

# Experimentelle Untersuchungen der hydrodynamischen Kräfte und Momente an einem Flügel eines Schiffspoppers bei schräger Anströmung

Von Klaus Meyne und Alfred Nolte, Hamburg

349. Mitteilung der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt

Bei vielen Bewegungsvorgängen von Schiffen werden die Propeller nicht axial angeströmt. Die Schräganströmung kann bedingt sein durch Tauch- und Stampfbewegungen im Seegang, durch Schiebe- und Drehbewegungen beim Manövrieren und bei Schiffen mit mehreren Schrauben durch Rollbewegungen im Seegang. Außerdem tritt sie bei Fahrzeugen mit geneigter Propellerwelle (z. B. Schnellboote, Motorboote u.s.w.) und bei Einschraubenschiffen infolge der Hinterschiffsform auf.

Wegen der Geschwindigkeitskomponente normal zur Antriebswelle eines schräggeströmten Propellers ändern sich die Anstellwinkel, die Relativgeschwindigkeiten und die örtlichen Kavitationszahlen der Flügelemente beim Umlauf ständig. Als Ergebnisse dieser zyklischen Änderungen erfährt

( $P/D$ )<sub>0,7</sub> = 1,60 untersucht. Es werden Aufbau der Meßeinrichtung, die Ergebnisse in Diagrammform, Bilder von der Kavitationsausbildung und einige Meßschiebe dargestellt.

## 1. Meßeinrichtung

Für die vorliegende Aufgabe, Axial- und Tangentialkraft am Einzelflügel im Propellerverband zu messen, wurde der folgende Meßaufbau gewählt (s. Abb. 1). Ein zylindrischer Meßwertaufnehmer ist in der Nabe eingespannt und darauf der Meßflügel am Flügelfuß durch einen geteilten Ring befestigt. Die übrigen drei Flügel des vierflügeligen Propellers sind in ähnlicher Weise auf dem Nabenkörper befestigt. Für die vorliegende Aufgabe ergeben sich wie bei allen Schwin-

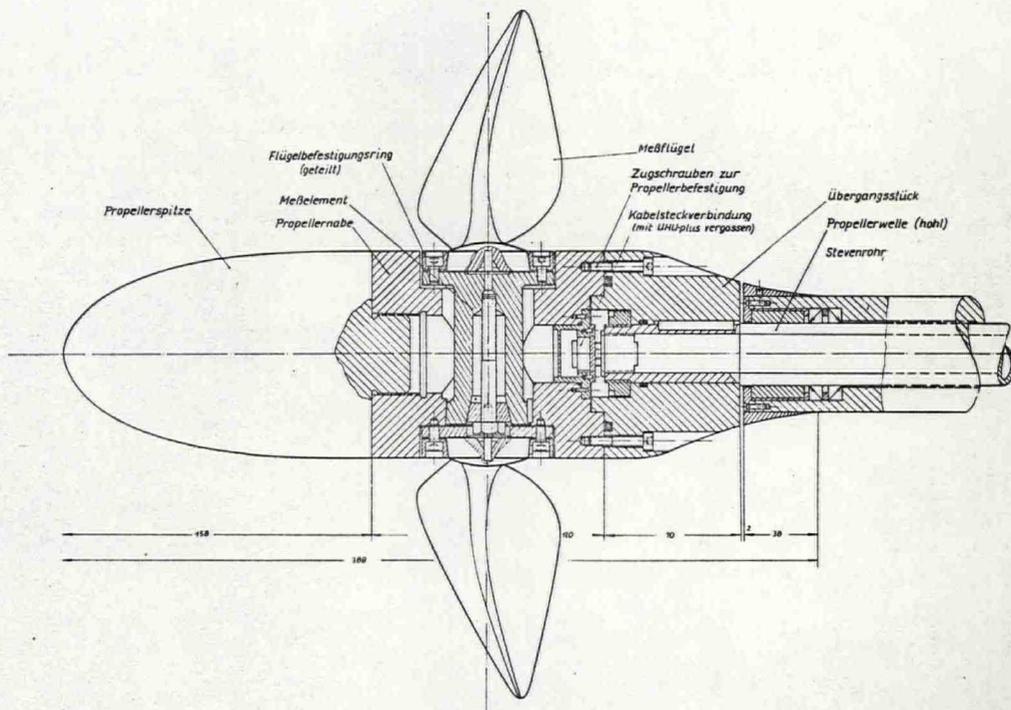


Abb. 1:  
Meßeinrichtung zur Untersuchung der Kräfte am Einzelflügel

der Propeller eine Verringerung von Schub und Drehmoment in einer Hälfte der Kreisfläche und eine Erhöhung in der anderen Hälfte. Die zyklische Änderung des Schubes verursacht ein Moment um eine entsprechende Achse normal zur Antriebswelle und die zyklische Änderung des Drehmomentes eine Kraft normal zur Antriebswelle.

Für den Propellerkonstrukteur sind die Vorgänge an den einzelnen Flügeln von besonderem Interesse. Er muß die durch die zyklischen Änderungen von Schub und Drehmoment bedingten Wechselbeanspruchungen bei der Dimensionierung der Flügelschnitte berücksichtigen. Wenn die zyklischen Anstellwinkeländerungen über den kavitationsfreien Bereich hinausgehen, besteht Erosionsgefahr.

Im Rahmen eines größeren Forschungsprogrammes zur Untersuchung von schräggeströmten Propellern wurden zunächst die für die experimentellen Untersuchungen benötigten Apparate entwickelt und erprobt.

Sodann wurde ein vierflügeliger Modellpropeller im großen Kavitationstunnel der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH (HSVA) bei axialer Anströmung und bei Neigungen der Welle gegenüber der Tunnelachse bis zu 12° untersucht. Es wurden Propellerschub und -drehmoment, die Querkraft und die Kräfte an einem Einzelflügel eines vierflügeligen Propellers über einen großen Fortschrittsgradbereich bei zwei Steigungsverhältnissen ( $P/D$ )<sub>0,7</sub> = 1,0 und

gungsmessungen zwei divergierende Konstruktionsbedingungen: einerseits so zu dimensionieren, daß die erwarteten Kräfte große Meßsignale liefern, andererseits aber durch große Steifigkeit des Gebers genügend hohe Eigenfrequenzen zu erreichen. Im vorliegenden Falle wurde der Meßwertgeber für große Steifigkeit ausgelegt. Da die sonst verwendeten Metallgitter-DMS (K-Faktor = 2) zu kleine Meßsignale liefern, sind Halbleiter-DMS ( $R = 130\Omega$ ; K-Faktor = 120) mit gutem Erfolg eingesetzt worden. Die Nullpunkt-Konstanz war gut. Die Eigenfrequenz wurde in Luft mit  $\nu_0 \approx 150$  Hz gemessen und wird im Wasser auf ca. 100 Hz geschätzt. Damit liegen die größten Erregerdrehzahlen mit  $n = 15 \text{ sec}^{-1}$  genügend weit von der Eigenfrequenz des Meßelementes entfernt.

