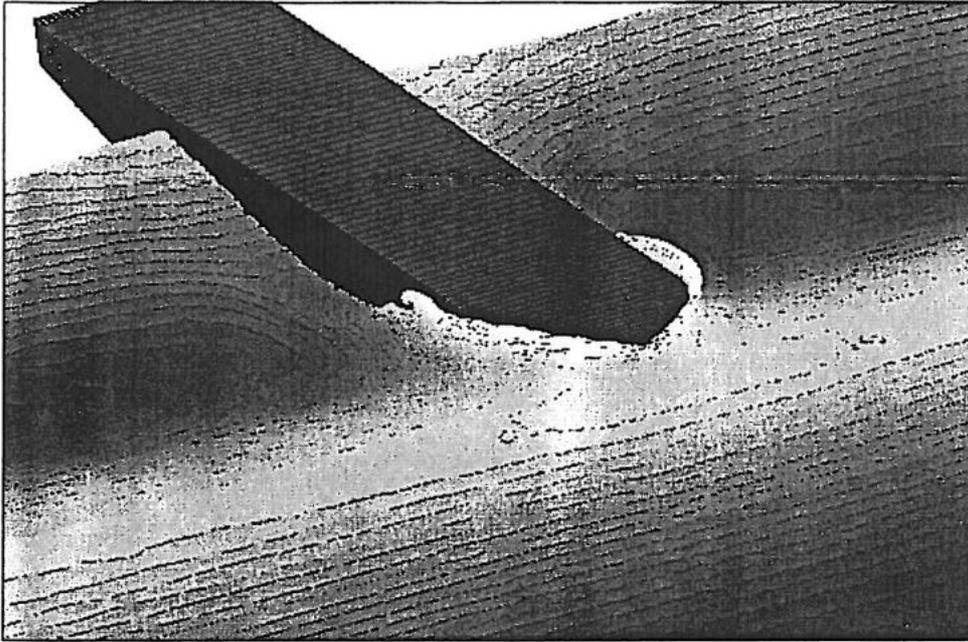
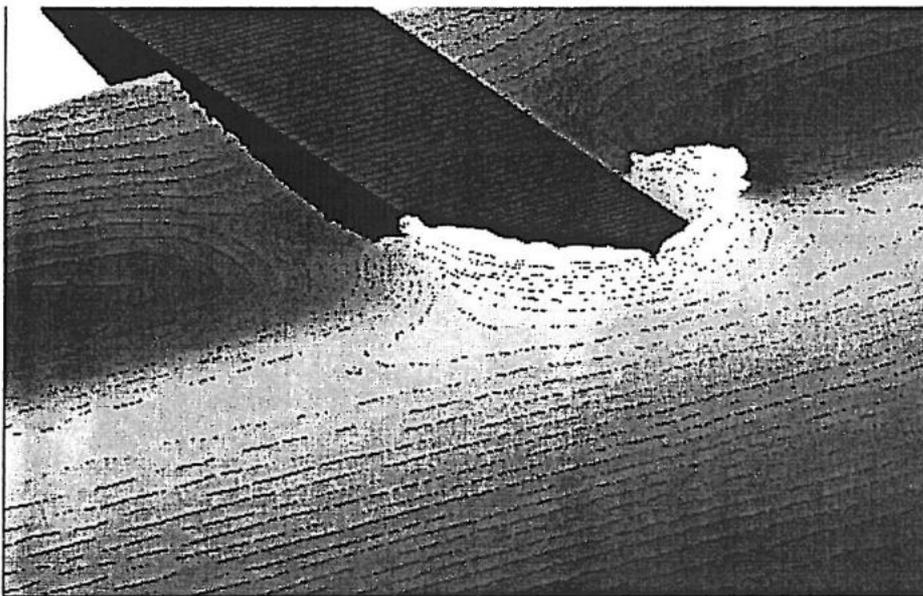


