

13. SVA-Forum „Nachstrom“

In Würdigung des 100. Geburtstages von Dr.-Ing. e.h. Werner Henschke (1906 – 1993)
Potsdam, 29. August 2006

Ausgewählte Ergebnisse von Nachstrommessungen und –Berechnungen aus der HSVA

Dipl.-Ing. Friedrich Mewis, HSVA

1. Einleitung

Als ich am 1. September 1968 in der SVA Potsdam als Versuchsingenieur meine berufliche Tätigkeit begann war Dr. Werner Henschke der Leiter dieser kleinen aber feinen Forschungs- und Versuchsanstalt des DDR-Schiffbaus. Ich hatte das große Glück, ihn als Leiter und Wissenschaftler kennen und schätzen zu lernen bevor er 1971 pensioniert wurde. Für mich war besonders faszinierend wie er scheinbar ohne viel selbst zu tun durch die Auswahl und den Einsatz seiner engsten Vertrauten und unter Einbeziehung aller Mitarbeiter sowie durch eine konsequente innerbetriebliche Ordnung die SVA innerhalb von 18 Jahren nach Ihrer Gründung auf ein außerordentlich hohes Niveau gebracht hatte. Der Stellenwert der SVA im Schiffbau der DDR war zu diesem Zeitpunkt sehr hoch. Damals war ich besonders stolz in dieser Versuchsanstalt arbeiten zu dürfen.

Die schwierige Zeit nach seinem Ausscheiden bis zum Zusammenbruch der DDR 1989 hat die SVA hauptsächlich dank der kontinuierlichen Arbeit ihrer Mitarbeiter verhältnismäßig gut überstanden, wenn auch die Bedeutung der SVA im DDR-Schiffbau im Vergleich zu 1971 deutlich abgenommen hatte. Die von Henschke eingeschlagenen wissenschaftlichen Wege und insbesondere die innerbetriebliche Ordnung, haben aber diese Zeit fast unbeschadet überstanden und waren eine der Vorraussetzungen für die SVA Potsdam, die mit der deutschen Wiedervereinigung einher gehende Zäsur zu bestehen. Letztendlich ist für mich die durch Henschke gelegte Basis ein wichtiger Grund für das Überleben der SVA nach der Wiedervereinigung.

Dr. Henschke war im gesamten deutschen Schiffbau eine bekannte und geachtete Person. Sein 85. Geburtstag am 26. Juli 1991 war für die SVA Potsdam Anlass für ein erstes gesamtdeutsches Ehrenkolloquium in der SVA, an dem er auch selbst teilnahm.

Bild 1 gibt ein Foto wieder, das an seinem 85. Geburtstag in seinem Garten in Berlin aufgenommen wurde. Rechts ist der Jubilar zu sehen, die weiteren Personen sind Angehörige der SVA, Dr. Peters, Frau Rinke, Herr Selke, Herr Labes und ich selbst (v.l.n.r.).



Bild 1 85. Geburtstag von Dr. Henschke, v.l.n.r.: Dr. Peters, Frau Rinke, die Herren Selke, Labes, Mewis und Dr. Henschke ganz rechts

2. Nachstrom im „Henschke“

Im Schiffbautechnischen Handbuch, Band 1, VEB Verlag Technik, Berlin 1957, herausgegeben von Dr. Werner Henschke, wird vom Verfasser des Abschnittes 2, Herrn Prof. K. Th. Braun, auf Seite 420 bis 428 umfassend über Nachstrom und seine Anteile referiert und auf die Bedeutung des Schiffsnachstroms im Zusammenwirken mit dem arbeitenden Propeller hingewiesen. Im Prinzip gelten alle damals getroffenen Aussagen noch heute nahezu unverändert, wenn auch durch die Entwicklung der Rechenverfahren und -technik viele damals noch offenen Fragen inzwischen beantwortet sind.

Die Aufteilung des Nachstroms in seine drei Grundbestandteile

- Reibungsnachstrom
- Verdrängungsnachstrom
- Wellennachstrom

gilt auch heute noch unverändert mit der Wertung, dass für Verdrängungsschiffe der Reibungsnachstrom eindeutig dominiert. Die Wechselwirkungen untereinander werden umfassend und richtig dargelegt. Die Lektüre dieser 9 Seiten lohnt sich auch heute noch.

Eine Sammlung von praktischen Überschlagsformeln zur Bestimmung der effektiven Nachstromziffer macht die Arbeit besonders wertvoll. Hier ein Ausschnitt daraus:

Nachstromziffer nach Heckscher (ca. 1930):

- Einschrauber : $W = 0,7 \times CP - 0,18$
- Zweischrauber: $W = 0,7 \times CP - 0,30$

Diese Formeln bestechen durch Ihre Einfachheit und sind mit geringer Abwandlung auch heute noch zu gebrauchen. Die Nachstromziffern sind heute jedoch etwa 20% kleiner, das liegt im Wesentlichen daran, dass die Propellerdurchmesser heute deutlich größer sind als vor 80 Jahren.

3. Nachstrom und Schiffsform

Der Nachstrom hinter einem Schiff wird definitionsgemäß bei der Umströmung des Schiffes erzeugt. Der Begriff Nachstrom wird im Allgemeinen für die gesamte Strömung im Hinterschiff verwendet. Im Unterschied dazu bezieht sich die Nachstromziffer nur auf den mittleren Nachstrom in der Propellerebene. Die heute übliche Definition der Nachstromziffer W ist:

$$W = (V - V_e) / V.$$

Die Nachstromziffer ist also positiv definiert obwohl der Nachstrom einen Verlust darstellt, man kann ihn auch als ein Maß für den Widerstand des Schiffes auffassen. Hohe Nachstromziffern bedeuten also hohe relative Widerstände. Allerdings ist der in diesem Nachstrom arbeitende Propeller in der Lage aus dem Nachstrom einen Teil der verlorenen Energie zurück zu gewinnen. Je höher der Nachstrom ist, desto mehr kann zurück gewonnen werden. Somit bedeuten hohe Nachstromziffern meist auch hohe Gesamtgütegrade der Propulsion.

