

- [21] *Journée, J. M. J.*: Prediction of speed and behaviour of a ship in seaway. ISP, Rotterdam 23 (1976) Nr. 265.
- [22] *Babbidge, N. H.*: The statistical analysis of the voyage data of three fast cargo ships. ISP, Rotterdam 24 (1977) Nr. 275.
- [23] *Norrbin, N. H.*: On the added resistance due to steering on a straight course. 13. ITTC, Report Perform. Committee, App. 8.
- [24] *Krinzel, H.*: Berechnung des Fahrtverlustes infolge Wind auf Grund von Windkanal- und Schrägseppversuchen. Schiff u. Hafen, Hamburg (1974) 4.
- [25] *Michaelis, H., Thiel, R.*: Kräfte und Momente an Überwasserschiffen infolge Wind. SVA Potsdam, unveröffentlichter Bericht.
- [26] *Georgy*: Modelluntersuchungen im Windkanal zur Ermittlung der Windkräfte und -momente am Überwasserschiff. Bericht Nr. 600-48/82 des Inst. f. Leichtbau, Dresden.
- [27] *Thiel, R.*: Experimentelle Ermittlung und Berechnung der Bewegungs- und Leistungscharakteristika im Seegang für zwei Containerschiffe. SVA Potsdam, Bericht Nr. 1416.
- [28] *Haltendorff, H. G.*: Seeverhalten. Handbuch der Werften, Bd. XII, Hamburg 1974.
- [29] *Nakamura, S., Hosoda, R.*: A method for predicting the power of ships in a seaway. Report of Seakeeping Committee, 14. ITTC, Ottawa, 1975.

Eine Einrichtung für Modellversuche an Propellern für Querstrahlruder

Dipl.-Ing. *Günter Schroeder*, VEB Kombinat Schiffbau Rostock, Schiffbau-Versuchsanstalt

1. Einleitung

Die Schiffbauversuchsanstalt hatte vom VEB Dieselmotorenwerk Rostock den Auftrag erhalten, Kennlinien einschließlich der Kennlinien der Flügelverstellmomente sowie Kavitationseigenschaften für Querstrahlruderpropeller mit einstellbarer Flügelblattsteigung zu ermitteln. Die Modellpropeller sollten in dem Rohr einer schematisierten Querkanalattrappe arbeiten. Am abgerundeten Rohreinlauf der Attrappe war eine Querplatte zur Simulation der Schiffsaußenhaut anzubringen. Drei auswechselbare Drosselkonusse am Rohrauslauf sollten die Wahl von drei verschiedenen Propellerbelastungen ermöglichen. Die Wassergeschwindigkeit im Rohr sollte mit einem Prandtlrohr vor dem Propeller gemessen werden.

Diese ersten Vorstellungen entsprachen einer Versuchsanordnung, die in [1] beschrieben und in Bild 1 wiedergegeben ist. Die endgültige Versuchsanordnung war in Abstimmung mit dem Auftraggeber zu wählen.

2. Meßprinzip

Propeller von Querstrahlrudern an Schiffen führen dem vor dem Rohrkanal nahezu ruhenden Wasser laufend Druckenergie zu, so daß das Wasser den Kanal infolge des kontinuierlichen Axialimpulses durchströmt. Der Querschub einer solchen Anlage wird bestimmt durch die Größe der zugeführten Druckenergie und die auftretenden Strömungsverluste. Die Aufgabe besteht nun darin, die Wirksamkeit der Energieumsetzung durch die vorgesehenen Propeller sowie deren Kavitationseigenschaften für einen vorgegebenen Bereich der Druckverluste zu bestimmen.

Die Druckverluste (Kanalwirksamkeit) werden vorgegeben durch die theoretische Schubanteilszahl des Propellers $\tau_i = T_p/T_{iges}$, die mit dem ideellen Gesamtschub der Anlage $T_{iges} = \rho \cdot AK \cdot v_k^2$ den Wert $\tau_i = T_p/(\rho \cdot \pi/4 \cdot Dk^2 \cdot v_k^2)$ annimmt; sie kann auch in der Form $\tau_i = 4/\pi \cdot (D/Dk)^2 \cdot K_{TP}/J_k^2$ geschrieben werden. Es waren also die Kennlinien für den Propellerschub K_{TP} , das Antriebsdrehmoment K_Q und das Flügelverstellmoment K_{QH} in Abhängigkeit von der Fortschrittszahl $J_k = v_k/(n \cdot D)$ wie bei Propellerversuchen üblich zu bestimmen, wobei v_k

die Wassergeschwindigkeit im Rohr ist. Die Schubanteilszahl τ_i ergibt sich dann aus den Kennlinien bzw. den Meßwerten und gibt den zu untersuchenden Bereich der Fortschrittszahlen an.