Abb. 7: Druckverteilung an den Wellenbockarmen eines Kreuzfahrtschiffes



T1



T2

Abb. 8: Slammingsimulation einem Containerschiff, zwei Zeitschritte

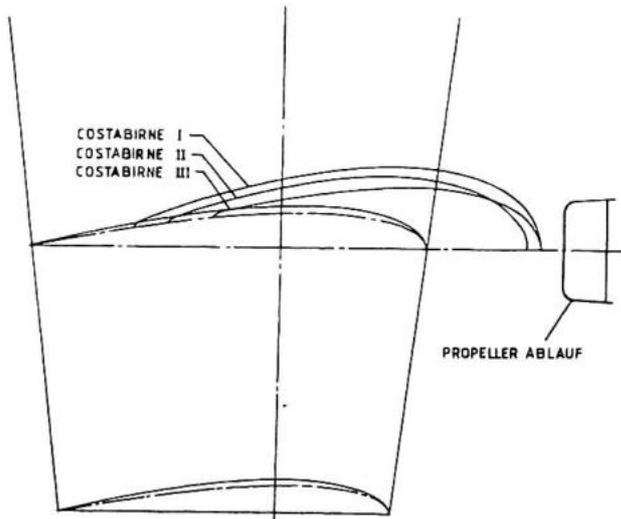


Abb. 9: Annordnung von Costabirnen

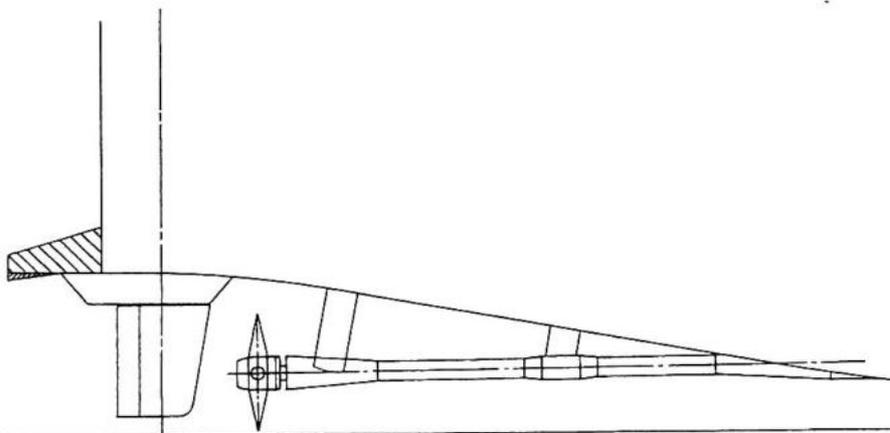


Abb 10: Staukeil

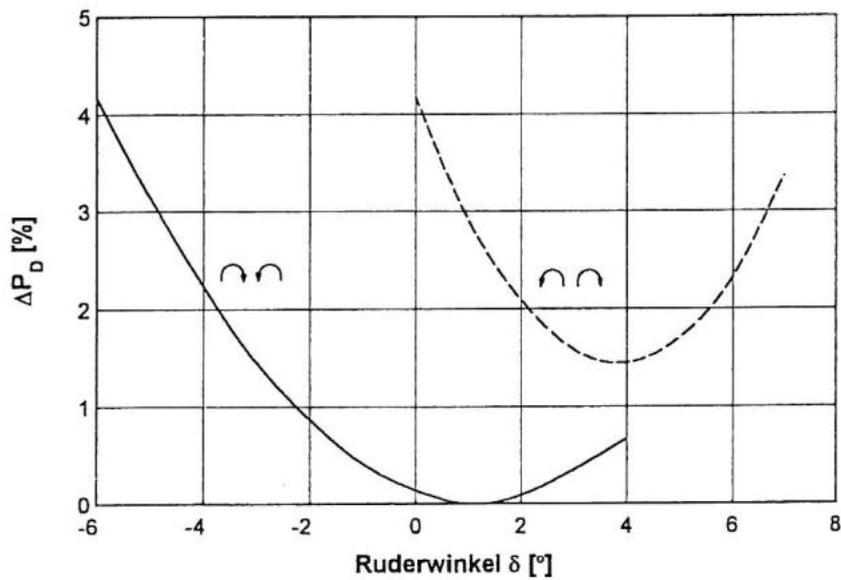


Abb 11: Einfluß des Neutralen Ruderwinkels eines 2-Schraubers auf den Leistungsbedarf