Die Anordnung der Halbleiter-DMS entnehme man Abb. 2. Je vier gegenüberliegende Streifen sind zu einer Vollbrücke verschaltet. Die Größe der angreifenden Kraft und ihr Hebelarm kann aus den Meßwerten in zwei Ebenen ermittelt werden. Durch die in Abb. 2 verwendete Schaltung wird eine elektrische Kompensation hinsichtlich Temperatur, Zentrifugalkraft, Torsion und Belastung aus der Querrichtung erreicht. Um Verfälschungen durch Reibung zu vermeiden, war das Innere der geteilten Nabe nicht abgedichtet. Die Halbleiter-DMS und alle Lötkontakte wurden mit Tektyl abgedeckt, das sich auch schon bei anderen Konstruktionen vollauf bewährt hat.

Abb. 3 zeigt Propeller und Stevenrohr. Am Stevenrohr sind die Meßelemente für die Messung der bei Schräganströmung am Propeller entstehenden Querkraft zu erkennen. Auch hier wurden Halbleiter-DMS in Vollbrückenschaltung eingesetzt, die mit UHU-plus gegen die Außenströmung bündig abgedeckt waren. Die Geber wurden vor und nach der Messung mit bekannten Kräften geeicht. Abb. 4 zeigt die Meßnabe mit aufgesetzten Flügeln und Abb. 5 die Nabe von der Steckerseite. Der Stecker ist an der Innenseite bei den Kontakten mit UHU-plus vergossen und insgesamt durch Rundschnurringe abgedichtet (s. auch Abb. 1). In Abb. 6 sind einige Schleifringkontakte bei geöffnetem Stevenrohrdeckel zu erkennen. Abb. 7 vermittelt einen Eindruck von Nabe und Meßglied in zerlegtem Zustand.

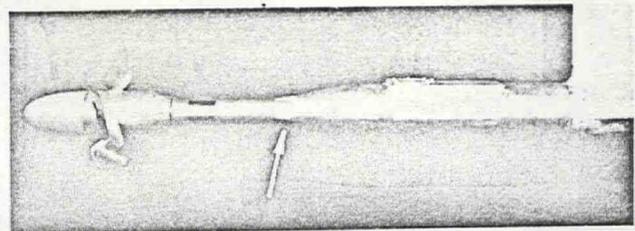
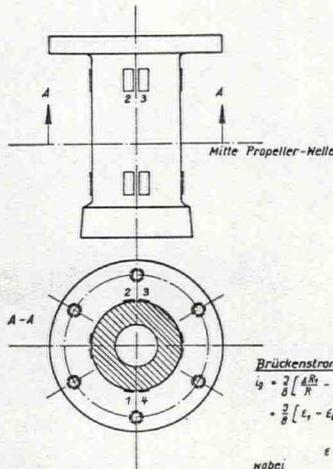


Abb. 3: Propeller und Stevenrohr. Am Stevenrohr sind die Meßelemente für die Querkraftmessung zu erkennen



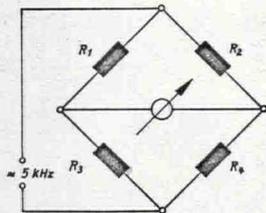
Links:  
Abb. 2:  
Meßelement -  
Position der  
Halbleiter-  
streifen und  
Verschaltung  
der Vollbrücke

$$\begin{aligned} \text{Brückenstrom:} \\ I_B &= \frac{2}{8} \left[ \frac{A R_1}{R} - \frac{A R_2}{R} - \frac{A R_3}{R} + \frac{A R_4}{R} \right] \\ &= \frac{2}{8} [ \epsilon_1 - \epsilon_2 - \epsilon_3 + \epsilon_4 ] \end{aligned}$$

$$\epsilon = \epsilon_B + \epsilon_T + \epsilon_{\tau} + \epsilon_Z + \epsilon_{\theta}$$

wobei

- $\epsilon_B$  - Biegung aus der interessierenden Krafttrichtung
- $\epsilon_T$  - Temperatur
- $\epsilon_{\tau}$  - Torsion
- $\epsilon_Z$  - Zentrifugalkraft
- $\epsilon_{\theta}$  - Belastung aus Richtung 90° zur Meßrichtung



Meßelement - Position der Halbleiterstreifen und Verschaltung der Vollbrücke.

## 2. Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden mit einem Propeller mit einstellbaren Flügeln durchgeführt. Die Propellerdaten sind:

$$\begin{aligned} D &= 355,46 \text{ mm} \\ z &= 4 \\ (P/D)_{0,7} &= 1,0, \text{ einstellbar} \\ A_E/A_0 &= 0,566 \\ x_n &= 0,328 \\ &\text{rechtsgängig} \end{aligned}$$

Weitere Einzelheiten entnehme man dem Formplan (Abb. 8). Der Propeller wurde bei den Steigungsverhältnissen  $(P/D)_{0,7} = 1,0$  und  $1,60$  untersucht.

