

Bild 16. Flügelverstellmomentenbeiwert  $K_{QH}$  unter Kavitationseinfluß

Tabelle 1. Eichkonstanten und Einflußfaktoren der verwendeten Torsionsmeßglieder

| Versuchsanlage                  | Schlepprinne | Kavitationstunnel |
|---------------------------------|--------------|-------------------|
| Torsionsmeßglied                | 002/09       | 010/14            |
| Eichfaktor $C_{QH} W$ [kpm/SkT] | .002         | .00723            |
| Einflußfaktoren $K_1$ [-]       | +.00275      | -.00225           |
| $K_2$ [-]                       | 0            | 0                 |
| Lage der DMS $r$ [m]            | +.0025       | +.0025            |

gungen den Einfluß der Kavitationszahl auf die Verstellmomentenbeiwerte enthält.

Man erkennt hier den Einfluß der am Flügel entstehenden Kavitationsblase. Sie bewirkt in der Konstruktionssteigung eine Auftriebsreduzierung auf der Saugseite des Propellers und zwar vorwiegend im Bereich vor der Drehachse des Flügels, so daß daraus gegenüber dem voll benetzten Flügel ein größeres steigungsreduzierendes (negatives) Flügelverstellmoment resultiert.

Bei der kleineren Propellersteigung lag bei den Versuchen durchweg Druckseitenkavitation vor. Die aus den Versuchsbedingungen resultierende Unterdruckbelastung der Druckseite des Flügels wird durch die Kavitationsblase gestört und führt fast im gesamten untersuchten Fortschrittsgradbereich zu einer Verringerung der absoluten Größe des Flügelverstellmomentes.

Hier wird die Kopplung an die Kavitationszahl, also die flächenhafte Ausdehnung der Kavitationsblase gut sichtbar. Ebenso wird deutlich, daß die Lage der Blase zur Verstellachse einen direkten Einfluß auf die Änderung des Flügelverstellmomentes gegenüber dem voll benetzten Flügelblatt ausübt.

Diese Vorgänge sind gegenwärtig rechnerisch nur näherungsweise erfaßbar, so daß auch künftig weiter auf Modellversuchsergebnisse zurückgegriffen werden muß.

#### Literatur

- [1] Bossor, G.: Untersuchungen über das hydrodynamische Flügelmoment an Schiffsverstellpropellern. Schiffbauforschung, Rostock 1 (1962) 2, S. 45—84
- [2] Bednarzik, R.: Methode zur Berechnung der hydrodynamischen Flügelverstellmomente von Verstellpropellern unter Berücksichtigung von Kavitationseinflüssen. Schiffbauforschung, Rostock 19 (1980) 1, S. 30—36.
- [3] Selke, W.: Messung von Flügelverstellmomenten mittels Torsionsmeßgliedern — Grundlagen —. SVA-Bericht-Nr. 1082 (1977), unveröffentlicht.
- [4] Selke, W.: Messung von Flügelverstellmomenten mittels Torsionsmeßgliedern — Anleitung zur Versuchsauswertung —. SVA-Bericht-Nr. 1083 (1977), unveröffentlicht.
- [5] Graupner, H.: Untersuchungen der hydrodynamischen Eigenschaften der Modellpropeller VP 4019 und VP 4021 in der Schlepprinne. SVA-Bericht-Nr. 1355 (1981), unveröffentlicht.
- [6] Selke, W., Graupner, H.: Messung der hydrodynamischen Flügelverstellmomente an den Propellern VP 4019 und VP 4021 im Kavitationstunnel, Meßstrecke  $\square 850$ . SVA-Bericht-Nr. 1424 (1983), unveröffentlicht.

## Untersuchungen der Umströmung eines Modells der „Serie 60“ mit $C_B = 0,60$

Dipl.-Ing. Friedrich Mewis und Dipl.-Ing. Hans-Jürgen Heinke, VEB Kombinat Schiffbau Rostock, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam

### 1. Einleitung

Im Ergebnis einer Umfrage hat das Widerstands-Komitee der 16. ITTC 1981 beschlossen [1], ein Gemeinschafts-Versuchsprogramm zur Messung der Modell-Widerstandskomponenten und Strömung durchzuführen, an dem sich insgesamt 27 Mitgliedsorganisationen, darunter auch das KSR, beteiligen. Untersucht werden vier Schiffsformen, die einen breiten Typenbereich umfassen:

1. Wigley's parabolischer Körper
2. Serie 60,  $C_B = 0,60$
3. HVA-Tanker
4. Athena, Hochgeschwindigkeitsschiff mit Spiegelheck

In der DDR wurde das in der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam vorhandene Modell Nr. 675 der „Serie 60“,  $C_B = 0,60$ , untersucht. Dieses Modell wurde 1981 nach Helsinki verliehen, wo ebenfalls Untersuchungen damit vorgenommen wurden. Untersuchungen des „Serie 60“-Modells wurden von insgesamt 9 Institutionen in 7 Ländern durchgeführt.

Das Ziel des Gemeinschafts-Programms besteht darin, eine rechnergerechte Datenbasis zu schaffen, die bequem für Schiffshydrodynamiker anwendbar ist. Außerdem sollen durch Untersuchungen gleicher Modelle in verschiedenen Institutionen Vergleichsdaten gesammelt werden, die eine Einschätzung der Güte der Versuchsergebnisse erlauben. Die gesamten Arbeitsergebnisse werden 1984 im Rahmen der 17. ITTC veröffentlicht.

Die folgenden Messungen sollten insgesamt für jeden Schiffstyp vorgenommen werden:

- Gesamtwiderstand
- Wellenprofile und -spektren
- Grenzschicht-Querschnitte
- Nachlaufmessungen
- Schiffskörperdrücke
- Schiffskörper-Schubspannungen

Die Richtlinien über die Versuchsbedingungen, den erforderlichen Datenumfang und die einheitlichen Analyse- und Berichtsverfahren wurden den Teilnehmern zugesandt.

Das hydrodynamische Flügelverstellmoment ergibt sich aus folgender Beziehung:

$Q_H = Q_{HW_{me\ddot{a}}}$  – Fliehkraftmoment – Einflußgrößen aus Drehmoment, Schub und Fliehkraft

$$Q_H = Q_{HW} \cdot C_{QHW} - Q_{HL} - K_1 \frac{Q_P}{Z} \frac{C_{QP}}{0,35 D} \cdot (0,35 D \cdot r) - K_2 \frac{T_P}{Z} C_{TP}(0,35 D \cdot r) - K_3 \cdot 2 \pi^2 n^2 \cdot 0,7 R \cdot M_{F1} \quad [Nm] \quad (22)$$

$Q_{HW}, Q_P, T_P$  [Skt]

$M_{F1}$  = Flügelmasse [kg]

Das Fliehkraftmoment  $Q_{HL}$  wird experimentell durch Versuche auf dem Luftmeßstand für unterschiedliche Flügelsteigungen ermittelt. Zur rechnerischen Weiterverarbeitung wird der Beiwert

$$C_{QHL} = \frac{Q_{HL}}{n^2} [Nm/s^2] \quad (23)$$

gebildet, so daß dann entsprechend der Versuchsdrhzahl die Korrektur vorgenommen werden kann.

Das Vorzeichen des hydrodynamischen Flügelverstellmomentes ist an seine Wirkungsrichtung gekoppelt.

Es wurde die generelle Festlegung getroffen, daß ein steigungsvergrößernd wirkendes Flügelverstellmoment als positiv definiert wurde. Rechts- und Linkspropeller haben ein entgegengesetztes Vorzeichen. Darauf aufbauend ergeben sich die Vorzeichen für das Verstellmoment in Luft und die Einflußfaktoren. Letztere haben für die Drehmomentenwirkrichtung für ein und dasselbe Meßglied also unterschiedliche Vorzeichen, während sie beim Schub gleich sind, da dieser immer in gleicher Richtung positiv wirkt.