Die Schiffsform übt einen erheblichen Einfluss auf das Nachstromfeld des Schiffes aus. Es ist in jedem Fall richtig, schon bei der Festlegung der Hauptcharakteristika eines Schiffsentwurfes an den Nachstrom zu denken, wie etwa bei der Festlegung des Verdrängungsschwerpunktes und der Spantcharakteristik. Bei Schiffen mit sehr hoher Propeller-Leistungsdichte, wie z. B. bei großen Containerschiffen ist ein nachstromoptimierter Entwurf des gesamten Schiffes unbedingt erforderlich.

Als Grundregeln können gelten: Schwerpunktlage etwas weiter vorn als aus Widerstandsgesichtspunkten optimal, Schiff so lang wie möglich machen, hintere Schulter weich ausführen, Senten zum WL-Auslauf oberhalb der Propellerwelle gerade gestalten, und Propeller soweit wie möglich nach hinten setzen.

In den Bildern 2 und 3 sind ein gutes und ein schlechtes axiales Nachstromfeld von zwei großen Containerschiffen dargestellt. Es werden hier die axialen Komponenten aufgetragen über dem Winkel wiedergegeben, weil diese Darstellung sich am leichtesten vergleichen lässt. Beide Schiffe haben fast gleiche Hauptparameter und sind reale Projekte. Während für das Schiff mit dem guten Nachstromfeld alle Forderungen bezüglich Kavitation und Druckimpulsen mit dem ersten Design-Propeller gut erfüllt wurden, waren bei etwa gleich hohen Forderungen für das Schiff mit dem schlechten Nachstromfeld drei Propellerentwürfe und entsprechende Versuche im Großen Tank der HSVA und im HYKAT der HSVA erforderlich, um diese zu erfüllen. Die Erfüllung der Druckimpuls-Forderung war letztendlich nur auf Kosten des Propellerwirkungsgrades möglich.