Die Messungen wurden im großen Kavitationstunnel der HSVA [3] mit dem Propellerdynamometer für schräggeströmte Propeller durchgeführt (maximale Leistung: 30 kW, maximaler Schub: 200 kp). Mit diesem Gerät, dessen schematischen Aufbau Abb. 9 zeigt, wurden mittlerer Schub und

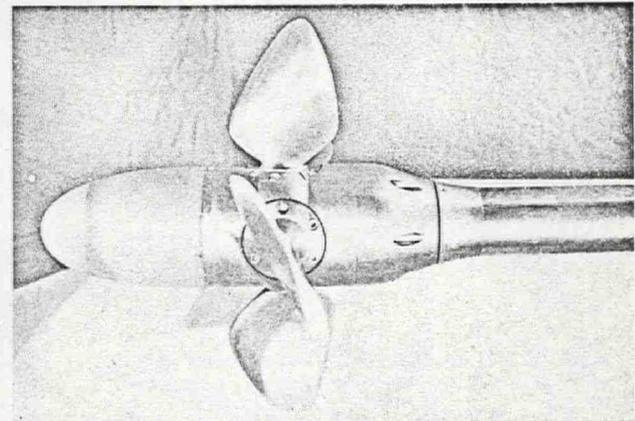


Abb. 4: Propeller. Meßflügel in der 90°-Position

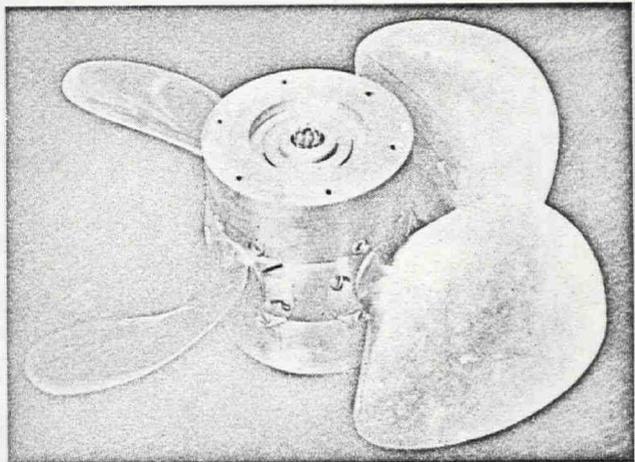


Abb. 5: Propeller von der Steckerseite

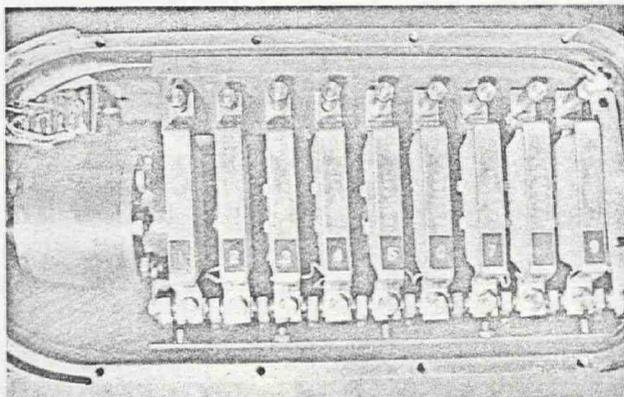


Abb. 6: Schleifringkontakte bei geöffnetem Stevenrohrdeckel

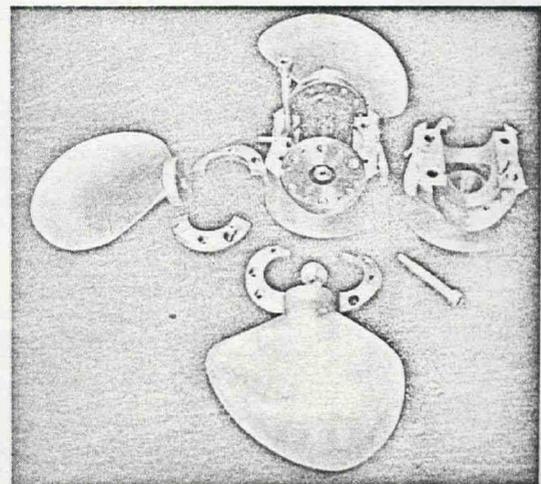


Abb. 7: Meßnabe im zerlegten Zustand

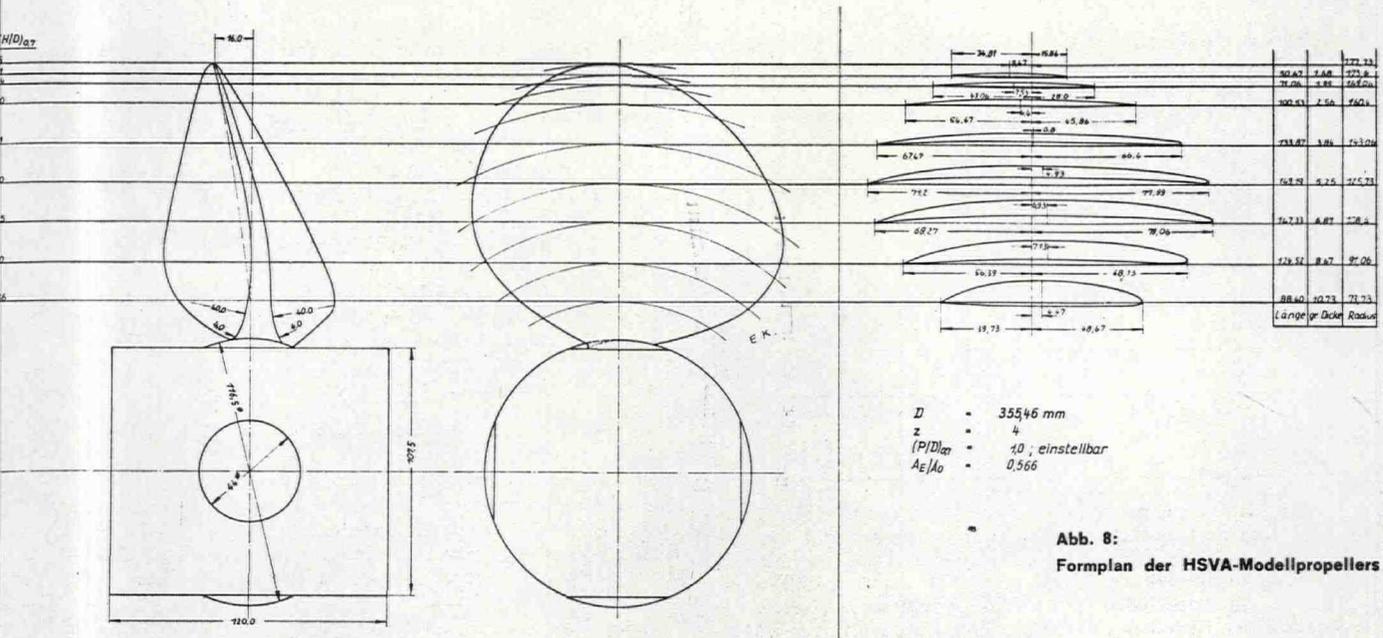
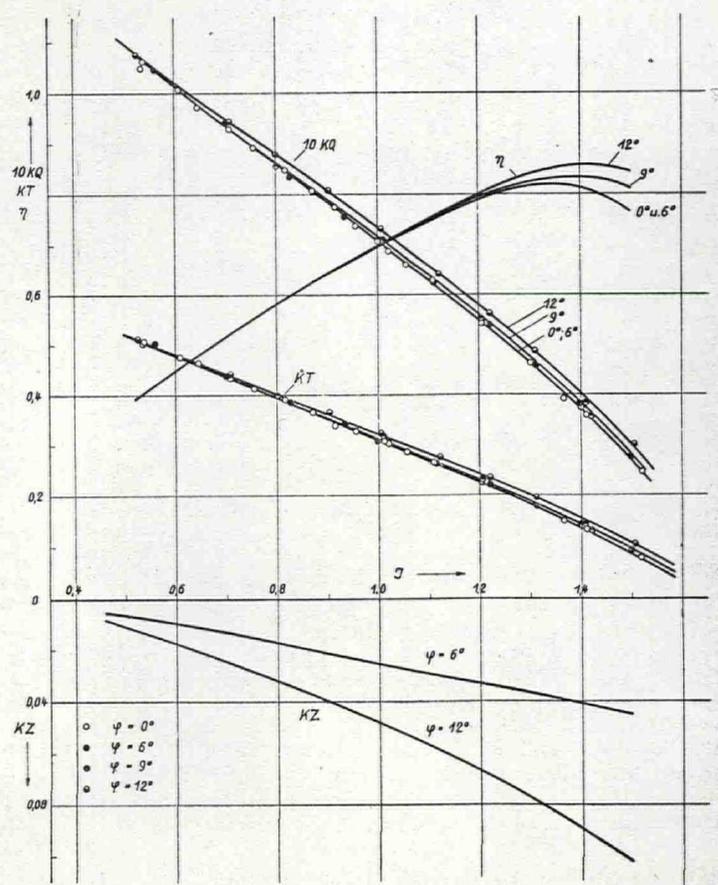
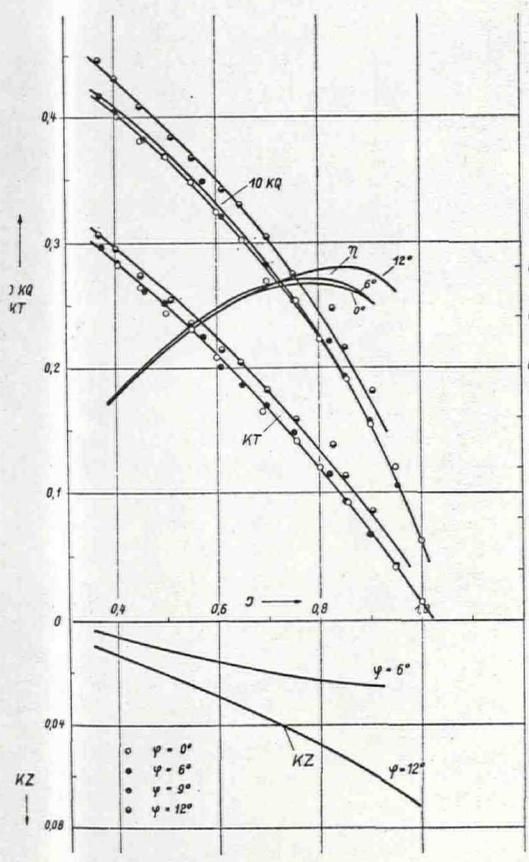
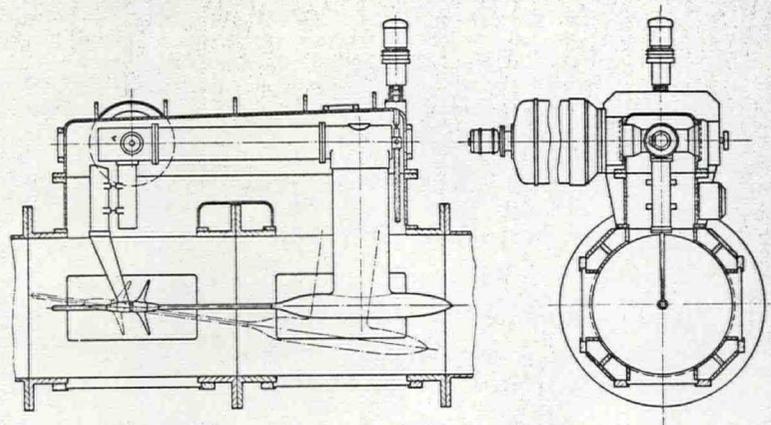


Abb. 8:  
Formplan der HSVA-Modellpropellers