Für die mathematische Behandlung und Berechnung des Flügelverstellmomentenbeiwertes ist es daher notwendig auch das Drehmoment und den Schub vorzeichenbehaftet einzugeben. Hier wurden die allgemein üblichen Definitionen gewählt, wonach ein der Drehrichtung entgegenwirkendes Drehmoment und eine in Fortschrittsrichtung wirkende Kraft (Schub) als positiv bezeichnet werden.

Mit diesen Festlegungen kann in einfacher Form nach Formel (22) für  $Q_H$  die Berechnung durchgeführt werden.

Durch eine genaue Auswahl der HL-DMS, eine exakte Positionierung derselben und eine langerprobte Klebtechnologie ist es gelungen, die Einflußfaktoren  $K_1$  und  $K_2$  sehr klein zu halten, so daß sich die Korrekturen aus Drehmoment und Schub kaum bemerkbar machen. Der Einflußfaktor  $K_3$  war bisher in allen Fällen gleich Null. Erheblichen Einfluß auf den Verlauf der Beiwertkurven  $K_{QH}$  hat hingegen das Fliehkraftverstellmoment. Es hat für eine bestimmte Flügelsteigung einen fixen positiven oder negativen Wert, während das in Wasser gemessene hydrodynamische Flügelverstellmoment fortschrittsgradabhängig von positiven zu negativen Werten wechseln kann. Der charakteristische Verlauf der Beiwertkurve  $K_{QH}$  kann daher nicht allein aus der Messung von  $Q_{HW}$  abgeleitet werden, ohne zumindest  $Q_{HL}$  zu berücksichtigen.

### Beispiel

Zur Veranschaulichung möge ein ausgesuchtes Beispiel eines Verstellpropellers dienen.

Die Flügelprojektion in Konstruktionssteigung ist in Bild 13 dargestellt.

Tabelle 1 enthält die Übersicht über Eichkonstanten und Einflußfaktoren der Meßglieder.

In Bild 14 ist der Beiwert des Eigenverstellmomentes in Abhängigkeit vom Steigungswinkel dargestellt.

Bild 15 zeigt die Versuchsergebnisse aus der Schlepprinne und dem Kavitationstunnel im kavitationsfreien Zustand des Propellers, während Bild 16 für zwei ausgesuchte Stei-

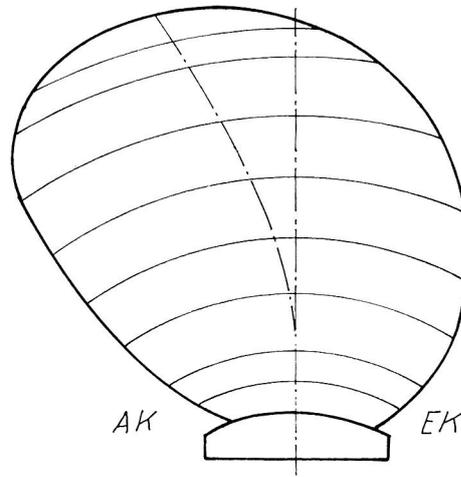


Bild 13. Flügel VP 4019

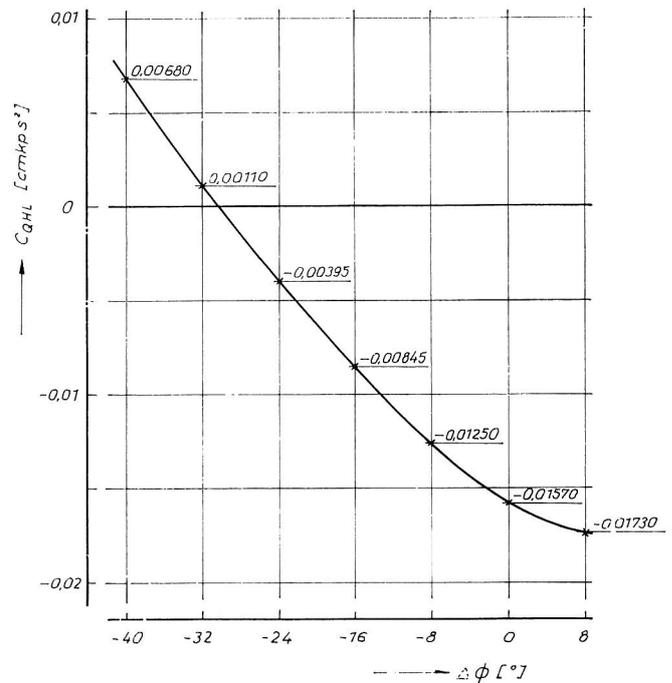


Bild 14. Beiwert der Eigenverstellmomente  $C_{QHL} = f(\Delta\phi)$  VP 4019

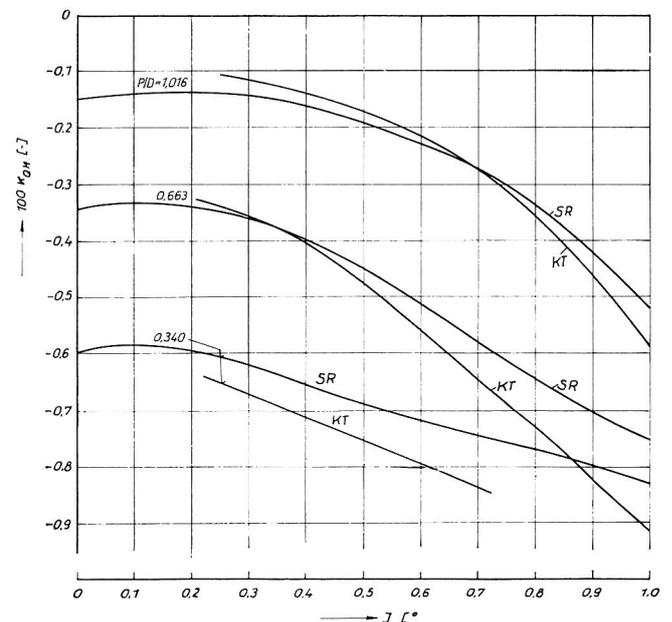


Bild 15. Flügelverstellmomentenbeiwert  $K_{QH}$  nach Messung in Schlepprinne und Kavitationstunnel

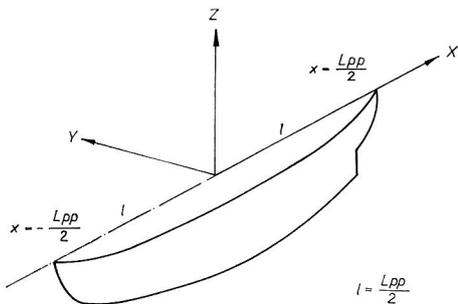


Bild 1. Koordinatensystem der ITTC

Alle Teilnehmer machen Gesamtwiderstandsmessungen mit ihrem Modell, gewöhnlich werden 2 oder 3 weitere Meßarten von jedem Teilnehmer ausgeführt.

Im Folgenden werden in gestraffter Form die Ergebnisse vorgestellt, die in der SVA Potsdam mit dem Modell Nr. 675 der „Serie 60“,  $C_B = 0,60$ , erzielt wurden. Eine umfassende Ergebnisdarstellung ist in [2] gegeben. Bei den Versuchsergebnissen wird zum geringen Teil auf ältere, vorhandene Meßergebnisse zurückgegriffen, die von Vollheim 1978 in [3] veröffentlicht wurden.