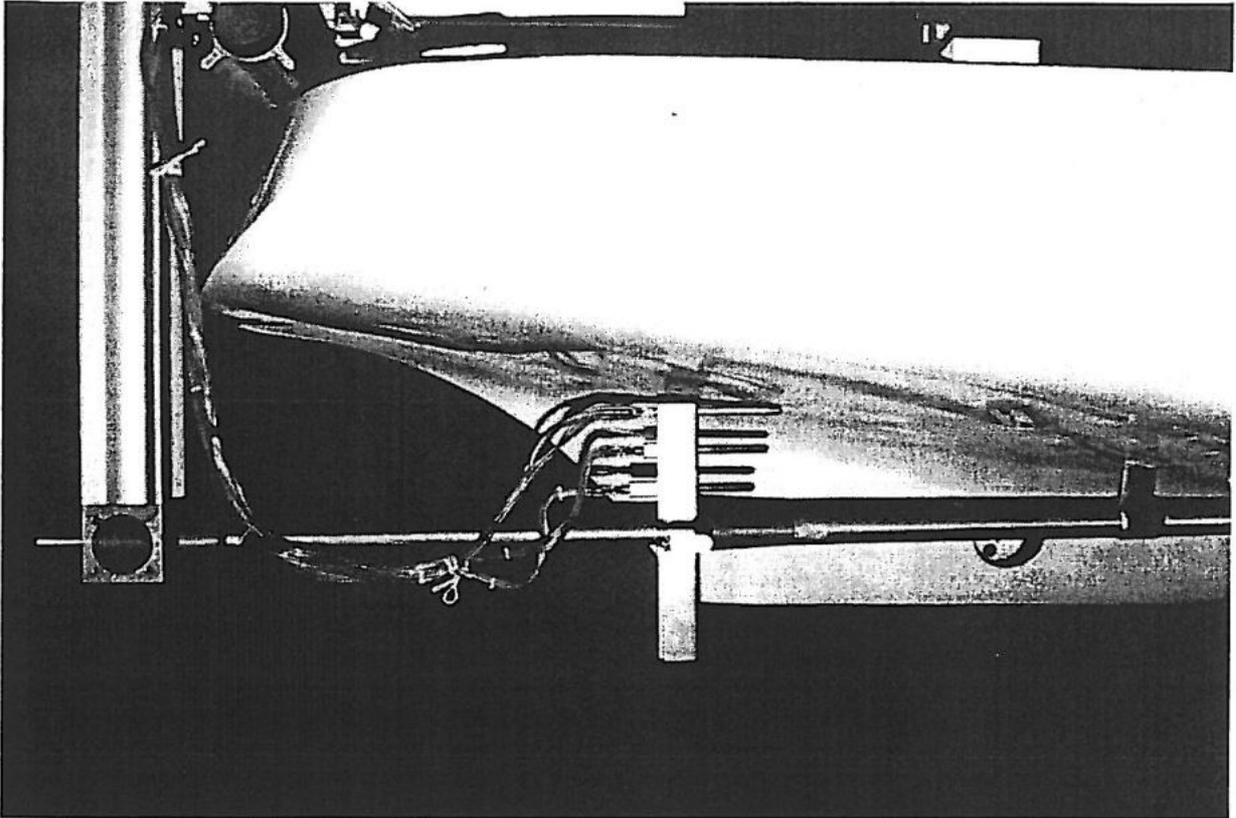


Abb. 13: 5-Lochsondenanordnung zur Bestimmung der Ausrichtung von Wellenbockarmen

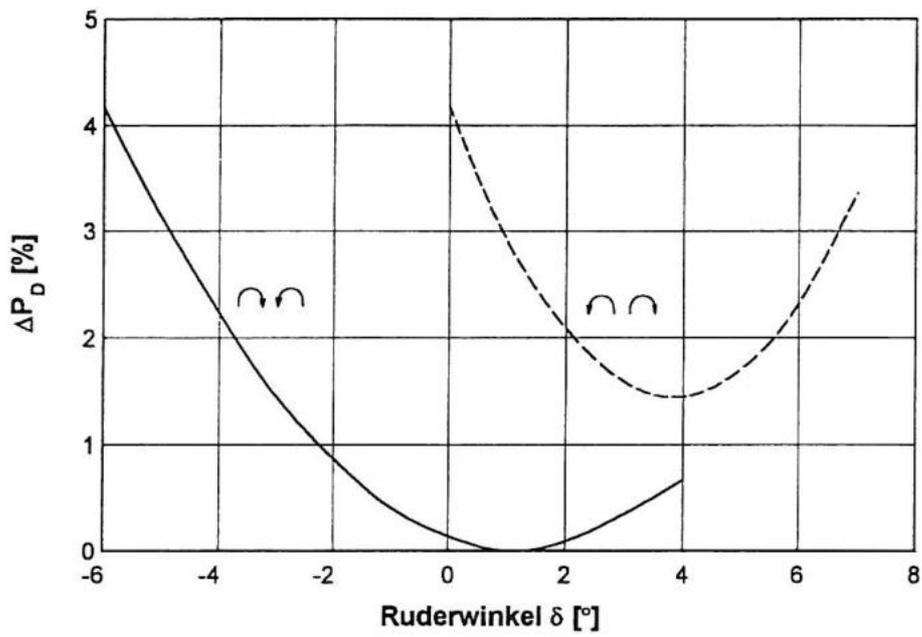


Abb 14: Optimale Ausrichtung der Wellenbockarme