Rechts:  
Abb. 9: Dynamometer zur Untersuchung von schräggeströmt Propellern

Unten links:  
Abb. 10: Ergebnis des Freifahrtversuches beim Steigungsverhältnis  $(P/D)_{0.7} = 1,0$  und bei verschiedenen Wellenneigungen

Unten rechts:  
Abb. 11: Ergebnis des Freifahrtversuches beim Steigungsverhältnis  $(P/D)_{0.7} = 1,60$  und bei verschiedenen Wellenneigungen



mittleres Drehmoment gemessen (Dehnungsmessungen in Vollbrückenschaltung) und mit Philips-Kompensatoren registriert. Die Propellerdrehzahl wird durch einen induktiven Geber aufgenommen. Der Winkel zwischen Propellerwelle und Tunnelachse kann von 0° bis 12° kontinuierlich verstellt werden.

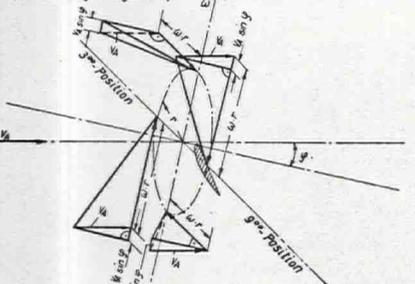
Die Messung wurde bei konstanter Propellerdrehzahl und verschiedenen Wassergeschwindigkeiten von 1,90 bis 5,50 m sec<sup>-1</sup> durchgeführt.