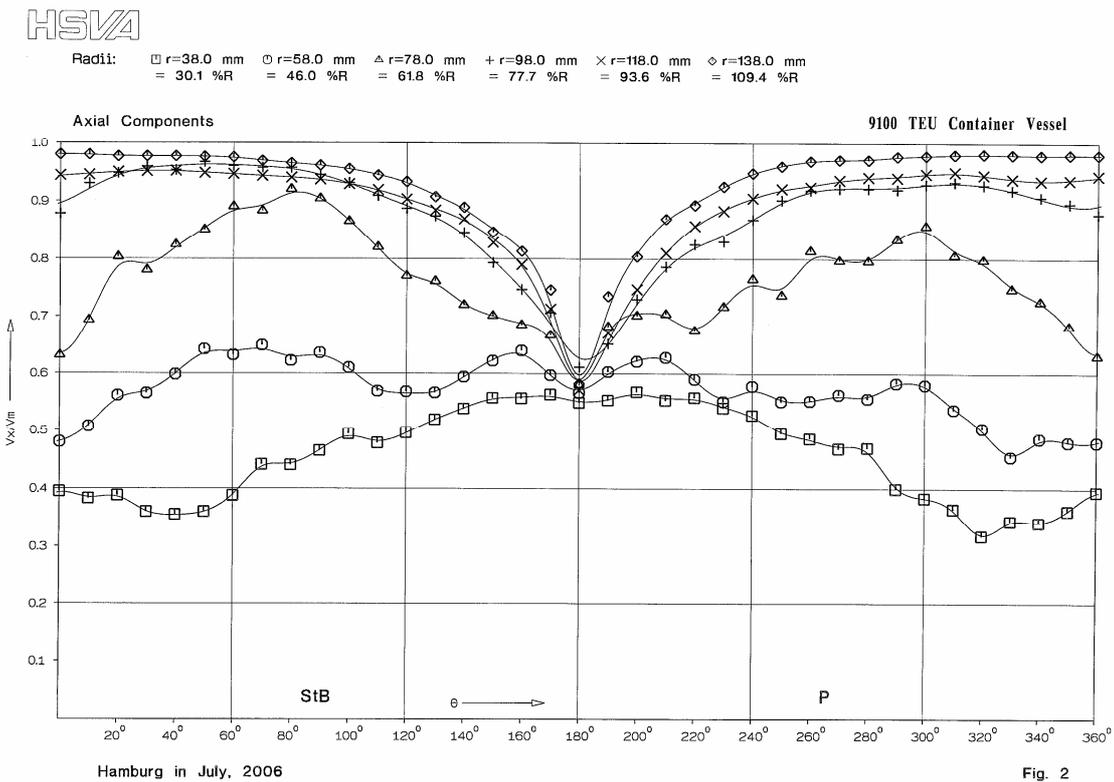


Bild 2 „gutes“ axiales Nachstromfeld eines großen Containerschiffes

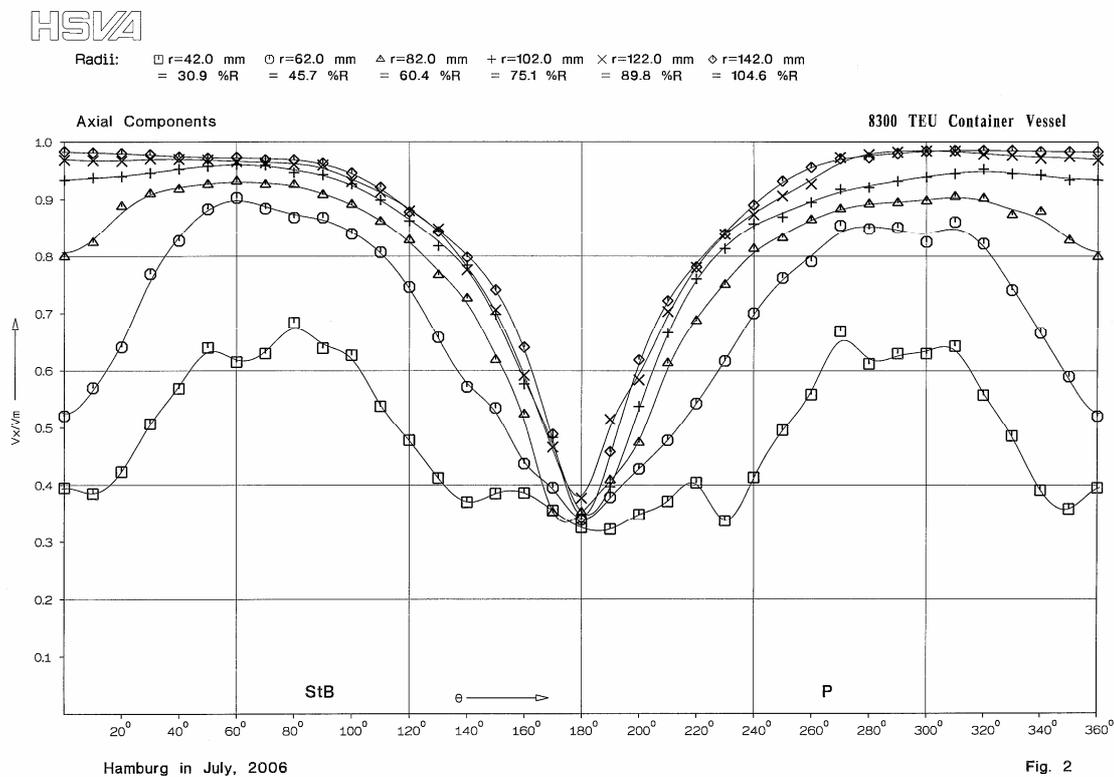


Bild 3 „schlechtes“ axiales Nachstromfeld eines großen Containerschiffes

4. Nachstrom und Propellerentwurf

Der Propeller arbeitet (außer bei Sonderschiffen, wie z.B. der vordere Propeller von Doppelendfähren) im Nachstromfeld des Schiffes, deshalb ist die Kenntnis des Nachstromfeldes für den Propellerentwurf von wesentlicher Bedeutung. Für den Propellerentwurf wird heute im Allgemeinen das nominelle Nachstromfeld in der Propellerebene mit drei Geschwindigkeitskomponenten (3 dimensional) verwendet. Das nominelle Nachstromfeld kann durch Messungen im Modellmaßstab ermittelt werden, dieses muss allerdings auf die Großausführung korrigiert werden. Moderne Rechenmethoden erlauben die Berechnung des Nachstromfeldes direkt für die Großausführung. Bei beiden Verfahren ist ein langer Validierungsprozess Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung. Deshalb werden zurzeit noch deutlich mehr Modellversuchsergebnisse für den Propellerentwurf verwendet als Berechnungsergebnisse.

Bei Widerstands- und Propulsionsversuchen sowie bei nominellen Nachstrommessungen mit Schiffsmoellen ist der Reibungswiderstand größer als beim Schiff weil die Grenzschicht des Modells relativ dicker ist. Aus diesem Grund wird der Reibungswiderstand der Froudeschen Hypothese entsprechend skaliert, während der Wellenwiderstandsbeiwert als übertragbar angesehen wird. Dieser Froudeschen Reibungs-Korrektur entsprechend muss auch das Nachstromfeld auf die Großausführung korrigiert werden. Diese Arbeit wird im Gegensatz zur Widerstandskorrektur meistens vom Propellerentwerfer vorgenommen.

Propellerentwürfe werden heute immer „Nachstrom-angepasst“ ausgeführt, d.h. für den Entwurf eines Propellers ist ein aktuelles Nachstromfeld erforderlich. Die klassische Optimierung des Wirkungsgrades ist wegen den immer größer werdenden Propellerbelastungen eher in den Hintergrund getreten.

Der Propellerentwurf wird der peripher gemittelten radialen Lastverteilung angepasst. Zur Minimierung der Kavitationserscheinungen werden Fortschrittsgrad- oder Anströmwinkelschwankungen, die aus den Komponenten des räumlichen Nachstromfeldes gewonnen werden, verwendet. Hierfür werden Rechnerprogramme genutzt, deren Ergebnisse aber in jedem Fall von erfahrenen Benutzern bewertet werden müssen.

Das aktuelle Nachstromfeld ist weiterhin die Basis für die Berechnung der Lastschwankungen am Einzelflügel und am gesamten Propeller, also Basis für die Festigkeitsberechnungen des Propellers. Die so ermittelte Gesamtpropellerbelastung wird wiederum für die Auslegung und Schwingungsberechnungen der Wellenleitung verwendet.

Aus dem Vorgenannten ist zu ersehen, dass für den Propellerentwurf heute das Vorhandensein eines aktuellen Nachstromfeldes des Schiffes unumgänglich ist.

Der arbeitende Propeller beeinflusst natürlich auch seine eigene Zuströmung, er macht aus dem nominellen das effektive Nachstromfeld. Dieser Einfluss ist aber verhältnismäßig klein außer bei Schiffen mit großen Ablösegebieten direkt vor dem Propeller. Als Faustregel gilt, dass der arbeitende Propeller nur etwa einen halben Propellerdurchmesser nach vorn die Strömung beeinflusst. In den äußeren Radien eher weniger und in den inneren eher mehr. Kleinere Ablösegebiete in Nabennähe, die im nominellen Nachstromfeld als Gebiete sehr hohen Nachstromes zu erkennen sind, werden also durch den Propeller durchaus weggebügelt, während die Nachstromdelle in der 12 Uhr Position kaum beeinflusst wird.

5. Nachstrom und Leistungsberechnung

Die im Nachstrom eines Schiffes vorhandene Energie, die fast immer einen Energieverlust darstellt, besteht bei herkömmlichen Verdrängungsschiffen im Wesentlichen aus der Reibungsenergie der nach hinten immer dicker werdenden Grenzschicht; bei Ablösungen im Hinterschiff kommt ein daraus resultierender Energieanteil dazu und auch die Schiffswellen des Hinterschiffes üben einen Einfluss auf die im Nachstrom vorhandene Energie aus.

Wenn man funktionierende Verfahren zur Berechnung des Wellenwiderstandes und der Schiffsumströmung besitzt, ist man in der Lage, den Leistungsbedarf eines beliebigen Schiffes zu berechnen. Die absolute Genauigkeit dieser Methode ist noch nicht so hoch wie die von Messergebnissen aus Propulsionsversuchen. Aber für Vergleiche von Varianten der Schiffsförm oder Propelleranordnung oder Ruderförm und -Anordnung sind diese Berechnungsergebnisse sehr gut zu gebrauchen.