## 2. Beschreibung des Schiffmodells

Das verwendete Modell Nr. 675 wurde nach den Linien der „Serie 60“ gebaut, die von Todd [4] veröffentlicht worden sind. Das Modell hat die folgenden Hauptabmessungen

|                          |                          |          |       |
|--------------------------|--------------------------|----------|-------|
| $L_{pp}$                 | = 5,000 m                | $L_{pp}$ | 7,50  |
| $L_{WL}$                 | = 5,084 m                | $B$      | 1,00  |
| $B$                      | = 0,6666 m               | $T$      | 0,40  |
| $T$                      | = 0,2666 m               | $\nabla$ | 1,8 t |
| $S$                      | = 4,3125 m <sup>2</sup>  |          |       |
| $\nabla$                 | = 0,53253 m <sup>3</sup> |          |       |
| $C_{Bpp}$                | = 0,5993                 |          |       |
| $C_M$                    | = 0,977                  |          |       |
| $C_{Ppp}$                | = 0,6134                 |          |       |
| $10^3 \nabla / L_{pp}^3$ | = 4,2602                 |          |       |
| $L_{pp}/B$               | = 7,50                   |          |       |
| $B/T$                    | = 2,50                   |          |       |

Das Modell ist aus Holz gebaut, die Oberfläche ist lackiert. Als Turbulenzerreger sind Stifte von 2,5 mm Durchmesser und 3,2 mm Höhe im Abstand von 25 mm auf Spant 19 angebracht. Das Modell wurde ohne Anhänge untersucht.

Von der ITTC wird das im Bild 1 dargestellte Koordinatensystem vorgeschrieben.

## 3. Versuchsprogramm

Die Modellversuche wurden im Gegensatz zu der in der SVA üblichen Praxis entsprechend den Vorschriften der ITTC mit fest eingespanntem Modell vorgenommen. Die Messungen des Gesamtwiderstandes und des Wellenprofils, die gleichzeitig erfolgten, wurden zusätzlich mit dem in sonst üblicher Weise frei trimmenden und tauchenden Modell durchgeführt. Ein dritter Zustand, Modell nur frei tauchend, konnte nicht realisiert werden, da kein geeignetes Meßgerät zur Verfügung stand. Die Druckverteilung auf der Modelloberfläche, die von Vollheim [3] übernommen wurde, war mit frei trimmendem und tauchendem Modell gemessen worden.

Das folgende Versuchsprogramm war zu erfüllen:

|                   |                                       |
|-------------------|---------------------------------------|
| Gesamtwiderstand  | Modell frei                           |
| und Wellenprofile | Modell frei trimmend und tauchend     |
|                   | $F_n = 0,22; 0,25; 0,28; 0,30; 0,32;$ |
|                   | $0,35$                                |
| Grenzschicht-     | Spt. 10; 5; 2; 0; -1; -2              |
| querschnitte      | Modell fest                           |
| (dreidimensional) | $F_n = 0,22$                          |

Nachlaufmessungen Querschnitt 2 m hinter AP

Modell fest

$F_n = 0,22$

Schiffskörperdrücke Modell frei trimmend und tauchend

$F_n = 0,22$

## 4. Ergebnisse

### 4.1. Widerstandsmessungen

Die Messungen des Gesamtwiderstandes sind in zweierlei Hinsicht von Interesse, erstens wird der Einfluß des Freiheitsgrades des Modells ermittelt – Modell frei und Modell fest eingespannt – und zweitens dienen die Meßergebnisse als Basis für die Beurteilung der aus den Wellenprofilmessungen ermittelten Wellenwiderstandsbeiwerte.

Die Widerstandsmessungen erfolgten beim frei trimmenden und tauchenden Modell mit der normalen Widerstands-Pendelwaage der SVA und beim fest eingespannten Modell mit der Schrägschleppanlage 1981. Die Übereinstimmung beider Meßsysteme ist gegeben.

Bild 2 zeigt die ermittelten Widerstandsbeiwerte in Abhängigkeit von der Froudezahl. Für die Berechnung der Restwiderstandsbeiwerte wurde wie bei der „Serie 60“ die veraltete Schoenherr-Reibungslinie verwendet. Alle Beiwerte sind mit der benetzten Oberfläche  $S = 4,3125$  m<sup>2</sup> des Modells in Ruhelage gebildet worden.

Wie Bild 2 zeigt, weisen die Widerstandsbeiwerte erhebliche Unterschiede zwischen den beiden untersuchten Ein-

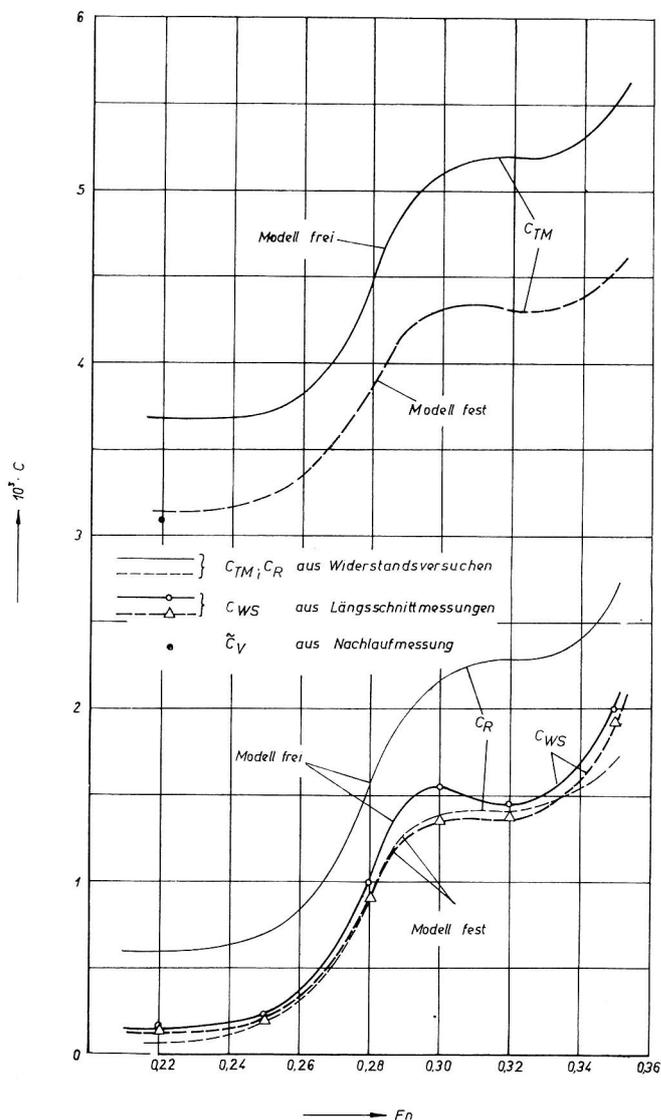


Bild 2. Widerstandsbeiwerte des Modells,  $C_B = 0,60$  (Reibungswiderstand nach Schoenherr)

spannungsvarianten auf. Die Gesamtwiderstandsbeiwerte  $C_{TM}$  des freien Modells sind um etwa 20% höher als die des fest eingespannten. Die Ursachen für diesen recht großen Unterschied liegen offensichtlich in der Verhinderung des Eintauchens durch die feste Einspannung, wodurch sowohl die wirklich benetzte Modelloberfläche und damit der Reibungswiderstand als auch die effektive Verdrängung und damit der Restwiderstand verkleinert werden.