Dabei ergab sich folgender Reynolds-Zahl-Bereich:

Steigungsverhältnis	Prop.-Drehzahl	Reynolds-Zahl
(P/D) <sub>0,7</sub>	n [sec <sup>-1</sup> ]	Re <sub>0,7</sub>
1,00	15	1,8 · 10 <sup>6</sup>
1,60	10	1,3 · 10 <sup>6</sup>

Die Kräfte am Einzelflügel wurden ebenso wie die Querkraft am Stevenrohr mit DMS aufgenommen und die mit Hottinger-5-kHz-Trägerfrequenzverstärkern angehobenen Meßwerte mit Hilfe eines Honeywell-Visicorders 1508 registriert. Um den Brückenabgleich im Wasser zu erreichen, mußte der Regelbereich für die Phase im Hottinger-5-kHz-Trägerfrequenzverstärker erweitert werden. Die Meßsignale wurden von der drehenden Welle mit Hilfe von Philips-Schleifringbürsten (Feinsilber) aufgenommen; die Schleifringe selbst wurden aus 1 mm starkem Feinsilberdraht in 13 Windungen um die Welle gewickelt. Diese Konstruktion ist deshalb gewählt worden, weil sie sich an anderen Schwingungsmeßgeräten der HSVA gut bewährt hat.

Geschwindigkeitsdreiecke an einem Blattelement in den vier Hauptstellungen (ohne induzierte Geschwindigkeiten) (auf die Saugseite gesehen)



Schematische Darstellung der Kräfte an einem Blattelement in den vier Hauptstellungen.

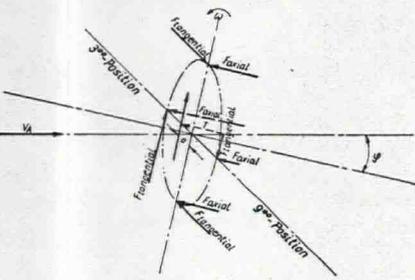


Abb. 12: Propeller in Schräganströmung

Die Flügelblattposition wurde durch einen elektromagnetischen Geber auf dem Visicorder-Meßschrieb mitgeschrieben. Das Signal erscheint dann, wenn sich die Erzeugende (s. Formplan, Abb. 8 und Abb. 12) in der 9°-Position befindet.

### 3. Versuchsergebnisse

#### 3.1 Freifahrtergebnisse

Die Versuchsergebnisse sind in dimensionsloser Form wiedergegeben. Abb. 10 und 11 zeigen die Ergebnisse der Freifahrtergebnisse bei den Steigungsverhältnissen (P/D)<sub>0,7</sub> = 1,0 und 1,60 und bei verschiedenen Neigungen der Propellerwelle zur Tunnelachse von 0° bis 12°. In den Diagrammen sind K<sub>T</sub>, K<sub>Q</sub>, η und der Querkraftbeiwert K<sub>Z</sub> über der Fortschrittsziffer J dargestellt. Der Beiwert K<sub>T</sub> wurde dabei aus dem axialen Schub gebildet, während die Fortschrittsziffer J mit der horizontalen Geschwindigkeit vor dem Propeller er-

mittelt wurde. Die genaue Definition der Beiwerte ist in Abschnitt 5 wiedergegeben.

Eine Korrektur für den Einfluß der festen Begrenzung des Wasserstroms im Kavitationstunnel und eine Maßstabseffektkorrektur wurden nicht durchgeführt. Aus der Schräganströmung ergibt sich am Propeller eine Querkraft F<sub>Z</sub>, wie sie in Abb. 12 aufgezeichnet ist.

Mit zunehmender Wellenneigung werden Schubbeiwert K<sub>T</sub>, Drehmomentbeiwert K<sub>Q</sub>, Wirkungsgrad η und Querkraftbeiwert K<sub>Z</sub> größer. Um eine Aussage über das Wirkungsgradverhalten des Propellers bei Schräganströmung am Schiff zu machen, muß nach folgenden Gleichungen gerechnet werden (s. auch [1]). Für ein Fahrzeug mit geeigneter Propellerwelle und nahezu glattem Schiffsboden (Motorboot, Schnellboot u.s.w.) gilt (siehe Abb. 12a):

$$\eta = \frac{K_{T\varphi} \cdot \cos\varphi - K_Z \cdot \sin\varphi}{K_{Q\varphi}} \cdot \frac{J}{2\pi}$$

wobei φ der Winkel zwischen Propellerwelle und Horizontale bedeutet und K<sub>Tφ</sub>, K<sub>Qφ</sub> und K<sub>Z</sub> die Beiwerte bei der entsprechenden Wellenneigung sind. In die obige Gleichung ist die Fortschrittsziffer J einzusetzen, die mit der Geschwindigkeit am Orte des Propellers in Bewegungsrichtung des Schiffes gebildet wird.

Beim Einschraubenschiff mit horizontaler Propellerwelle befindet sich der Propeller, bedingt durch die Hinterschiffsform, ebenfalls in einer Schräganströmung. Wie groß diese Schräganströmung an der jeweiligen Hinterschiffsform ist, kann nur durch eine Messung geklärt werden. So gilt:

$$\eta = \frac{K_{T\varphi}}{K_{Q\varphi}} \cdot \frac{J}{2\pi}$$

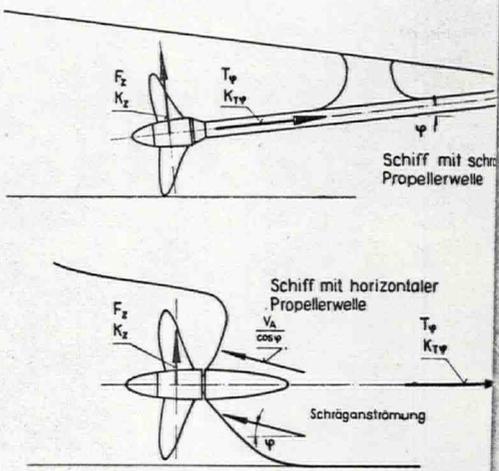
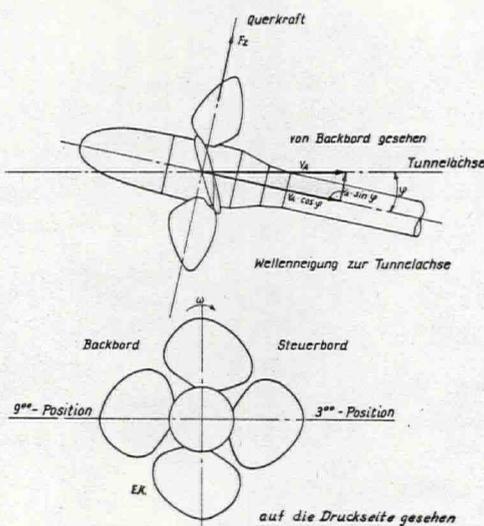