Propellerkennlinien werden gewöhnlich durch Ändern der Wassergeschwindigkeit in etwa 12 bis 15 Stufen aufgenommen. Im vorliegenden Fall sollte die Belastung wegen des großen Aufwandes für das Wechseln der Konusse in nur drei Stufen geändert werden. Zum Wechseln der Konusse ist jeweils das Öffnen der Meßstrecke, das Ablassen des Wassers und bei Verstellmomentenmessungen zusätzlich der Ausbau einer im Rohrauslauf vorhandenen Übertragungswelle erforderlich. Die Umrüstzeit würde in einem sehr ungünstigen Verhältnis zur eigentlichen Versuchszeit stehen, und die drei vorgesehenen Belastungen würden für eine sichere Angabe des Kennlinienverlaufes kaum ausreichen.

Es lag daher die Frage nahe, ob die verschiedenen Belastungen ähnlich wie bei üblichen Propellerversuchen durch Einsatz des Impellers in dem erforderlichen Bereich realisiert werden können. Es wäre dann nur eine Drossel für alle Belastungen erforderlich, die so zu dimensionieren wäre, daß die höchste erforderliche Belastung bei ruhendem Impeller eintritt und die kleineren Belastungen durch zusätzlichen Antrieb des Impellers hergestellt werden können. Die Belastung des Impellers wird dabei wesentlich höher als bei Routineversuchen sein, so daß er in einem ungewöhnlichen Belastungsbereich vermutlich mit Strömungsabriss an seinen Flügeln arbeiten wird. Es war daher zunächst zu prüfen, ob dabei ein unregelmäßiger Lauf des Impellers eintritt, starke Druckschwankungen die Druckmessungen in der Meßstrecke beeinträchtigen und eine ausreichend feine Abstufung der Wassergeschwindigkeit möglich ist. Diese Prüfung wurde nach dem improvisierten Einbau einer Lochblende ($\varnothing 200$ mm) in die Meßstrecke mit einem Prandtlrohr im austretenden Strahl durchgeführt. Der Impeller lief ruhig, die eingetretenen Schwankungen der Druckanzeige waren relativ gering und ließen sich gut mitteln. Die Strahlgeschwindigkeit ließ sich in Stufen von etwa 0,05 m/s einstellen, die kleinste erreichte Geschwindigkeit war etwa 0,3 m/s; die höchste Geschwindigkeit war bei etwa 3 m/s begrenzt, da die Lochblende bei höheren Geschwindigkeiten abzureißen drohte. Auf Grund dieses Ergebnisses wurde entschieden, zunächst nur eine Drossel anzufertigen und die Belastung möglichst durch Einsatz des Impellers zu variieren.

Im Rohr wird eine radial veränderliche Wassergeschwindigkeit auftreten, die von der Belastungsverteilung an den Propellerflügeln abhängt; diese Verteilung wird an den zu untersuchenden Verstellpropellern in starkem Maße von der Flügelstellung (Flügelsteigung) beeinflusst. Zur Bestimmung der Fortschrittszahl und der Belastung der Propeller wird die mittlere Wassergeschwindigkeit im Rohr benötigt. Es werden also bei jeder Belastung Prandtlrohrmessungen

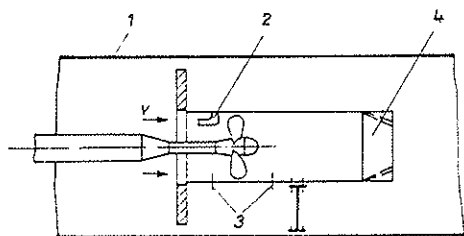


Bild 1. Schematisierter Versuchsaufbau nach [1]
1 Meßstrecke des Kavitationskanals, 2 Prandtlrohr, 3 Druckmeßstellen, 4 Auswechselbare Drosselkonusse

auf verschieden großen Rohrradien erforderlich, um daraus die mittlere Wassergeschwindigkeit zu ermitteln. Dabei besteht die Gefahr, daß ein vor dem Propeller befindliches Prandtlrohr, welches auf mehrere Radien einstellbar sein müßte, die Strömung vor dem Propeller stört, so daß die Kavitationsbeobachtungen erschwert werden können. Es wurde daher geprüft, ob eine Durchflußmessung nach dem Venturiprinzip die Prandtlrohrmessungen ersetzen kann. Der erforderliche Venturi-Eichfaktor wurde hierzu mit Verwendung der mittleren Ausflußgeschwindigkeit bestimmt, die sich durch entsprechende Messungen mit einem in der Höhe verschieblichen Prandtlrohr am Düsenaustritt ergibt.