Im Nachfolgenden wird ein Beispiel dazu aus der Arbeit der HSVA vorgestellt. Die Aufgabenstellung bestand darin ohne Modellversuche den Leistungsbedarf für zwei Varianten eines großen Zweischraubenschiffes zu bestimmen:

- Variante 1: Zweischrauber mit Wellenböcken und zwei Ruder direkt hinter den Propellern
- Variante 2: wie Var. 1, aber nur mit einem großen Mittelruder

Zu diesem Zeitpunkt lagen Modellversuchsergebnisse für Variante 1 vor.

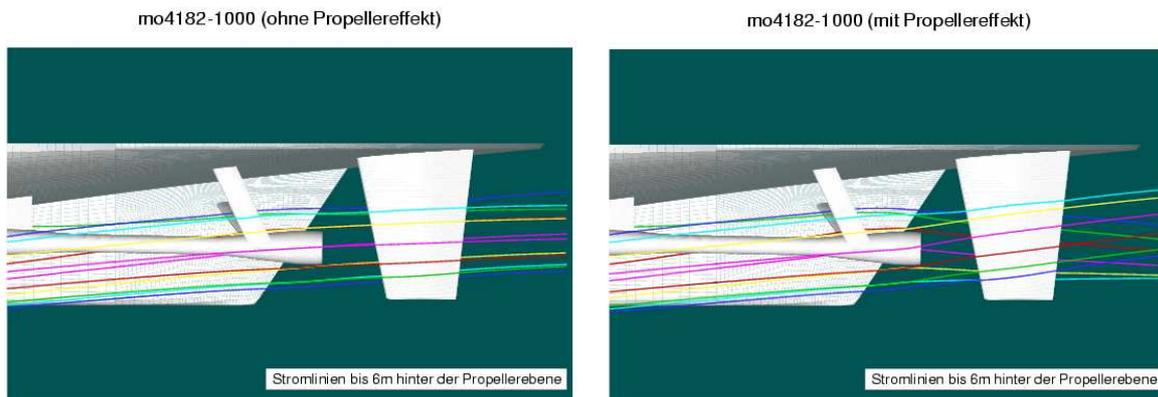


Bild 4 Berechnete Stromlinienverläufe im Hinterschiff, Variante 1 mit zwei Rudern direkt hinter den Propellern; linkes Bild ohne Propeller, rechtes Bild mit arbeitendem Propeller.

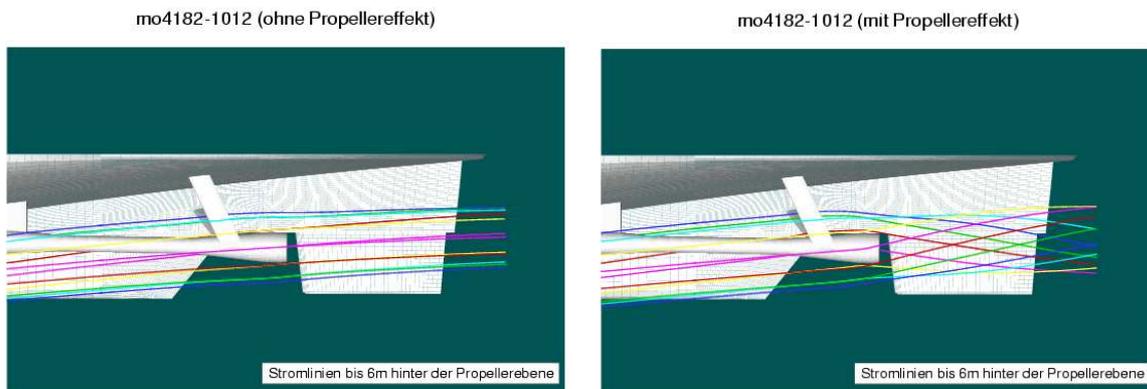


Bild 5 Berechnete Stromlinienverläufe im Hinterschiff, Variante 2 mit einem Mittelruder; linkes Bild ohne Propeller, rechtes Bild mit arbeitendem Propeller.

Zur Lösung der Aufgabe wurden für beide Varianten Strömungsberechnungen für den gesamten Schiffskörper einschließlich Propeller und Ruder vorgenommen und auf dieser Basis die Antriebsleistungen bestimmt. Die Bilder 4 und 5 zeigen Ausschnitte aus den Strömungsverläufen am Hinterschiff für beide Varianten jeweils mit und ohne arbeitenden Propeller. Da das Ergebnis der Leistungsberechnung für den Auftraggeber überraschend war, 4% geringerer Leistungsbedarf für das Schiff mit Mittelruder, wurde anschließend doch noch ein zweiter Modellversuch mit der Variante 2 durchgeführt, der 5% geringere Leistung ergab. Dieses Beispiel ist ein seltener Fall eines kommerziellen Projekts, bei dem Rechnung und Modellversuche für zwei Varianten durchgeführt werden und die Berechnungsergebnisse vor den Versuchen vorliegen.

6. Nachstrom und Druckimpulserregung

Der Propeller am Ende des Schiffes arbeitet zwangsläufig im Nachstrom des vor ihm fahrenden Schiffskörpers und seiner Anhänge. Der Propellerentwerfer hat die oft schwierige Aufgabe trotz eines nicht optimalen Nachstromfeldes einen kavitationsarmen Propeller entwerfen zu müssen, der außerdem geringe Druckimpulse an den Schiffskörper abgeben soll und die vorgegebene Geschwindigkeit garantieren soll. Ein schlechtes Nachstromfeld ist die denkbar ungünstigste Voraussetzung für die Erfüllung all dieser Forderungen, siehe dazu auch Absatz 4.

Um eine entscheidende Verbesserung eines Nachstromfeldes zu erreichen ist es jedoch meistens erforderlich, die Linien des gesamten Hinterschiffes zu ändern, wozu es aus verschiedensten Gründen häufig zu spät ist wenn die ersten Versuchsergebnisse vorliegen. So bleiben nur kleine Änderungen z. B. der Wasserlinien-Ausläufe oder eine Verschiebung des Propellers nach hinten, wodurch allerdings auch nur kleine Verbesserungen erzielt werden können.