Abb. 12a

wobei auch hier die Fortschrittsziffer in Bewegungsrichtung des Schiffes einzusetzen ist, während die Beiwerte K<sub>Tφ</sub> und K<sub>Qφ</sub> korrekterweise aus Freifahrtdiagrammen für Schräganströmung für die Fortschrittsziffer in Anströmrichtung J/cosφ zu entnehmen sind. Bei der üblichen Analyse eines Propulsionsversuches wird das Ergebnis des Freifahrversuches bei axialer Anströmung benutzt. Der Unterschied beider Wirkungsgrade ist ein Bestandteil des Gütegrades der Anordnung.

#### 3.2 Axial- und Tangentialkräfte und Angriffspunkt am Einzelflügel bei Schräganströmung

Bei Schräganströmung erfährt ein Propellerblatt (während einer Umdrehung) eine resultierende Anströmgeschwindigkeit, die sich ihrem Betrag und ihrer Richtung nach periodisch verändert.

Das führt zu periodischen Schwankungen der Strömungskräfte am Einzelflügel, deren Frequenz gleich der Drehzahl ist. Die maximale Anströmung und Anstellung (ohne Berücksichtigung induzierter Geschwindigkeiten) erreicht der Propeller in der 3°-Position, die minimale in der 9°-Position (s. Abb. 12). In der 6°- und 12°-Position bewirkt die Schräganströmung in der Ebene des Geschwindigkeitsdreiecks keine zusätzliche Komponente.

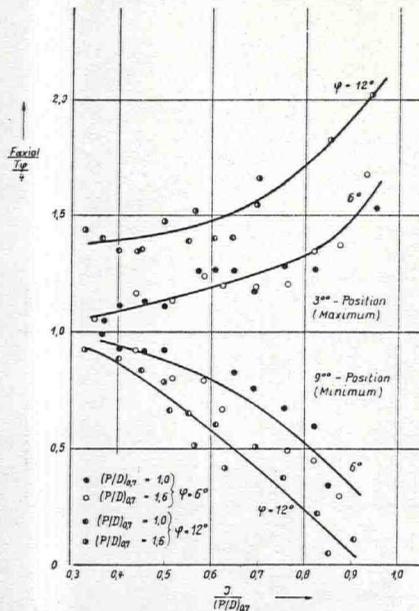


Abb. 13: Axialkraft am Einzelflügel bei verschiedenen Wellenneigungen  $\varphi$

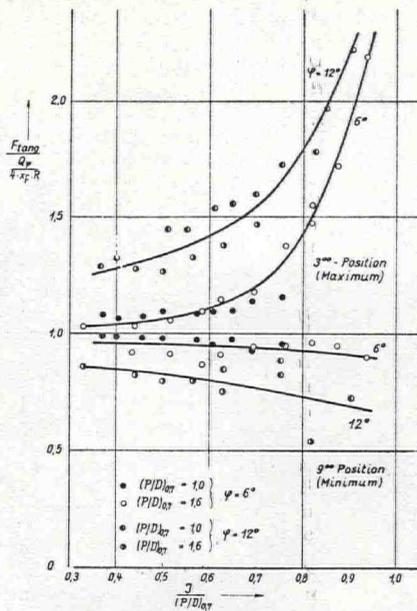


Abb. 14: Tangentialkraft am Einzelflügel bei verschiedenen Wellenneigungen  $\varphi$

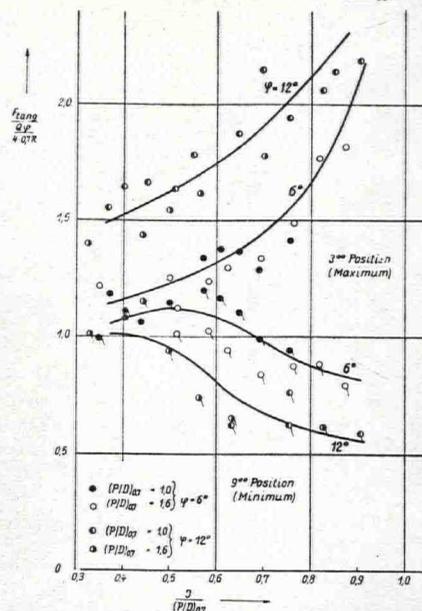


Abb. 15: Tangentialkraft am Einzelflügel (gegenüber Abb. 14 mit 0,7 R dimensionslos gemacht)

Entsprechend dem oben genannten ergibt sich in der  $3^{\circ}$  — Position ein Maximum und in der  $9^{\circ}$  — Position ein Minimum der Kräfte. In Abb. 13, 14, 15 und 16 sind nun die bei den einzelnen Steigungen und Wellenneigungen erhaltenen, am Einzelflügel gemessenen axialen und tangentialen Kräfte dargestellt. Dabei wurde die Axialkraft dimensionslos gemacht mit  $T\varphi/4$ , also mittlerer Schub dividiert durch Anzahl der Propellerflügel (in diesem Falle  $z = 4$ ).

Die Tangentialkraft in Abb. 14 ist dimensionslos gemacht mit dem mittleren Drehmoment dividiert durch die Flügelzahl und durch den Radius, an dem die Resultierende aus Schub- und Tangentialkraft am Einzelflügel angreift. Dieser Radius ist in Abb. 16 aufgetragen. Für den hier benutzten Propeller mit dem Nabenradius von  $x_N = 0,328$  ergibt sich, daß der mittlere Angriffspunkt etwa bei  $x = 0,6$  liegt.

In Abb. 15 ist die Tangentialkraft am Einzelflügel noch einmal dargestellt. Sie ist jedoch auf diesem Diagramm dimensionslos gemacht mit dem mittleren Drehmoment bei der entsprechenden Wellenneigung dividiert durch Flügelzahl mal Radius 0,7 R.