Die Absicht, die Geschwindigkeit mit der als Meßdüse ausgebildeten Drossel zu bestimmen, schlug fehl. Die wechselnde Belastung des Propellers führte zu einer Veränderung des Eichfaktors. Die Geschwindigkeitsmessung nach dem Venturiprinzip wurde daher an den Einlauf zum Querkanal verlegt; diese Verlegung hatte außerdem den Vorteil, daß die bei den Verstellmomentenmessungen vorhandene Übertragungswelle die Venturimessung nicht stören konnte. Der äußere Rand der Querplatte am Rohreinlauf wurde gegenüber der Meßstreckenwand abgedichtet, so daß die mittlere Wassergeschwindigkeit im Rohr aus der Differenz des statischen Druckes im großen Querschnitt der Einlaufdüse zur Meßstrecke zum Druck im Einlaufteil des Rohres berechnet werden konnte.

3. Versuchsstand

Der Versuchsaufbau, wie er für die Eichung verwendet wurde, ist in Bild 2 skizziert. An je einem oberen und unteren Träger aus Stahlwinkeln sind die drei Rohrstücke des Querkanals mit Schellen befestigt, die Querplatte ist mit Winkelaschen an die vorderen Enden der Träger geschraubt. Das Einlaufteil mit angeflanschter Einlaufdüse sowie das Auslaufteil mit ebenfalls angeflanschter Auslaufdüse sind aus Rotguß und die zwei Halbschalen des Beobachtungsteiles aus Piacryl hergestellt; die Querplatte besteht aus Hartgewebe. Der Querkanal, der sowohl in die kleine als auch die große Meßstrecke des Kavitationskanals eingebaut werden kann, wird an seiner Einlaufseite mit vier Druckschrauben, die an den Ecken der quadratischen Querplatte angebaut sind und gegen die Meßstreckenwand gezogen werden, gehalten und in die richtige Lage gebracht. An der Auslaufseite wird der Querkanal mit vertikalen Zug-

schrauben, die an den Trägern mit Knieblechen befestigt sind, an der Meßstreckenwand befestigt; die zugehörigen Muttern in den Durchbrüchen der Wand ermöglichen die richtige Höheneinstellung. Die Zugschrauben sind so dimensioniert und befestigt, daß sie die am Rohr auftretenden axialen Kräfte auf die Meßstreckenwand übertragen. Gleiche Zugschrauben in horizontaler Stellung, die mit den Schellen am Auslaufteil des Querrohres verschraubt sind, gestatten eine horizontale Ausrichtung des Rohres.

Der eingebaute Strömungsgleichrichter ist aus 1 mm dicken, in Abständen von ca. 21 mm gekreuzten Messingblechen nach Empfehlungen für Windkanäle in Lit. [2] hergestellt. Der Gleichrichter teilt das Querrohr in quadratische Leitkanäle, die 5,7fach so tief sind wie das Teilungsmaß des Gleichrichters. Kontrollversuche mit 3-Loch-Kugelsonden bestätigen, daß die Tangentialgeschwindigkeit durch den Gleichrichter so weit abgebaut wird, daß sie die für die Eichung vorgesehene Ermittlung der Austrittsgeschwindigkeit mit einem Prandtlrohr praktisch nicht mehr verfälschen. Die Eichversuche, die sowohl ohne Propeller bei Umwälzung des Wassers mit dem Impeller allein als auch mit einem Propeller bei verschiedenen Belastungen durchgeführt wurden, ergaben Venturi-Eichkonstanten, die von ihrem Mittelwert 0,979 weniger als 1% abweichen. Staubteilchen bzw. Luftbläschen in dem ankommenden Wasser bewegten sich auch bei den Versuchen ohne Propeller mit den größten Belastungen des Impellers augenscheinlich auf völlig glatten Bahnen, so daß Reste möglicherweise vom Impeller herrührender Ablösungswirbel die Meßstrecke offensichtlich nicht mehr erreichten.

Die Druckentnahme besteht aus fünf Bohrungen mit 2 mm Durchmesser, die in der unteren Hälfte des Einlaufteiles in jeweils 40° Abstand angebracht sind, und den zugehörigen Einzelschläuchen, die in eine gemeinsame Druckkammer münden. Diese Art der Druckentnahme soll in loser Anlehnung an die in [3] empfohlenen Ringkammern eine gewisse Mittelwertbildung des Druckes bewirken, der im Meßbereich infolge der Propellerwirkung noch leicht schwanken kann.

Die Propeller werden auf dem Dynamometer J 25 gefahren. Bei Versuchen ohne Verstellmomentenmessungen bleibt die in Bild 2 skizzierte Anordnung erhalten, der Propeller tritt an die Stelle der Blindnabe und das Prandtlrohr kann entfernt oder an die untere Meßstreckenwand gefahren werden. Der Strömungsgleichrichter kann ebenfalls entfernt werden.