Eine wenig bekannte Möglichkeit für eine signifikante Verbesserung eines zu schlechten Nachstromfeldes ist die Anbringung von so genannten „Vortex Generator Fins“, die weit vor dem Propeller im Kimmbereich an geeigneter Stelle fest installiert werden, um einen kleinen Wirbel zu erzeugen, der sich im Lauf seiner Zuströmung zum Propeller zu einem großen oben nach innen drehendem Wirbel entwickelt, wodurch die Nachstromdelle in der 12-Uhr Position aufgefüllt wird. Lage, Größe und Anstellung dieser Fins können mit vergleichsweise geringem Aufwand in einem Kavitationstank ermittelt werden in dem während der Kavitationsversuche ein vollständiges Schiffmodell installiert werden kann. Im HYKAT der HSVA liegen mittlerweile genügend Erfahrungen vor, die eine solche Optimierung in etwa zwei Versuchstagen gestatten.

An dieser Stelle muss der Vollständigkeit halber erwähnt werden, dass mit der Installation von „Vortex Generator Fins“ eine Leistungserhöhung von etwa 2% verbunden ist. Gemäß den im folgenden Abschnitt getroffenen Aussagen müssten diese Fins zu einer deutlichen Erhöhung der Kursstabilität führen, Untersuchungsergebnisse dazu sind mir nicht bekannt.

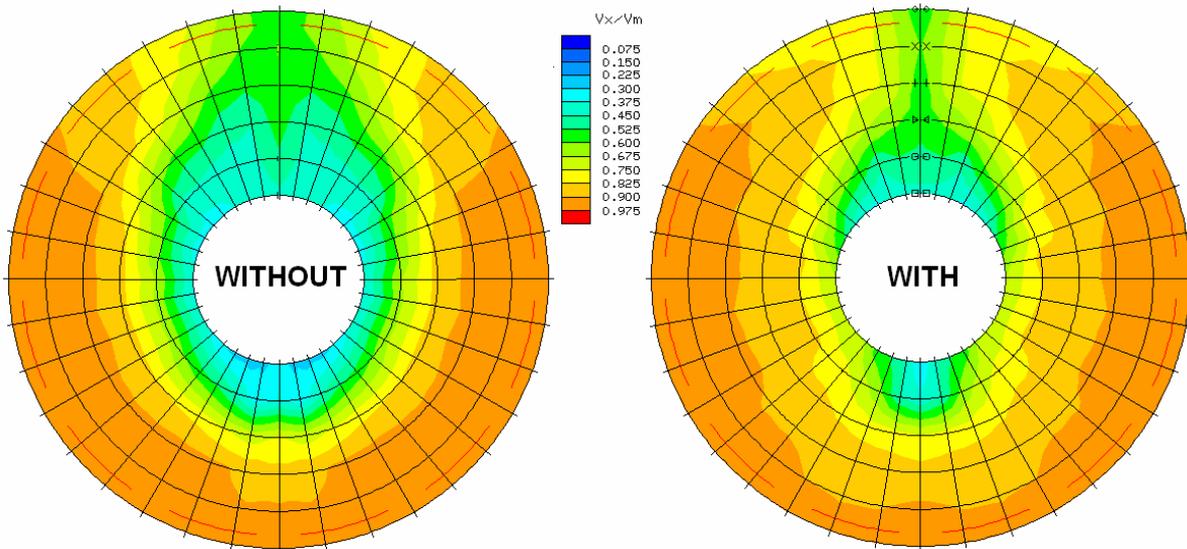


Bild 6 Axiale Nachstromfelder eines Containerschiffes ohne und mit „Vortex Generator Fins“

Die Nachstromfelder eines Containerschiffsmodells mit und ohne Fins in Bild 6 zeigen die gewaltigen Verbesserungen, die durch „Vortex Generator Fins“ erzielt werden können. Noch überzeugender für die Wirksamkeit dieser Fins ist die Höhe der im HYKAT und in der Großausführung gemessenen Druckimpulse am Schiffskörper über dem Propeller, die in den ersten 4 Harmonischen auf weniger als die Hälfte verringert werden, siehe dazu Bild 7.

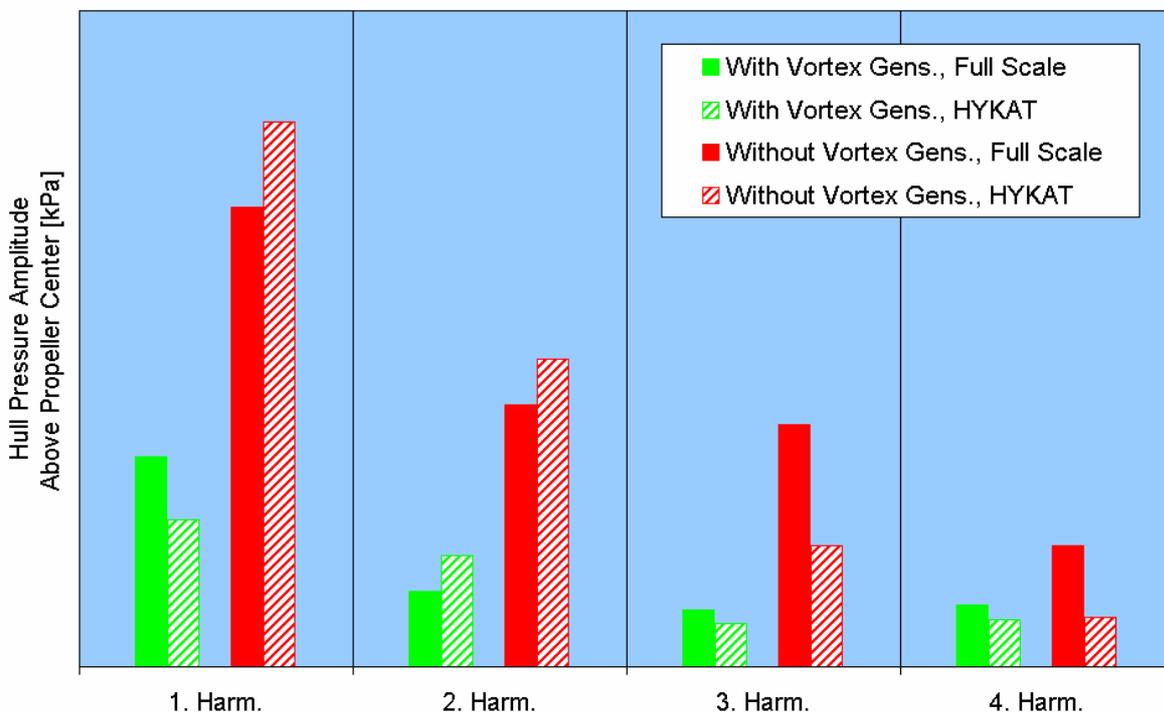


Bild 7 Druckimpulse eines Containerschiffes und des dazu gehörenden Modells ohne und mit „Vortex Generator Fins“