#### 4.2. Messung des Wellenprofils

Der Wellenwiderstandsanteil am Gesamtwiderstand läßt sich durch Messungen des vom Modell erzeugten Wellenprofils und anschließender Analyse ermitteln. Dazu ist es notwendig, entweder in mehreren Querschnitten hinter dem fahrenden Modell das Wellenprofil mit einer mitfahrenden Wellensonde aufzumessen (Querschnittsverfahren) oder mit einer stationären Sonde das Wellenprofil des vorbeifahrenden Schiffsmodells in einem Schnitt längs zur Fortbewegungsrichtung aufzunehmen (Längsschnittverfahren). Für die durchzuführenden Messungen wurde wegen seiner Einfachheit das Längsschnittverfahren gewählt. Die Berechnung des Wellenwiderstandes erfolgt nach einem von Eggers [5] vorgeschlagenen Verfahren, das die Berechnung des Wellenwiderstandes aus nur einem Längsschnitt des Wellenprofils erlaubt, vorausgesetzt der Schnitt liegt auf  $1/6$  der Schlepprinnenbreite vom Modell entfernt, in diesem Fall also 1,50 m von Mitte Modell.

Die auf diese Weise ermittelten Wellenwiderstandsbeiwerte  $C_{WS}$  lassen erwartungsgemäß die gleiche Abhängigkeit von der Froudezahl erkennen wie die Restwiderstandsbeiwerte  $C_R$ .

Wie die  $C_{WS}$ -Kurven in Bild 2 zeigen, sind die Unterschiede zwischen fest eingespanntem und freiem Modell jedoch wesentlich geringer als beim Restwiderstand. Aber auch hier hat das freie Modell eindeutig höhere Widerstandsbeiwerte.

Daß die Wellenwiderstandsbeiwerte des fest eingespannten Modells z. T. etwas größer sind als der gesamte Restwiderstandsbeiwert läßt sich daraus erklären, daß die absolute Größe des  $C_R$ -Wertes von der willkürlichen Wahl der Reibungslinie abhängig ist. Bei Verwendung der neueren ITTC-1957-Reibungslinie wären die  $C_R$ -Werte etwas höher.

#### 4.3. Grenzschichtmessungen

Messungen der dreidimensionalen Grenzschicht wurden zum ersten Mal in der SVA durchgeführt. Zur Messung der Geschwindigkeitskomponenten werden 5-Loch-Kugelsonden verwendet, die in einem Rechen von 5 Sonden zu einem Meßgerät gekoppelt sind. Der Aufwand zur Ermittlung der dreidimensionalen Grenzschichten ist hoch. Zur Erstellung des Geschwindigkeitsfeldes einer Meßebeine ist mit der verwendeten Meßvorrichtung etwa ein Versuchstag erforderlich.

Die Messungen wurden mit fest eingespanntem Modell bei der Froudezahl  $Fn = 0,22$  in insgesamt 6 Spantebenen durchgeführt, wovon 2 hinter dem Modell im Nachstromgebiet liegen.

Die Bilder 3 bis 8 zeigen die ermittelten Grenzschichtprofile mit dem Richtungsfeld der Geschwindigkeitskomponenten. Die durchgezogenen Linien sind die Isotachen der axialen Geschwindigkeitskomponente  $V_x$ . Die Linie  $V_x/V = 0,99$  markiert den Grenzschichttrand. Die dimensionslosen Geschwindigkeitskomponenten  $V_y/V$  und  $V_z/V$  sind in der Form eines Vektorfeldes als resultierende Geschwindigkeit  $V_{yz}/V$  dargestellt.

Betrachtet man den Verlauf der Grenzschichtentwicklung der axialen Geschwindigkeitskomponente am Modell, so zeigen die Ergebnisse, daß die Strömung in den Meßebenen an den Spanten 10 und 5 anliegt, die Grenzschichtdicke verdoppelt sich jedoch in diesem Bereich von ca. 30 mm auf 60 mm bei Spt. 5. Zwischen Spt. 5 und 2 deformiert sich die Grenzschicht, was offenbar auf Ablösung der Strömung zurückzuführen ist. Die aufgemessenen Isotachenfelder der Spante 0, -1 und -2 bestätigen diese Vermutung, das