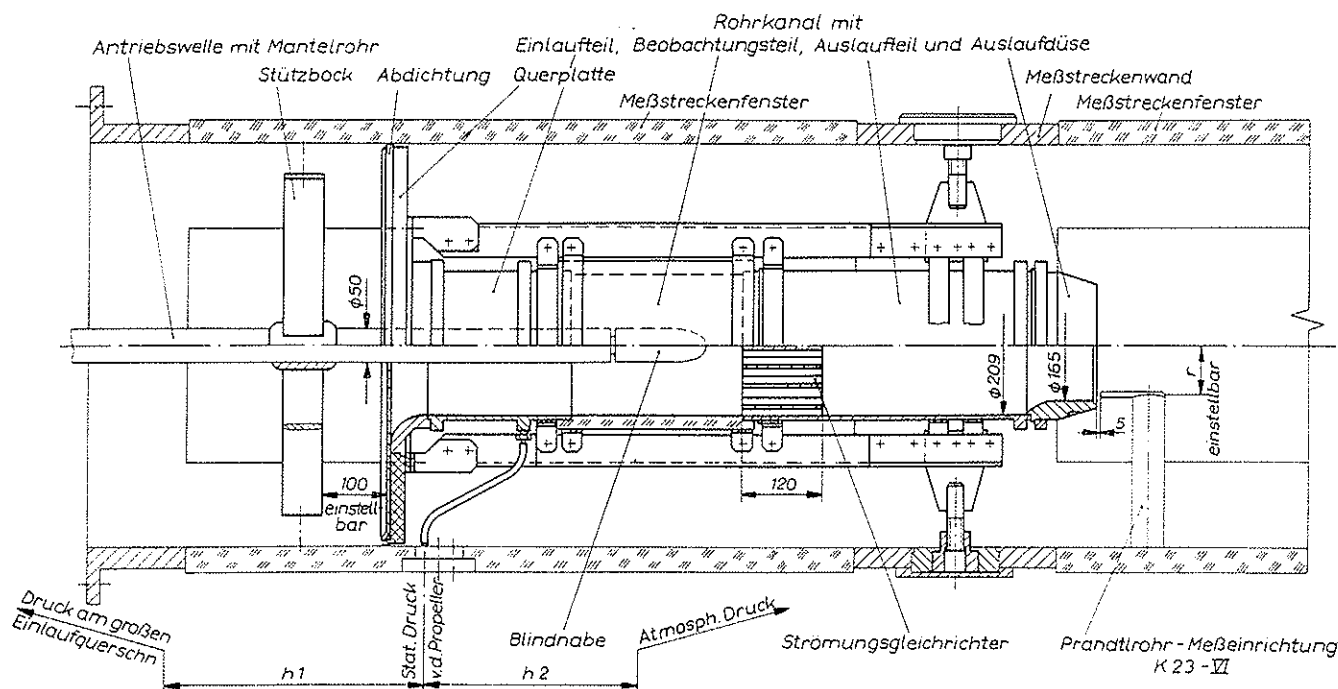
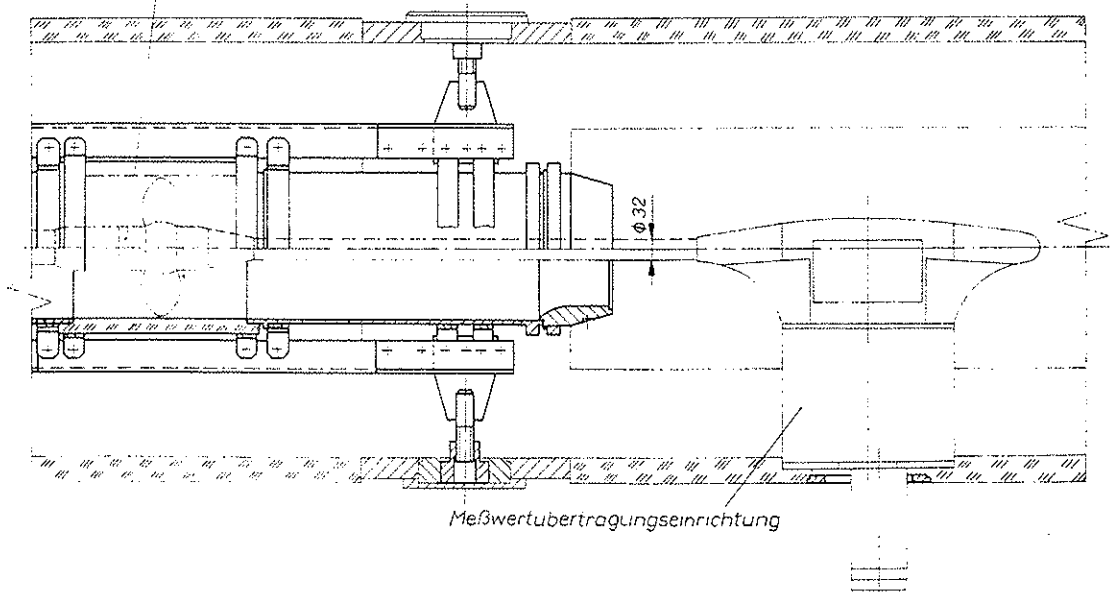