7. Nachstrom und Kursstabilität

Der Zusammenhang von Nachstromfeld und Kursstabilität ist nicht so allgemein bekannt wie z. B. der zwischen Nachstromfeld und Höhe der Druckimpulse wie im vorhergehenden Abschnitt erläutert. Die Entdeckung dieses Zusammenhanges hängt mit der Entwicklung der modernen Pram-Hinterschiffe zusammen, die sowohl vom Widerstand als auch vom Propulsionsverhalten günstiger sind als herkömmliche Hinterschiffe, also weniger Leistung brauchen. Der Grund für diesen geringeren Leistungsbedarf liegt in der saubereren Strömung im Hinterschiff, die sich im Nachstromfeld als nahezu wirbelfrei darstellt.

Völlige Schiffe (CB größer 0,7) mit geringem L/B (L/B kleiner 6) haben schon von vornherein häufig Schwierigkeiten, die IMO-Forderungen zur Kursstabilität zu erfüllen, oder praktischer ausgedrückt: haben Schwierigkeiten geradeaus zu fahren. Werden in einem solchen Fall die Schiffslinien ausschließlich für minimalen Leistungsbedarf entworfen, kann es passieren, dass das fertige Schiff absolut kursinstabil ist. Ein solches Beispiel wurde in der HSVA 1996 sehr gründlich untersucht, d.h. es wurden für drei sehr unterschiedliche Linienentwürfe alle Versuche durchgeführt, die für eine Gesamtbeurteilung erforderlich sind, also Widerstands- Propulsions-, Nachstrom- und Manövrierversuche.

Zur Definition der drei Entwürfe:

Entwurf A, Ausgangsentwurf mit extremen U-Spanten

Entwurf B, Alternativentwurf mit Pram-Hinterschiff und optimiertem Vorschiff

Entwurf C, Hinterschiff mit moderaten U-Spanten und optimiertem Vorschiff

Alle Varianten hatten identische Hauptabmessungen, aber leicht unterschiedliche Ruder.

An dieser Stelle interessiert uns der Zusammenhang zwischen Nachstromfeld und Kurstabilität. Es besteht die Vermutung, dass ein großer energiereicher Kimmwirbel die hydrodynamische Masse des Hinterschiffes deutlich vergrößert (Clarke and Horn, 1997) und damit die Kursstabilität verbessert. Die Ergebnisse der oben beschriebenen Experimente mit drei Modellen eines Chemikalien-tankers mit extrem niedrigem L/B bestätigen diese Hypothese eindeutig, siehe dazu Bild 8 und Tabelle 1.

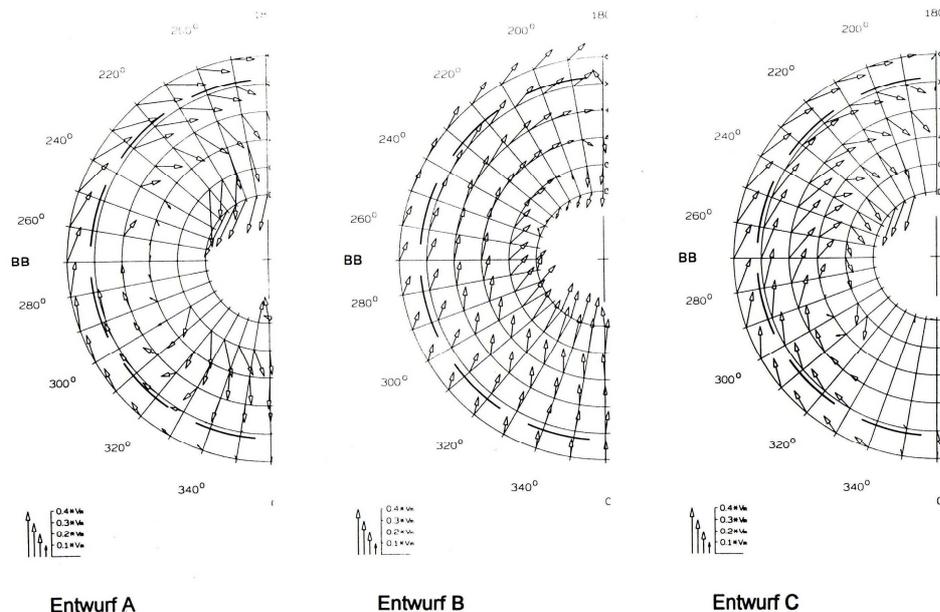


Bild 8 Transversale Nachstromfelder von drei Formentwürfen für ein Chemikalien-tanker, L/B = 4,7

Im Bild 8 sind die transversalen Nachstromfelder der drei Entwürfe gegenübergestellt. Es ist gut zu erkennen, dass der Kimmwirbel der Variante A sehr groß ist, der der Variante B (Pram-Hinterschiff) kaum erkennbar ist und dass die Variante C, die einen Kompromiss beider vorher untersuchten Varianten darstellt, einen mittelgroßen Kimmwirbel besitzt. Proportional dazu verhält sich die Kursstabilität der drei Entwürfe: A sehr gut, B absolut instabil, C erfüllt die IMO-Forderungen, aber auch nur mit einem HSVA-Hochleistungsrunder.