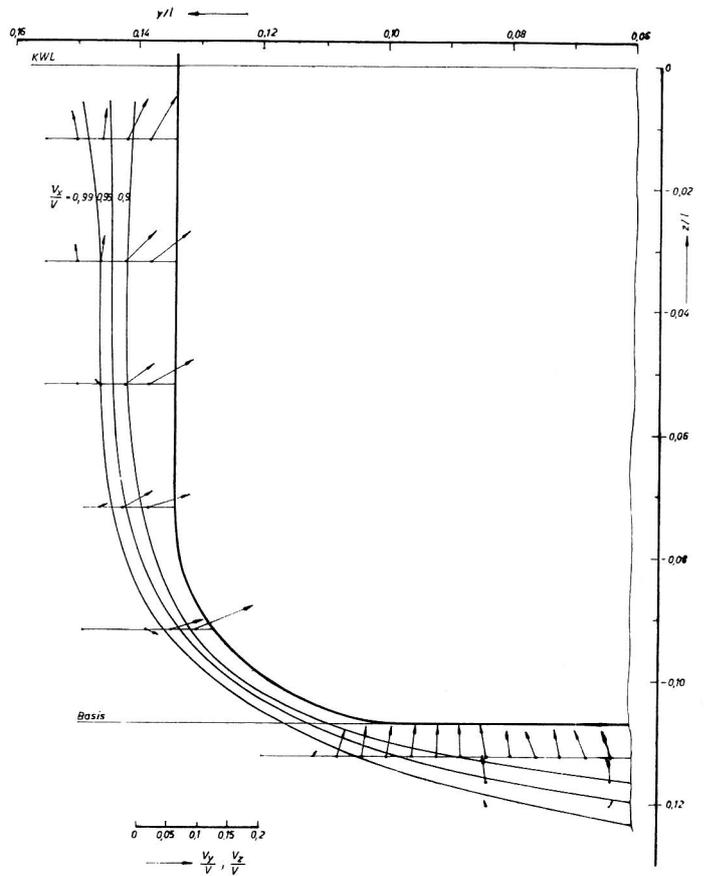


Bild 3. Geschwindigkeitsfeld in der Grenzschicht am Spant 10,  $Fn = 0,22$

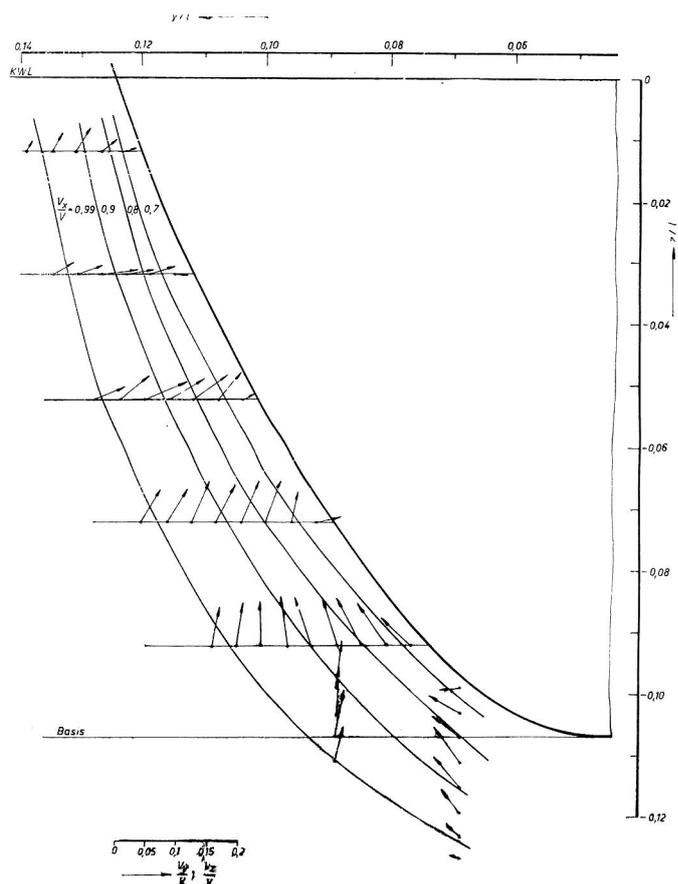


Bild 4. Geschwindigkeitsfeld in der Grenzschicht am Spant 5,  $Fn = 0,22$

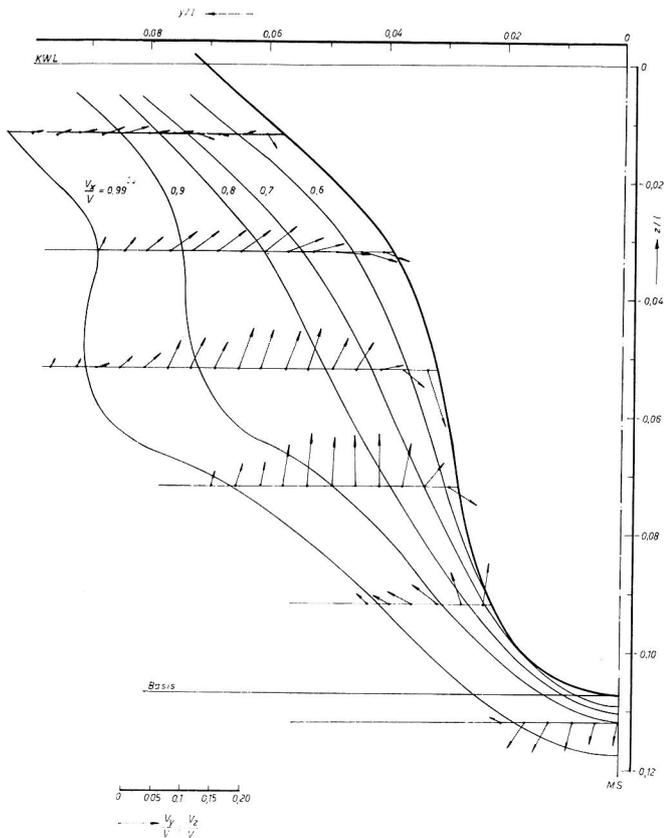


Bild 5. Geschwindigkeitsfeld in der Grenzschicht am Spant 2,  $Fn = 0,22$

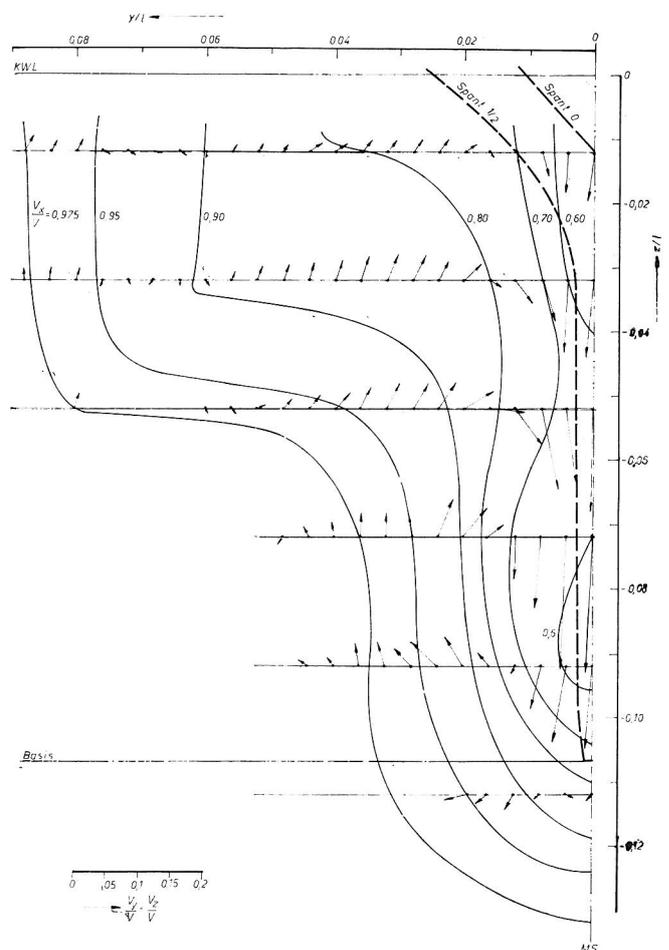


Bild 7. Geschwindigkeitsfeld im Nachstrom 0,25 m hinter AP (Spant -1),  $Fn = 0,22$

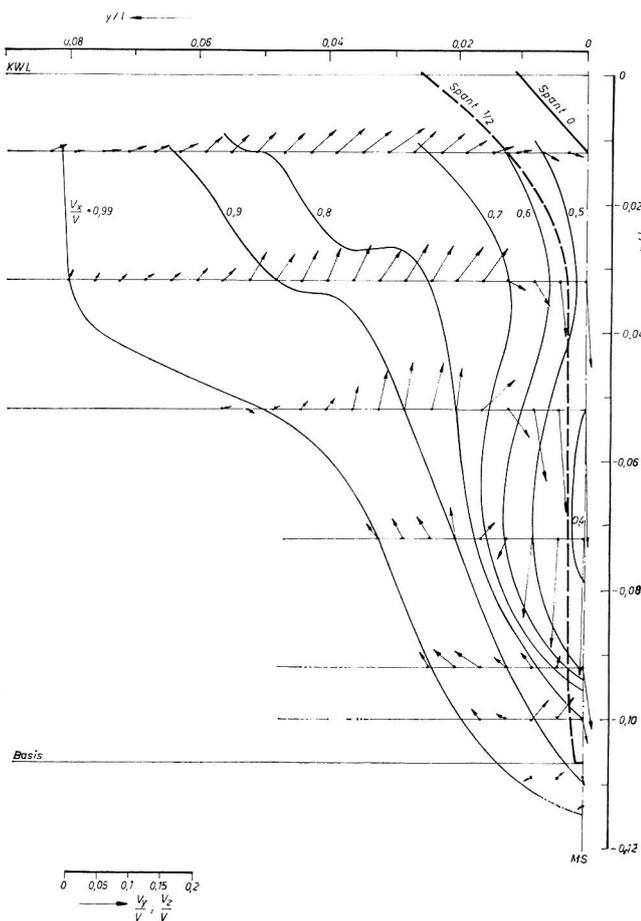


Bild 6. Geschwindigkeitsfeld in der Grenzschicht am Spant 0,  $Fn = 0,22$

Gebiet der abgelösten Strömung fließt nach hinten ab. Die Geschwindigkeitsvektoren  $V_{yz}/V$ , die in den Diagrammen meßpunktweise in Richtung und Betrag eingezeichnet sind, liefern interessante zusätzliche Informationen zur Strömungsbeurteilung. Am Spant 10 sind die Geschwindigkeitsvektoren in Wandnähe zur Wand gerichtet, ansonsten treten keine Besonderheiten auf. Am Spant 5 deutet sich bereits eine stärkere nach oben und innen gerichtete Strömung an, die auf Spant 2 als Ablösegebiet mit einer geringen aber eindeutigen Verwirbelung zu sehen ist. In der Meßebeine des Spantes 0 ist dieses Wirbelgebiet in ausgeprägter Form vorhanden; es wird fast unverändert auch in den Meßebenen hinter dem Modell nachgewiesen. Besonders fallen in diesen Bildern die in der Mittschiffsebene nach unten gerichteten verhältnismäßig großen Geschwindigkeitskomponenten auf, die in allen drei hinteren Meßebenen vorhanden sind, und nur aus der Sekundärströmung der abgelösten Wirbelfelder zu erklären sind.