Bild 2. Versuchsstand in Eichanordnung

Verstellmomenten - Meßnabe



Meßwertübertragungseinrichtung

Bild 3. Versuchsstand bei Propellerversuchen mit Verstellmomentenmessung

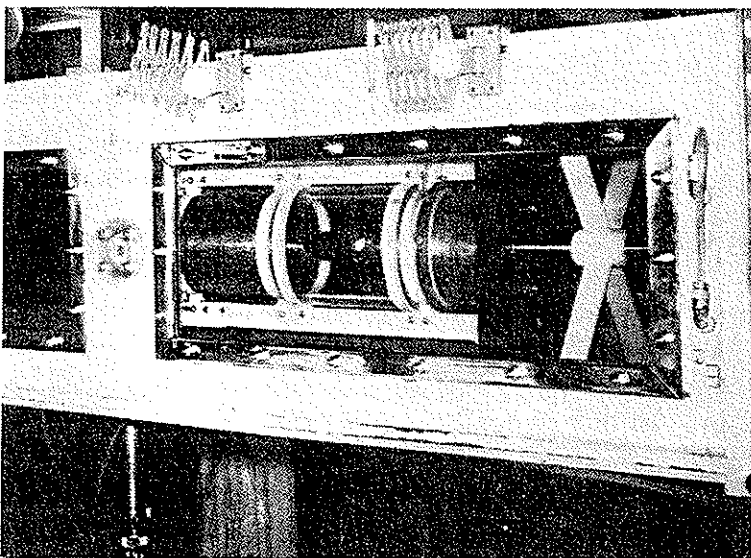
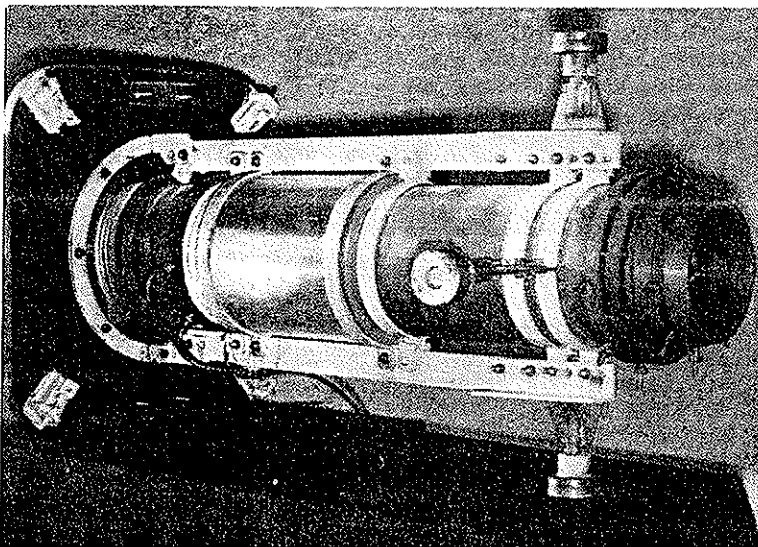


Bild 4. Fotos des Querkanales
a) außerhalb des Kavitationskanales



b) in der Meßstrecke des Kavitationskanales

Bei Versuchen mit Verstellmomentenmessungen, die nur ohne Gleichrichter gefahren werden können, wird eine Verstellmomenten-Meßnabe mit Meßwertübertragungseinrichtung verwendet. Die entstehende Versuchsanordnung ist in Bild 3 skizziert. Die Fotos in Bild 4 veranschaulichen den Versuchsstand innerhalb und außerhalb der Meßstrecke.

Der Meßstellendruck, der Venturidruck, die Propellerdrehzahl, der Propellerschub und das Propellerdrehmoment werden mit den am Tank für die Routineversuche installierten Geräte ermittelt. An die Verstellmomenten-Meßeinrichtung werden handelsübliche Stromversorgungs- und Anzeige- bzw. Registriergeräte angeschlossen.