Entwurf	A	B	C
Ruder	Normal	Vergrößert	HSVA-Hochleistungsrunder
Energiegehalt des Kimmwirbels	Sehr groß	Sehr klein	Groß
Kurstetigkeit	Sehr gut	Instabil	Ausreichend
Leistungsbedarf	Hoch	Sehr niedrig	Mittel
Erreichbare Geschwindigkeit	14,7 kn	15,8 kn	15,4 kn

Tabelle 1: Modellversuchsergebnisse für drei Varianten eines Chemikalientankers, L/B = 4,7

Die in der Tabelle 1 wiedergegebenen erreichbaren Schiffsgeschwindigkeiten weisen auf erhebliche Unterschiede im Leistungsbedarf der drei untersuchten Entwürfe hin. Die erforderliche Leistung von A ist etwa 40% höher als die von B; C benötigt eine etwa 15% höhere Leistung als B. Ein Teil dieser Unterschiede ist auf den Energieverlust im jeweiligen Kimmwirbel zurückzuführen. Es muss aber erwähnt werden, dass von A nach B auch das Vorschiff optimiert wurde.

Der direkte Zusammenhang zwischen Energiegehalt des im Nachstromfeld nachweisbaren Kimmwirbels und der Kursstabilität ist zumindest für den gezeigten Fall eindeutig. Auch die physikalische Erklärung von Clarke (1997), dass der Kimmwirbel die hydrodynamische Masse des Hinterschiffes und damit die Kursstabilität beeinflusst ist nachvollziehbar.

Es macht also Sinn, die Kursstabilität durch Maßnahmen zu beeinflussen, die den Kimmwirbel verändern. Also: eine bessere Kursstabilität ist durch verstärkte Kimmwirbel möglich! Dazu muss nicht immer das gesamte Hinterschiff geändert werden.

8. Zur Genauigkeit von Nachstromfeldern

In den vorangestellten Abschnitten werden an verschiedenen Stellen berechnete und gemessene Nachstromfelder verwendet ohne auf die Qualität bzw. mögliche Ungenauigkeit einzugehen, die die gezogenen Schlussfolgerungen beeinflussen können. Dies soll hier nachgeholt werden.

Im Bild 9 ist ein Vergleich eines in der HSVA gemessenen mit einem in der HSVA gerechneten Nachstromfeld eines Tankers für den Modellmaßstab wiedergegeben. Die Übereinstimmung ist außerordentlich gut und eigentlich kann man mit dem gerechneten Feld mehr anfangen weil es feiner auflöst. Eine genaue Betrachtung zeigt aber deutliche Unterschiede in der sehr wichtigen Nachlaufdele in der 12 Uhr Position und in der Intensität des Nachlaufes im Kimmwirbel.

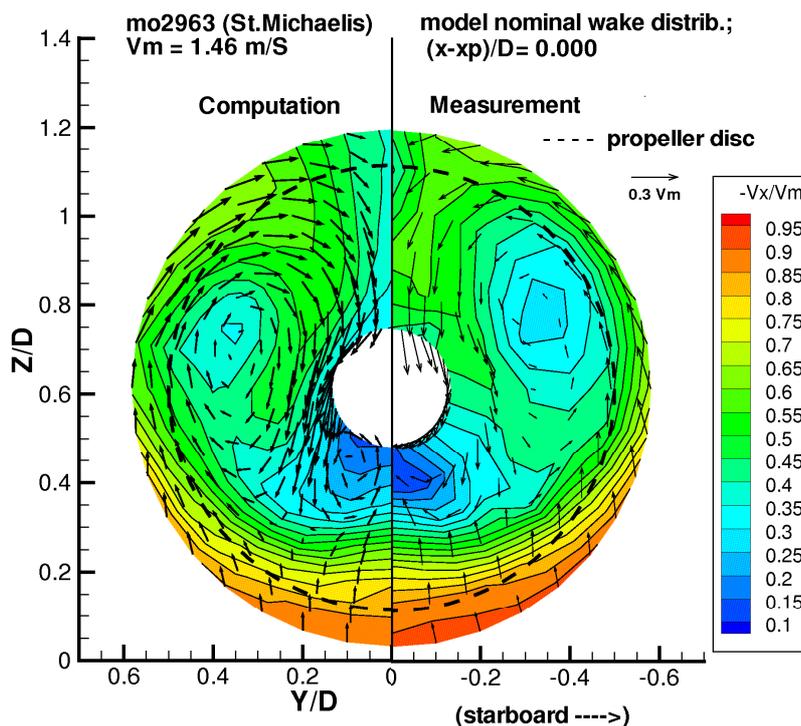


Bild 9 Vergleich eines gerechneten (links) mit einem gemessenen Nachstromfeld für einen Tanker im Modellmaßstab

Zunächst einige Bemerkungen zu berechneten Nachstromfeldern: Für die Berechnung eines Nachstromfeldes muss die gesamte Umströmung des Schiffes unter Berücksichtigung der Reibung berechnet werden, dazu werden heute so genannte RANS-solver verwendet, die kommerziell vertrieben werden. Das im Bild 9, linke Hälfte dargestellte Nachstromfeld wurde mit dem in der HSVA verwendeten RANS-code COMET mit etwa 3,5 Millionen Zellen berechnet. Für die Güte und Genauigkeit des berechneten Nachstromes ist aber nicht allein die Anzahl der verwendeten Zellen verantwortlich sondern viel mehr die Erfahrung beim Bau der Zellenstruktur und bei der Auswahl des Turbulenzmodells und der Anwendung der darin enthaltenen Stellschrauben. Die Berechnungsmethoden von Nachstromfeldern haben noch lange nicht die Güte eines physikalischen Modells erreicht, allerdings werden in einigen Forschungseinrichtung mit hoher Erfahrungsnutzung durchaus brauchbare Nachstromfelder berechnet. Im Gegensatz zur Messung des Nachstromfeldes in der Propellerebene des Schiffmodells steht aber nach der Berechnung die vollständige Beschreibung der Schiffsumströmung zur Verfügung, die zur Lösung vielfältiger Aufgabenstellungen benutzt werden kann.