#### 4.4. Nachlaufmessungen

Für die Bestimmung des Nachlaufwiderstandsbeiwertes sind Messungen des Gesamtdruckes und des statischen Druckes in einer Meßebeine hinter dem Modell erforderlich. Entsprechend dem ITTC-Versuchsprogramm waren diese Messungen in der Meßebeine 2 m hinter AP des Modells für die Froudezahl  $Fn = 0,22$  vorzunehmen. Die Nachlaufmessungen sind außerordentlich aufwendig an Versuchszeit. Für die Messung des vorliegenden Nachlaufgebietes wurden zwei Versuchstage benötigt. Die Messung erfolgte in 12 Meßlinien, es wurden insgesamt 480 Meßpunkte erfaßt. Bild 9 zeigt die mit dem Gesamtdruck der ungestörten Anströmung dimensionslos gemachten Meßwerte der örtlichen Gesamtdrucke  $p_{ges}/p_{ges\infty}$  aller aufgenommenen Meßlinien. Während der Versuche wurde eine starke

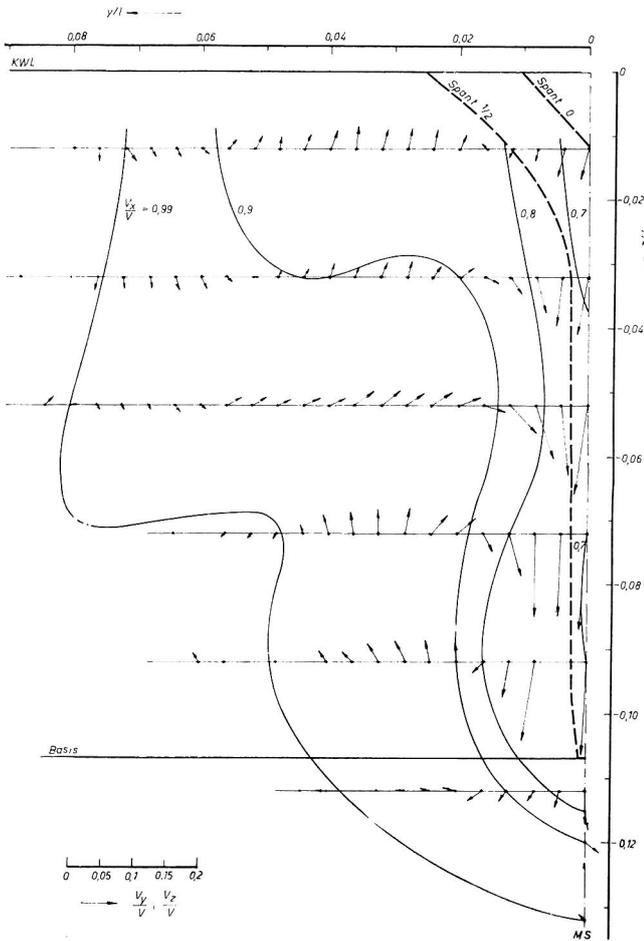


Bild 8. Geschwindigkeitsfeld im Nachstrom 0,50 m hinter AP (Spant —2),  $Fn = 0,22$

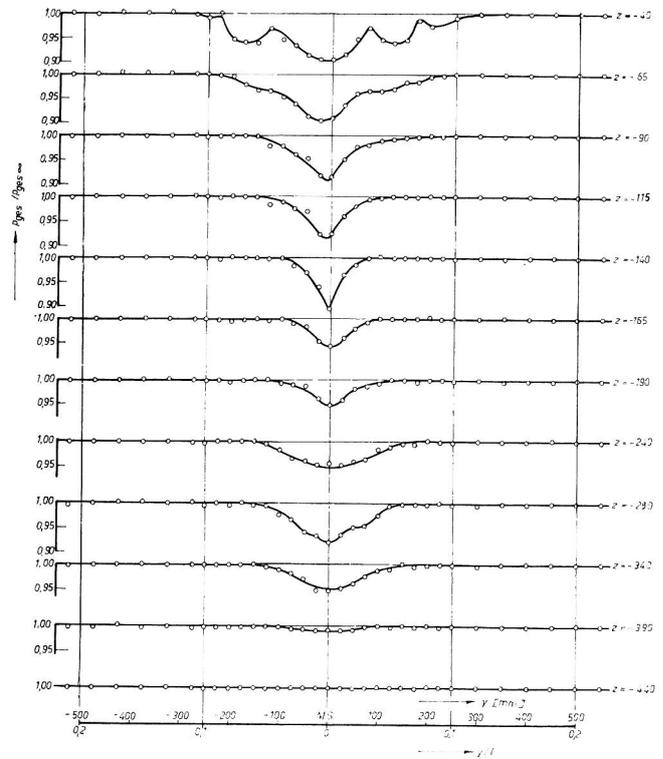


Bild 9. Dimensionslos dargestellte Meßwerte des Gesamtdruckes in den untersuchten Wassertiefen im Strömungsnachlauf 2 m hinter AP,  $Fn = 0,22$

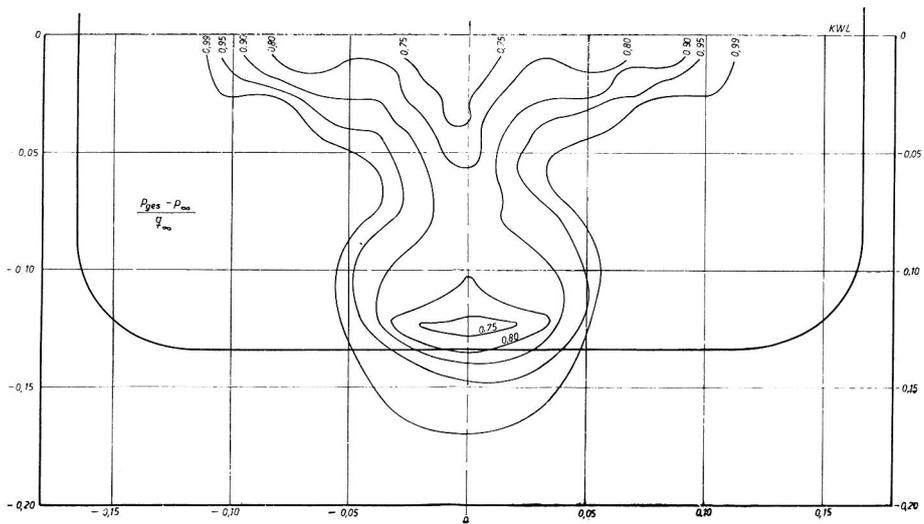


Bild 10. Linien konstanten Gesamtdruckes im Strömungsnachlauf 2 m hinter AP,  $Fn = 0,22$

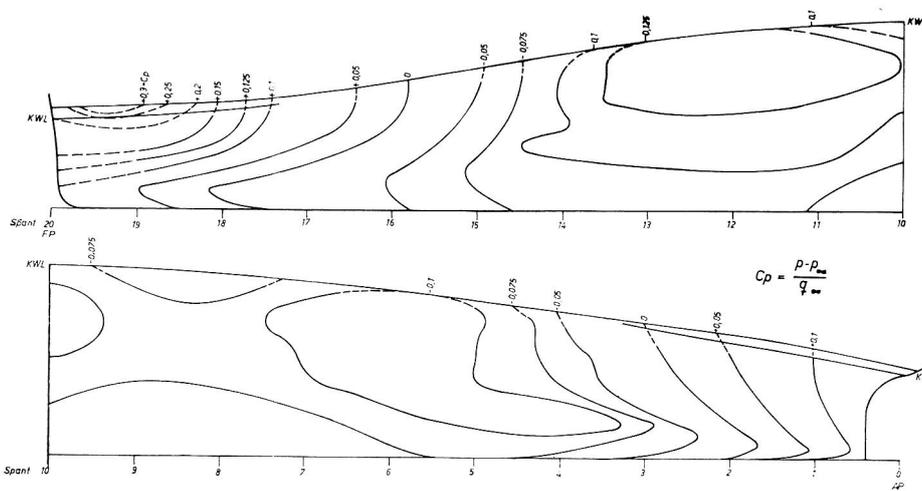
Schwankung der Meßwerte im Bereich des Nachlaufgebietes beobachtet, die auf die bei den Grenzschichtmessungen nachgewiesene Strömungsablösung zurückzuführen ist.