4. Ergebnisdarstellung

Die Meßergebnisse werden mit einem EDV-Rechenprogramm umgerechnet und in üblicher Weise dargestellt. Der am Dynamometer gemessene Schub wird um den Betrag korrigiert, der infolge des gegenüber der Atmosphäre in der Meßstrecke geänderten Druckes an der Propellerwelle entsteht. Eine Korrektur des Schubes für einen Nebeneinfluß erfolgt nicht. Die Korrektur für das am Dynamometer wirkende Reibmoment wird bei den Versuchen ohne Meßwertübertragung für Flügelverstellmomente routinemäßig ermittelt. Bei Verwendung der Meßwertübertragung kann die Reibung bei Verwendung einer entsprechenden Blindnabe in gleicher Weise ermittelt werden; zu den bisherigen Messungen wurde sie aus Eichversuchen mit ebenen Flügeln eines Verstellpropellers (Konstruktionssteigung = 0) in der Steigungsstellung 0° unter Abzug des Drehmomentes ermittelt, welches vorher ohne Verwendung der Meßwertübertragung ermittelt worden war. Die Werte der Geschwindigkeit und des Druckes im Einlaufteil des Querkanales werden für die Verdrängungswirkung des hier verlaufenden Mantelrohres (Propellerwelle des Dynamometers) korrigiert; die ermittelten Fortschritts-, Belastungs- und Kavitationsziffern gelten also für den freien Rohrquerschnitt.

Es werden Symbole verwendet, die im Schiffbauversuchswesen gebräuchlich sind. Nachfolgend einige zusätzlich verwendete Symbole sowie Definitionen:

Propellerdurchmesser	D
Kanaldurchmesser	Dk
Kanalquerschnitt	$Ak = \pi/4 \cdot Dk^2$
Volumenstrom	\dot{V}
Mittlere Wassergeschwindigkeit im freien Rohr	$vk = \dot{V}/Ak$
Fortschrittsziffer des Propellers im Rohr	$Jk = vk/(n \cdot D)$
Theoretischer Gesamtschub eines Querkanales	$Tiges = \rho \cdot Ak \cdot vk^2$
Propellerschub	Tp
Propellerschubbeiwert	$KTP = Tp/(\rho \cdot n^2 \cdot D^4)$
Theoretische Schubanteilziffer	$zi = Tp/Tiges = 4/\pi \cdot (D/Dk)^2 \cdot KTP/Jk^2$

Druck im Einlaufteil des freien Rohres	Pe
Kavitationszahl	$\sigma_n = (Pe - Pv)/(\rho/2 \cdot n^2 \cdot D^2)$
Hydrodynamisches Flügelverstellmoment	Qh
Verstellmomentbeiwert	$KQH = Qh/(\rho \cdot n^2 \cdot D^5)$

Die Ergebnisse eines Versuches sind in Bild 5 dargestellt. Der untersuchte vierflügelige Propeller hat den Durchmesser $D = 0,205$ m und war auf die Flügelsteigung $\gamma = 22,2^\circ$ eingestellt. Der Druck in der Meßstrecke war zum Versuch so eingestellt, daß die Kavitationszahl den Wert $\sigma_n = 2,32$ annahm. Die während dieses Versuches bei drei verschiedenen Belastungen beobachtete Flügelblattkavitation ist in Bild 6 skizziert. Inzwischen ist eine Reihe von Verstellpropellern für Querstrahlruder zur Auswahl optimaler Propellerformen untersucht worden. Über die bisherigen Ergebnisse, die in [4] enthalten sind, wird später berichtet. In den Bildern 5 und 6 sind die Werte der Fortschrittsziffer Jk und der Schubanteilziffer zi noch nicht für die Verdrängungswirkung des Mantelrohres korrigiert.