Die Messung des Nachstromfeldes erfolgt normalerweise mit frei fahrendem Modell bei nur einer Geschwindigkeit und meistens nur bei einem Tiefgang in der Propellerebene. Heute werden Nachstromfelder fast ausschließlich dreidimensional gemessen, wozu mehrere 5-Loch-Sonden gleichzeitig auf verschiedenen Radien die Drücke messen, aus denen die 3 erforderlichen Geschwindigkeitskomponenten axial, tangential und radial bestimmt werden. Die Messung erfolgt auf mindestens 4 Radien, besser 6; in der HSVA in Schrittweiten von 10° bei normalen Einschraubern und 5° bei Zweischraubern. Zur Ermittlung von Einzelheiten ist auch eine noch feinere Auflösung in 2° Schritten üblich. Es ist günstig einen Messradius außerhalb des Propellerkreises zu haben. Für einen normalen Einschrauber werden also 5×37

Messwerte erfasst, was ausreichend ist, um ein Nachstromfeld daraus zu interpolieren. In manchen Versuchsanstalten werden die Nachstromfelder Backbord und Steuerbord gemittelt und so wiedergegeben. Von der HSVA erhält der Kunde ein Nachstromfeld mit zwei leicht unterschiedlichen Seiten, die als Maß für den Einbau und die Genauigkeit dienen können.

Die Anwendung von Laser-Technik zur kommerziellen Messung von Nachstromfeldern in Schleptanks hat sich aus Kostengründen nicht durchgesetzt.

Beim Vergleich von Nachstromfeldern aus verschiedenen Quellen sollte man als erstes die Schrittweite der Messungen vergleichen, denn Feinheiten im Nachstromfeld, wie z.B. die Spur von Wellenbockarmen, treten deutlich stärker hervor wenn das Nachstromfeld in kleinen Winkel-Intervallen gemessen wird. Ein Nachstromfeld mit 15° Schrittweite ist für eine Beurteilung der Güte der Wellenbockarme z.B. völlig ungeeignet, weil die ermittelte Spitze im Nachlauf ein Zufallsergebnis ist.

Die Wiederholgenauigkeit bei Nachstrommessungen ist meist von erstaunlicher Güte, das heißt aber nicht, dass die absolute Genauigkeit ebenso hoch ist. Für die Gesamtgenauigkeit sind Faktoren wie Qualität des Einbaus, Zustand der Messeinrichtung, Kalibrierung der Messsonden, Turbulenzzustand des Tankwassers, Wassertemperatur u. a. verantwortlich. Wenn man davon ausgeht, dass alles richtig und sorgfältig entsprechend dem technischen Stand der Versuchsanstalt gemacht wird, bleibt nur die Tankwassertemperatur als nicht korrigierbarer Einfluss übrig. Nachstrommessungen unter 10° Wassertemperatur zeigen deutlich höhere Nachlaufdellen als bei wärmerem Wasser gemessene. Bei Temperaturen unter 8° ist ein Nachstromfeld gewöhnlich nicht zu gebrauchen.

Häufig wird die Frage gestellt ob ein für eine bestimmte Geschwindigkeit gemessenes Nachstromfeld auch für eine etwas andere Geschwindigkeit gültig ist. Im Allgemeinen ist der Geschwindigkeitseinfluss bei Verdrängungsschiffen bis zu 10% Geschwindigkeitsänderung vernachlässigbar, man sollte jedoch in jedem Fall sorgfältig das Heckwellensystem (Froudesche Zahl) auf signifikante Änderungen überprüfen, denn die Heckwelle trägt Ihren Teil als Wellennachstrom zum Gesamtnachstrom bei. Besonders deutlich ist dieser Einfluss bei Froudeschen Zahlen um 0,5, wo schon eine geringe Änderung der Geschwindigkeit die gesamte Hinterschiffsumströmung verändern kann.

9. Zusammenfassung

- Nachstromfelder sind ein wichtiges Element zur Beurteilung der Güte der Schiffsumströmung.
- Für den optimalen Entwurf eines Propellers ist das aktuelle Nachstromfeld unbedingt erforderlich.
- Die Linien von Schiffen mit hoher Propeller-Leistungsdichte sollten nachstromgerecht entworfen werden.
- Aus dem Nachstromfeld kann man Rückschlüsse ziehen auf:
 - Widerstandsgüte
 - Leistungsbedarf
 - Druckimpulserregung
 - Kursstetigkeit
- Der Vergleich von Nachstromfeldern aus verschiedenen Quellen sollte mit großer Vorsicht vorgenommen werden

-Nachstrommessungen bei Tankwasser-Temperaturen unter 8° sind meistens nicht zu gebrauchen.

10. Danksagungen

Ich danke allen Kolleginnen und Kollegen in der HSVA, die mir bei der Erstellung dieses Berichtes geholfen haben. Insbesondere gilt mein Dank Herrn Christian Johannsen und Dr. Uwe Hollenbach, die das Manuskript gelesen haben und mit guten Vorschlägen zu seiner Verbesserung beigetragen haben.

11. Verwendete Literatur

Für die Erstellung der vorliegenden Arbeit wurde eine große Zahl von HSVA-Berichten durchgesehen und ausgewertet, diese Berichte werden im Einzelnen nicht genannt.

Chao, K.; Gatchell, S. (2006), „Advancements in Viscous Flow Computations for Ships“, HSVA News Wave 2006/1, Hamburg, 2006.

Clarke, D.; Horn, J. R. (1997), “The Effects of Trailing Vortices and Stern Design on Ship Manoeuvring”, Proceedings of the 6th International Marine Design Conference (IMDC 97), Newcastle 1997

Harvald, Sv. Aa. (1983), “Resistance and Propulsion of Ships”, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley and Sons, New York, 1983.

Henschke, W.; Braun, K. Th. (1957), „Schiffbautechnisches Handbuch“, Band 1, VEB Verlag Technik Berlin, 1957.

Johannsen, C. (2006), „HSVA Prediction Confirmed: Vortex Generator Fins Reduced the Vibration Excitation Level in Full Scale“

Mewis, F.; Urban, M. (2001), “ Hydrodynamische Aspekte sehr großer Containerschiffe“, Schiffbauforschung 40 (2001) 4, Rostock, 2001

Mewis, F.; Klug, H. (2004), „The Challenge of Very Large Container Ships - A Hydrodynamic View“, Proceedings PRADS 2004, Lübeck-Travemünde, 2004

Schneekluth, H. (1988), „Hydromechanik zum Schiffsentwurf“, Koehler Verlag, 1988