Die Größe der Axial- und Tangentialkraft wächst mit zunehmender Schräganströmung  $\varphi$  und mit zunehmendem Fortschrittsgrad.

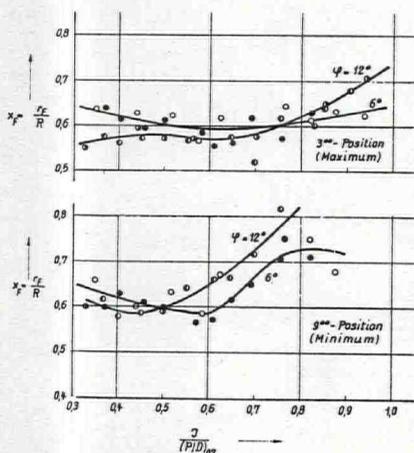
### 3.3 Größe der Querkraft bei Schräganströmung in vertikaler und horizontaler Richtung

Abb. 17 zeigt das Meßergebnis der Querkraft. Bei Schräganströmung entsteht am Propeller eine Querkraft senkrecht zur Propellerwelle. Diese Kraft ist der Seite entgegengesetzt gerichtet, von der die Propellerwelle schräg angeströmt wird. Eine Änderung des Propellerdrehsinns ändert die Krafrichtung nicht. Diese auftretende Querkraft muß von den Wellenlagerungen aufgenommen werden. Ihre Größe wächst mit steigendem Winkel  $\varphi$  der Schräganströmung und mit zunehmendem Fortschrittsgrad. In Abb. 10 und 11 ist  $F_z$  dimensionslos gemacht mit dem Staudruck aus der Umfangsgeschwindigkeit, entsprechend  $K_T$  und  $K_Q$ .

Ist der Phasenwinkel nicht 0, d.h. das Kraftmaximum eilt in der  $3^{\circ}$  — Position vor oder nach, entsteht eine Querkraft  $F_y$ . Diese Kraft konnte nicht ermittelt werden, da die Eigenfrequenz der Meßanordnung in dieser Richtung in der gleichen Größenordnung lag wie die Erregerdrehzahlen.

### 3.4 Exzentrizität des Schubes bei Schräganströmung des Propellers

Bedingt durch die bei Schräganströmung eines Schiffspropellers in der  $3^{\circ}$  — und  $9^{\circ}$  — Position auftretenden unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten und An-



Links:

Abb. 16: Dimensionsloser Radius, an dem die resultierende Kraft aus Schub- und Tangentialkraft am Einzelflügel angreift

Mitte:

Abb. 17: Querkraft im Verhältnis zum mittleren Schub bei verschiedenen Wellenneigungen  $\varphi$

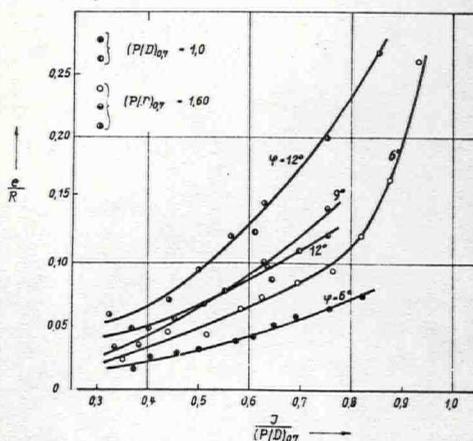
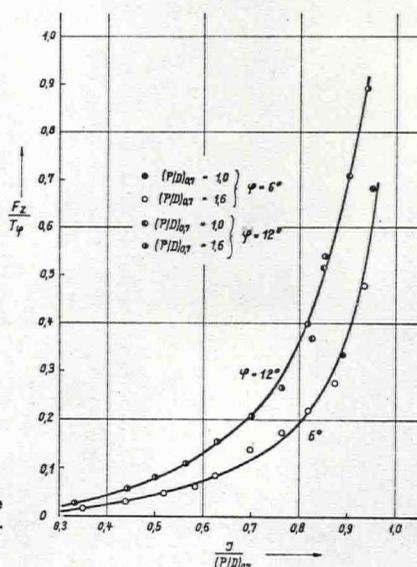


Abb. 18: Exzentrizität des Schubes bei verschiedenen Wellenneigungen  $\varphi$

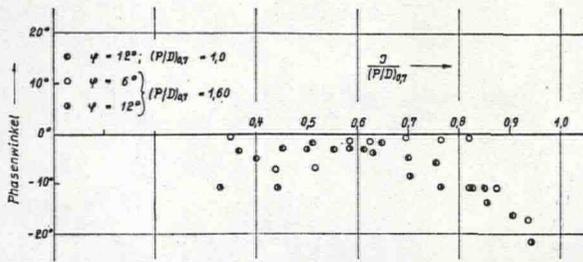


Abb. 19: Phasenwinkel zwischen dem Ort der größten geometrischen Anstellung ( $3^\circ$  Position) und der Flügelstellung (bezogen auf die Erzeugende)

stellwinkel tritt eine Verlagerung des Angriffspunktes des Schubes zur  $3^\circ$  — Position (Steuerbord) bei rechtsdrehendem Propeller ein. Bei Änderung der Drehrichtung wandert dieser Angriffspunkt nach Backbord. Dieser Effekt ist schon von mehreren Autoren experimentell [4] u. [11] gefunden und auch theoretisch berechnet worden [1] und [13].

In Abb. 18 ist die Exzentrizität des Schubes bei verschiedenen Wellenneigungen über  $\frac{J}{(P/D)_{0,7}}$  aufgetragen.

Die Schubexzentrizität nimmt zu mit wachsendem Fortschrittsgrad, mit wachsender Schräganströmung und erweist sich ebenso als abhängig vom Steigungsverhältnis  $(P/D)_{0,7}$  des Propellers.

### 3.5 Phasenwinkel

Die bei den Versuchen beobachteten Phasenwinkel für die Axial- und Tangentialkomponente am Einzelflügel sind in Abb. 19 vorgelegt. Die Winkel bewegen sich im wesentlichen zwischen  $0^\circ$  und  $10^\circ$ . Der Phasenwinkel ist negativ, das bedeutet, das Kraftmaximum eilt der Flügelblattposition vor.

Dazu soll noch folgendes gesagt werden. Als Flügelstellung ist die im Formplan Abb. 8 eingezeichnete Erzeugende gewählt. Der Angriffspunkt der resultierenden Kraft ist aber auch vor dieser Achse (Erzeugende) denkbar. Dadurch würde sich der hier definierte Phasenwinkel verkleinern.