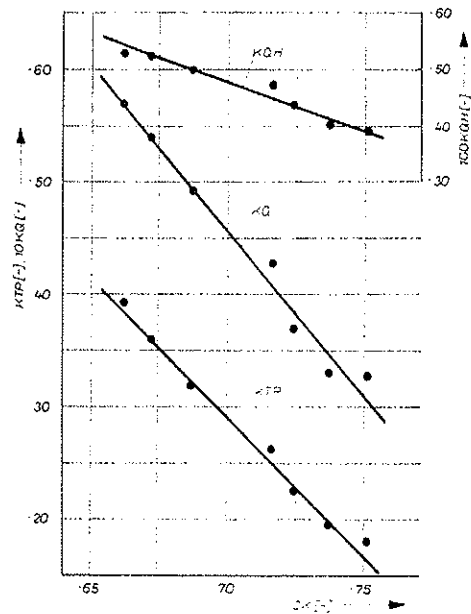


Bild 5. Meßwerte und Beiwertkurven eines Propellers

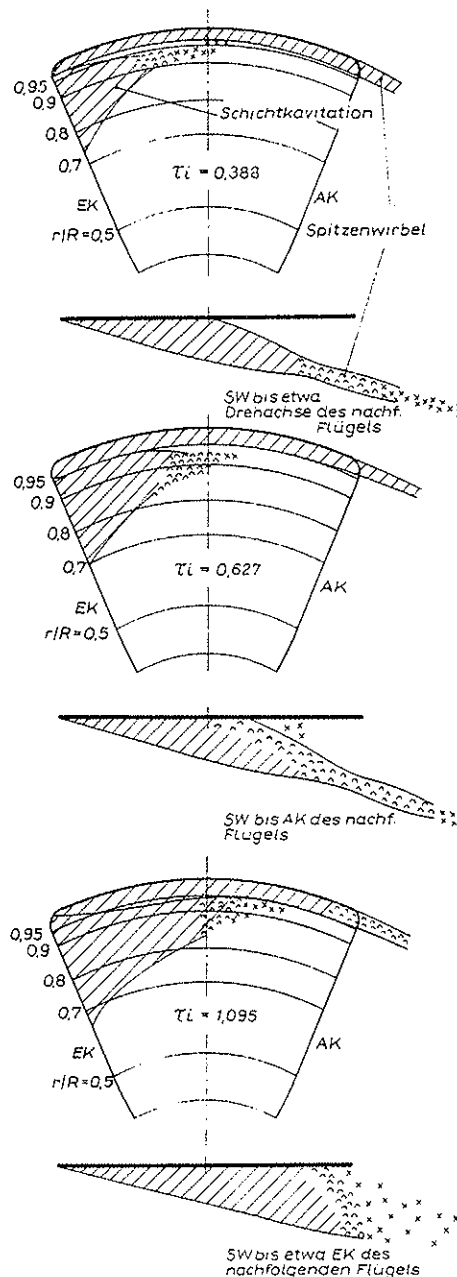


Bild 6. Skizzen der Flügelblattkavitation

5. Zusammenfassung

In der Schiffbauversuchsanstalt des VEB Kombinat Schiffbau ist eine Vorrichtung geschaffen worden, in der Propeller im Rohr bei verschiedenen Schubbelastungen und Kavitationszahlen untersucht werden können. Die Vorrichtung ist vorwiegend für die Untersuchung von Querstrahlruderpropellern entworfen worden, die hydrodynamischen Verstellmomente eines Flügels der Propeller können gemessen werden. Beiwerte und Kavitationsskizzen eines im Auftrag des VEB Dieselmotorenwerk Rostock untersuchten Ver-

stellpropellers für Querstrahlruder sind angegeben, über weitere Ergebnisse wird später berichtet.

Literatur

- [1] *Lebedev* u. a.: Mittel der aktiven Steuerung von Schiffen. (Russ.) Leningrad 1969.
- [2] *Prandtl, L.*: Herstellung einwandfreier Luftströme (Windkanäle). In: Handbuch der Experimentellen Physik Bd. IV, Teil 2, Leipzig 1932.
- [3] VDI-Durchfluß-Meßregeln (DIN 1952). Berlin 1943.
- [4] SVA-Bericht Nr. 1476: Versuche mit 3 Querstrahlruderpropellern im Kavitationskanal (unveröffentlicht).

Ein einfaches Modell für Düsenpropeller

Dr.-Ing. *Hans-Erhard Peters*, Institut für Mechanik der Akademie der Wissenschaften der DDR zu Berlin

Einleitung

Die allgemeine Tendenz bei der Modellierung der Strömung durch Düsenpropeller zeigt eine Verfeinerung der Modelle von Propeller, Düse und Wechselwirkung. Dabei werden für Propeller und Düse dreidimensionale Modelle mit beträchtlichem numerischen Aufwand eingesetzt. Diese Modelle sind für spezielle Aufgaben unverzichtbar, haben aber den Mangel, daß der Einfluß einzelner Modellelemente nur schwer verfolgt werden kann. Für eine Reihe von aktuellen Fragestellungen ist daher ergänzend ein weiterer Zugang erforderlich, der die wesentlichen Wirkprinzipien herausarbeitet, sie in der Modellstruktur transparent macht und durch konsequente Modellreduktion Verfahren mit minimalem numerischen Aufwand ermöglicht.