Zur bildlichen Darstellung des Druckfeldes eignet sich gut die Auftragung von dimensionslosen Isobaren der Art  $(p_{ges} - p_{\infty}) / (\rho g h)$ , die im Bild 10 wiedergegeben ist. Deutlich treten in dieser Darstellung die schon bei den Grenzschichtmessungen beobachteten Gebiete erhöhten Mitstromes auf. In der Tiefe des Schiffsbodens wird ein Gebiet erhöhten Nachlaufes ermittelt, das auf den Mitstrom der Grenzschicht des Schiffsbodens zurückzuführen ist.

Die Auswertung der Messungen des statischen Druckes ist schwierig, da die Größe der ermittelten Druckdifferenzen zum statischen Druck der ungestörten Strömung zum größten Teil innerhalb der vorhandenen Meßgenauigkeit von  $\pm 2$  mm Wassersäule liegen.

Auf eine Wiedergabe dieser Meßergebnisse wird daher verzichtet. Der statische Druck kann in erster Näherung als konstant in der Meßebeane angesehen werden; für die Berechnung des Nachlaufwiderstandsbeiwertes  $\tilde{C}_V$  werden allerdings die örtlichen Meßwerte des statischen Druckes verwendet. Der Beiwert des Nachlaufwiderstandes  $\tilde{C}_V$  wird

Bild 11. Isobaren auf der Modelloberfläche bei  $Fn = 0,22$  nach Vollheim [3]



nach Vollheim [6] durch zweifache Integration der ermittelten Druckdifferenzen berechnet.

Das vorliegende Nachlauffeld ergibt den Wert  $\tilde{C}_V = 3,092 \cdot 10^{-3}$ . Dieser Meßpunkt ist zur Veranschaulichung der Größe in das Bild 2 eingezeichnet. Wir sehen, daß dieser Zahlenwert etwas kleiner ist als der Gesamtwiderstandsbeiwert. Die Addition des Nachlaufwiderstandsbeiwertes und des Wellenwiderstandsbeiwertes ergibt etwa den Gesamtwiderstandsbeiwert.

Dieses Ergebnis deutet darauf hin, daß mit dem angewendeten Meß- und Auswertverfahren trotz der notwendigen vereinfachenden Annahmen zuverlässige Ergebnisse erzielt werden.

#### 4.5. Druckmessungen an der Modelloberfläche

Da für das Modell Nr. 675 bereits Ergebnisse von Druckmessungen an der Modelloberfläche vorlagen und erneute Messungen mit einem großen Aufwand verbunden gewesen wären, wurde auf die vorhandenen Ergebnisse zurückgegriffen, die von Vollheim in [3] veröffentlicht worden sind.

Die Ergebnisse stützen sich auf die Messungen an 111 Druckmeßstellen, die auf der Modelloberfläche auf drei Vorschiffspannten und elf Hinterschiffspannten so angeordnet waren, daß die jeweilige Spantlänge in bis zu 10 äquidistante Strecken unterteilt war.

Aus den Meßwerten wurden die dimensionslosen Druckbeiwerte  $C_p = (p - p_\infty)/q_\infty$  errechnet und über den abgewinkelten Spantlängen aufgetragen. Die auf diese Weise ermittelten Isobaren sind im Bild 11 dargestellt. Die Druckbeiwerte an der Wasseroberfläche ergeben sich aus der gemessenen Wellenhöhe zu  $C_p = (2 \rho \xi)/V^2$ .

Durch Integration der Druckverteilung über der in die Spantebene projizierten benetzten Oberfläche erhält man getrennt die Druckkräfte auf das Vor- und Hinterschiff, die addiert den Druckwiderstand des Schiffes ergeben. Die aus diesem Druckwiderstand gebildeten Kraftbeiwerte können mit dem Restwiderstandsbeiwert verglichen werden. Für die Froudezahl  $Fn = 0,22$  haben die Beiwerte die folgenden Zahlenwerte [3]:

Kraftbeiwert des Vorschiffes:  $0,10 \cdot 10^{-3}$   
 Kraftbeiwert des Hinterschiffes:  $-0,50 \cdot 10^{-3}$   
 Kraftbeiwert des Gesamtschiffes:  $0,60 \cdot 10^{-3}$   
 Restwiderstandsbeiwert:  $0,596 \cdot 10^{-3}$

Die sehr gute Übereinstimmung des Kraftbeiwertes und des Restwiderstandsbeiwertes ist sicherlich zufällig. Sie deutet jedoch darauf hin, daß mit dieser Methode brauchbare Ergebnisse erzielt werden können.

#### 5. Zusammenfassung

Im Rahmen eines Gemeinschafts-Versuchsprogramms des Widerstands-Komitees der 16. ITTC zur Messung von

Tabelle 1. Widerstandsbeiwerte für  $Fn = 0,22$

| Beiwert                   | Versuchsart                        | $10^3 \times$ Beiwert |             |
|---------------------------|------------------------------------|-----------------------|-------------|
|                           |                                    | Modell frei           | Modell fest |
| $C_{TM}$                  | Widerstand                         | 3,682                 | 3,152       |
| $C_{FM}$                  | (Schoenherr)                       | 3,086                 | 3,086       |
| $C_R = (C_{TM} - C_{FM})$ | Widerstand                         | 0,596                 | 0,066       |
| $C_{WS}$                  | Wellenprofil                       | 0,158                 | 0,127       |
| $\tilde{C}_V$             | Nachlaufmessung                    | —                     | 3,092       |
| $C_{PW}$                  | Druckmessungen an Modelloberfläche | 0,60                  | —           |

Widerstandsanteilen sind in der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam umfangreiche Modellversuche zur Untersuchung der Umströmung eines Modells der „Serie 60“ mit  $C_B = 0,60$  durchgeführt worden. Die Bestimmung der Widerstandsanteile aus den Meßergebnissen führt zu zufriedenstellenden Ergebnissen. Um einen Gesamtüberblick über die Versuchsergebnisse zu geben, sind in Tabelle 1 für die Froudezahl  $Fn = 0,22$  noch einmal alle ermittelten Widerstandsbeiwerte zusammengestellt. Über die Beziehung zueinander ist in den entsprechenden Abschnitten diskutiert worden.

Die erstmals durchgeführten dreidimensionalen Messungen der Grenzschichtprofile liefern wertvolle zusätzliche Informationen über die Verwirbelung der Grenzschichtströmung. Allerdings ist ganz besonders bei diesen Messungen der Arbeitsaufwand für die Messung und Auswertung so groß, daß eine routinemäßige Anwendung mit dem vorhandenen Meßsystem noch nicht erfolgen kann. An der Verbesserung wird zur Zeit gearbeitet.

#### 6. Zeichenerklärung

|                                             |                                        |                   |
|---------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------|
| $A_M$                                       | Hauptspantfläche                       | [m <sup>2</sup> ] |
| $B$                                         | Schiffsbreite                          | [m]               |
| $C_B = \frac{\nabla}{L_{pp} B T}$           | Blockkoeffizient                       | —                 |
| $C_{FM} = \frac{R_F}{\frac{\rho}{2} V^2 S}$ | Reibungswiderstandsbeiwert des Modells | —                 |
| $C_M = \frac{A_M}{B T}$                     | Koeffizient der Hauptspantfläche       | —                 |
| $C_P = \frac{p - p_\infty}{q_\infty}$       | Druckbeiwert                           | —                 |
| $C_{ppp} = \frac{C_B}{C_M}$                 | prismatischer Koeffizient              | —                 |
| $C_{PW}$                                    | Druckkraftbeiwert                      | —                 |
| $C_R = \frac{R_R}{\frac{\rho}{2} V^2 S}$    | Restwiderstandsbeiwert                 | —                 |

|                                                |                                             |      |                 |                                                |                      |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------|------|-----------------|------------------------------------------------|----------------------|
| $C_{TM} = \frac{R_{TM}}{\frac{\rho}{2} V^2 S}$ | Gesamtwiderstandsbeiwert des Modells        | —    | S               | benetzte Oberfläche                            | [m <sup>2</sup> ]    |
| $\tilde{C}_V$                                  | Reibungswiderstandsbeiwert des Nachlaufes   | —    | T               | Tiefgang                                       | [m]                  |
| $C_{WS} = \frac{R_W}{\frac{\rho}{2} V^2 S}$    | Wellenwiderstandsbeiwert                    | —    | V               | Modellgeschwindigkeit                          | [m/s]                |
| $F_n = \frac{V}{\sqrt{g L_{pp}}}$              | Froudezahl                                  | —    | V <sub>x</sub>  | Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung       | [m/s]                |
| $\frac{L_{pp}}{L_{WL}}$                        | Länge zwischen den Loten                    | [m]  | V <sub>y</sub>  | Geschwindigkeitskomponente in y-Richtung       | [m/s]                |
| $l = \frac{L_{pp}}{2}$                         | Bezugslänge des ITTC-Koordinatensystems     | [m]  | V <sub>z</sub>  | Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung       | [m/s]                |
| p                                              | statischer Druck auf der Schiffsoberfläche  | [Pa] | V <sub>yz</sub> | resultierende Geschwindigkeit in der y-z-Ebene | [m/s]                |
| p <sub>∞</sub>                                 | statischer Druck der ungestörten Anströmung | [Pa] | x, y, z         | Koordinaten                                    |                      |
| p <sub>ges</sub>                               | Gesamtdruck                                 | [Pa] | $\rho$          | Dichte des Wassers                             | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| p <sub>ges∞</sub>                              | Gesamtdruck der ungestörten Anströmung      | [Pa] | $\nabla$        | Verdrängung                                    | [m <sup>3</sup> ]    |
| q <sub>∞</sub> = $\frac{\rho}{2} \cdot V^2$    | Staudruck                                   | [Pa] |                 |                                                |                      |
| R <sub>F</sub>                                 | Reibungswiderstand                          | [N]  |                 |                                                |                      |
| R <sub>R</sub>                                 | Restwiderstand                              | [N]  |                 |                                                |                      |
| R <sub>TM</sub>                                | Gesamtwiderstand des Modells                | [N]  |                 |                                                |                      |
| R <sub>W</sub>                                 | Wellenwiderstand                            | [N]  |                 |                                                |                      |

### 7. Literatur

[1] — Proceedings 16. ITTC. Report of the Resistance Committee. Leningrad 1981.

[2] *Mewis, F., Heinke, H.*: Strömungsuntersuchungen an einem Modell der „Serie 60“ mit C<sub>B</sub> = 0,60. Unveröffentlichter SVA-Bericht Nr. 1459, Potsdam 1983.

[3] *Vollheim, R.*: Über den Einfluß der Reibungswirkung auf die Druckverteilung an einem Schiffsmodell. Schiffbauforschung, Rostock 17 (1978) 3/4, S. 111—124.

[4] *Todd, F. H.*: Some Further Experiments on Single-Screw Merchant Ship Forms — Series 60. Trans. SNAME 61 (1953).

[5] *Eggers, K.*: Über die Ermittlung des Wellenwiderstandes eines Schiffsmodells durch Analyse seines Wellensystems. Schiffstechnik, Hamburg 9 (1962) 46, S. 79—85.

[6] *Vollheim, R.*: Messung der Wellenentwicklung und der Reibungsverluste bei dem Modell eines Massengutfrachters. C<sub>B</sub> = 0,80 mit Bugwulstvarianten. Teil II. Schiffbauforschung, Rostock 10 (1971) 5/6.

# Die Reduzierung der propellererregten Schwingungen durch nachstrombeeinflussende Änderungen am Hinterschiff

Von Dipl.-Ing. *Dietrich Schmidt*, VEB Kombinat Schiffbau Rostock, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam

## 1. Nachstromverteilung und Schwingungserregung

Der Propeller, der in einem ungleichförmigen Nachstromfeld arbeitet, erzeugt auf zwei unterschiedlichen Wegen instationäre Kraftschwankungen, die zu starken Schiffschwingungen führen können.

Bei der Drehung des Propellerflügels im ungleichförmigen Nachstrom wird dieser unterschiedlich angeströmt und somit unterschiedlich belastet. Dadurch entstehen Kraftschwankungen am Propeller, die zu Schwingungen des Propellers, der Wellenleitung oder des Hinterschiffes führen können.

Diese Art der Schwingungserregung ist bei modernen Schiffen nicht so kritisch (vorausgesetzt, daß Resonanzzustände vermieden werden) wie die Schwingungserregung durch propellererregte Druckschwankungen an der Außenhaut.

Die propellererregten Druckschwankungen setzen sich aus mehreren Komponenten zusammen. Das mit dem Propellerflügel rotierende Druckfeld wirkt an festen Punkten der Außenhaut als pulsierender Druck. Somit entstehen propellererregte Druckschwankungen im Gegensatz zu den instationären Kräften am Propeller auch in homogener Propellerzuströmung. Durch die Inhomogenität der Propellerzuströmung werden die Druckimpulse jedoch entscheidend erhöht. Das Druckfeld baut sich durch die Verdrängungswirkung des Flügels und die Zirkulation um den Flügel auf. Arbeitet der Propeller in einem inhomogenen Nachstromfeld, so ändert sich ständig die Zirkulation um den Flügel.

Während die Erhöhung der Druckschwankungsamplituden durch die Zirkulationsänderung selbst nur etwa 50%

beträgt, ist die entscheidende Erhöhung der Druckschwankungen im inhomogenen Nachstromfeld auf die instationäre Kavitation zurückzuführen.

Für homogene oder rotationssymmetrische Zuströmung kann mit Leichtigkeit ein kavitationsfreier Propeller entworfen werden. In einer realen Zuströmung tritt aber fast immer zeitweilig Kavitation auf. Bei gewöhnlichen Einschraubern setzt die Kavitation am Propellerflügel bei  $\Theta = 15^\circ \dots 30^\circ$  vor der Passage des Stevens ein, und sie verschwindet bei  $\Theta = 30^\circ \dots 60^\circ$  nach der Passage.

Die am Flügel sitzende Kavitationschicht, man spricht auch von einer Kavitationsblase, wirkt sich wie eine Verdickung des Propellerflügels aus.

Würden die Kavitationserscheinungen nicht pulsieren, so würden durch die verstärkte Verdrängungswirkung die Druckschwankungen nur um ca. 50% erhöht werden. Die hauptsächlichliche Erhöhung der Druckschwankungen infolge Kavitation ist auf die Volumenänderung der Kavitationsblase zurückzuführen. Je heftiger die Kavitation pulsiert, desto größer sind die Druckimpulse. In ungünstigen Fällen können die durch instationäre Kavitation erregten Druckimpulse auf das 5fache der beim nichtkavitierenden Propeller auftretenden anwachsen, in Extremfällen sogar auf das 15fache.

Durch die instationäre Kavitation kommen zu der Grund-erregung mit der Frequenz  $f_z = n \cdot Z$  (Drehzahl  $\times$  Flügelzahl) die Frequenzen höherer Ordnung  $f_{1z} = 2 \cdot n \cdot Z$ ,  $3 \cdot n \cdot Z \dots$  hinzu. Diese können die Hinterschiffsbereiche stärker zum Schwingen anregen als die erste Ordnung.