Nachfolgend wird ein reduziertes Modell für Düsenpropeller vorgestellt. Es gestattet die näherungsweise Berechnung der globalen Größen des Komplexes. Das Modell ist für die schnelle Berechnung von Kennlinien auch bei Verstellpropellern, für Parameterstudien und für die Bereitstellung von Startdaten für verfeinerte Modelle vorgesehen. Reduzierte Modelle als Bestandteil einer Modellkonzeption in zwei Genauigkeitsebenen [1] ermöglichen, daß Feldtheoriemodelle ohne Iteration und mit größerer Treffsicherheit eingesetzt werden können. Das vereinfachte Modell ist auch Grundlage für die Korrektur des Wandeinflusses des Kavitationstunnels bei Messungen an Düsenpropellern, einer Aufgabe, die in Zusammenarbeit mit der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam-Marquardt bearbeitet wurde. Der Beitrag ist dem 30. Jahrestag des Bestehens dieser Einrichtung gewidmet.

Analyse der Einflußgrößen

Beim Düsenpropeller liegen komplexe Wechselwirkungsverhältnisse der Bauteile Propeller, Düse und Nabe vor, die durch instationäre Bedingungen infolge endlicher Flügelzahl und durch Reibung an Düse und Flügeln weiter kompliziert werden.

Wesentlichen Einfluß hat auch die radiale Lastverteilung der Propellerflügel. Eine ausführliche Darstellung der umfangreichen Analyse ist in diesem Rahmen nicht möglich, die Ergebnisse lassen sich in folgenden Aussagen zusammenfassen:

- Die Wirkung der Düse läßt sich durch einfache Modellannahmen gut erfassen.
- Der Propeller muß mit endlicher Flügelzahl bei Berücksichtigung der radialen Lastverteilung modelliert werden.
- Die Reibung an der Düse beeinflußt die globalen Größen wesentlich, besonders bei geringer Belastung des Komplexes. Ursache ist die Tatsache, daß der Düsenwiderstand in die Kräftebilanz in Achsrichtung so stark ein-

greift, daß der Durchsatz durch den Propeller und damit die Anstellung der Flügel beeinflußt werden.

- Die Reibung an den Propellerflügeln kann nach Bestimmung des Durchsatzes als nachträgliche Korrektur berücksichtigt werden.
- Die Drallkomponente darf bei der Flügelanströmung und in der Energiebilanz nicht vernachlässigt werden.
- Für die gute Approximation des Momentes muß der Widerstandsbeiwert des Flügelprofils in Abhängigkeit vom effektiven Anstellwinkel erfaßt werden.
- Weitere Einflußgrößen sind die Abminderung des potentialtheoretischen Auftriebs durch Reibung, die axiale Veränderung der induzierten Geschwindigkeiten und die Induktionen der Restflügel. Diese Einflüsse sollten nicht vernachlässigt werden, können aber etwas gröber approximiert werden.
- Der besondere Einfluß der Steigung an der Flügelspitze kann durch das vorliegende Modell mit Rechnung in nur einem Bezugsschnitt nicht hinreichend nachgebildet werden.

Grundgleichungen und Modellelemente

Als geeignete Grundlage für das vereinfachte Modell des Düsenpropellers erwies sich die Bilanzierung der beteiligten Energien in einer Gesamtbilanz im propellerfesten System (1) in Verbindung mit der Annahme, daß der Strahldurchmesser gegeben ist und zwischen Propellerdurchmesser (FAKDIF = 0) und Düsenaustrittsdurchmesser (FAKDIF = 1) liegt, woraus (5) folgt, wenn man ein Nahentotwasser von der Fläche des Nahenquerschnitts annimmt. Grundlegend ist die Bestimmung des Durchsatzes \dot{m} so, daß die Flügelanstellung die erforderliche Energieübertragung sichert. In (1) ist der Strahlverlust erfaßt. Es wird gesetzt

$$Q \cdot \omega = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot (v_{ST}^2 + c^2 v_{ST} - v_A^2) \quad (1)$$

$$v_{ST} = v_E \cdot \pi \cdot (R_A^2 - R_I^2) / F_{ST}, \quad (2)$$

$$\dot{m} = \rho \pi \cdot (R_A^2 - R_I^2) \cdot v_E, \quad (3)$$

$$Q = NF \rho \cdot v_E \cdot \int_{R_I}^{R_A} T(R) \cdot R \cdot dR, \quad (4)$$

$$F_{ST} = \pi \cdot (R_A^2 - R_I^2) + \pi \cdot (R_{DA}^2 - R_A^2) \cdot \text{FAKDIF}. \quad (5)$$

Vernachlässigt sind die radiale Abhängigkeit der Geschwindigkeiten und des statischen Druckes. Die Gleichungen sind z. T. nur Approximationen der wesentlichen Modellelemente.

Die Wechselwirkung zwischen Düse und Propeller geht nur durch die Annahme (2) über die Wirkung der Düse durch Strahlaufweitung in das Modell ein, von der Düsenform wird also gefordert, daß (2) hinreichend erfüllt wird.