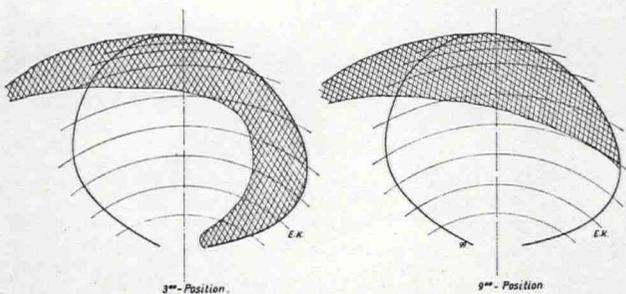


Abb. 20: Steigungsverhältnis  $(P/D)_{0,7} = 1,60$   
Neigung der Propellerwelle zur Tunnelachse  $\varphi = 9^\circ$   
 $\sigma_n = 0,338$   
 $J = 0,611$   
 $KT = 0,509$

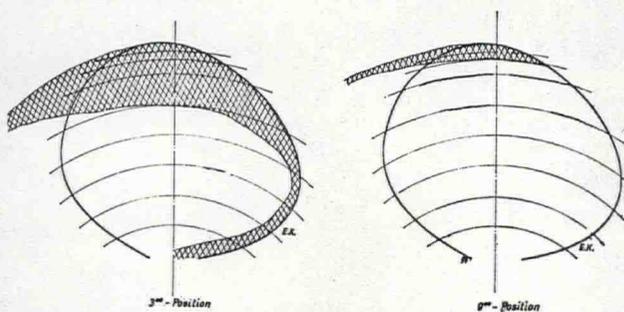


Abb. 21: Steigungsverhältnis  $(P/D)_{0,7} = 1,60$   
Neigung der Propellerwelle zur Tunnelachse  $\varphi = 9^\circ$   
 $\sigma_n = 0,260$   
 $J = 1,01$   
 $KT = 0,321$

### 3.6 Messung der Kräfte am Einzelflügel unter Kavitationsbedingungen

Im Anschluß wurden noch Versuche unter Kavitationsbedingungen gefahren. Als Ergebnis dieser Versuche werden einige Skizzen von der Kavitationsausbildung in der  $3^\circ$  — und der  $9^\circ$  — Position (Abb. 20, 21, 22 und 23) und einige Meßschriebe (Abb. 24 und 25) vorgelegt. Die Größe der Kräfte am Einzelflügel ohne und mit Kavitation ist nur wenig unterschiedlich, wie die anschließende Tabelle zeigt.

Nr.	$\frac{F_{ax}}{T\varphi/4}$	$\frac{F_{tang}}{Q\varphi}$ $4 \cdot x_F \cdot R$	$\frac{F_z}{T\varphi}$	Fortschrittsziffer J	Kav.-Zahl $\sigma_n$
93	1,183	1,157	0,095	1,01	1,883
94	1,095	1,046	0,111	1,01	0,260
95	1,209	1,276	0,203	1,21	1,609
96	1,199	1,230	0,200	1,21	0,223
97	1,641	1,534	0,426	1,41	1,507
98	1,576	1,500	0,404	1,40	0,219

Die Meßschriebe zeigen beim Verlassen der  $3^\circ$  — Position ein Nachschwingen wie in [7] dargelegt. Das ist bei allen Schrieben nicht ganz einheitlich. Die Schriebe sind den Viscorder-Schrieben nachgezeichnet, da diese nicht fiziert werden konnten.

### 4. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird über Messungen der Kräfte in axialer und tangentialer Richtung und des Angriffspunktes der resultierenden Kraft an einem Blatt eines vierflügeligen Modellpropellers berichtet. Die Untersuchungen wurden im großen Kavitationstunnel der HSVA bei axialer Anströmung und bei Neigungen der Propellerwelle gegenüber der Tunnelachse bis zu  $12^\circ$  durchgeführt. Es wurden Schub, Drehmoment, Drehzahl und bei Schräganströmung die Querkraft am Propeller gemessen und bei einigen Versuchen die Kavitationsausbildung beobachtet. Bei Schräg-

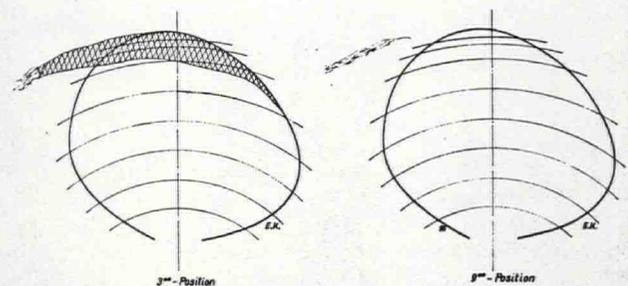


Abb. 22: Steigungsverhältnis  $(P/D)_{0,7} = 1,60$   
Neigung der Propellerwelle zur Tunnelachse  $\varphi = 9^\circ$   
 $\sigma_n = 0,223$   
 $J = 1,21$   
 $KT = 0,231$

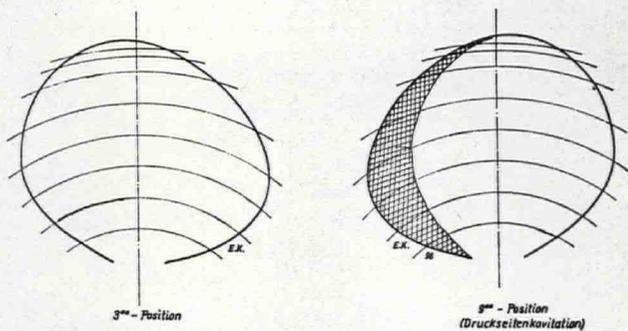


Abb. 23: Steigungsverhältnis  $(P/D)_{0,7} = 1,60$   
Neigung der Propellerwelle zur Tunnelachse  $\varphi = 9^\circ$   
 $\sigma_n = 0,219$   
 $J = 1,40$   
 $KT = 0,139$

anströmung treten während einer Umdrehung periodische Änderungen der Anströmgeschwindigkeit und des Anstellwinkels (Abb. 12) auf, die zu periodischen Kraftschwankungen am Einzelflügel von der Frequenz gleich der Drehzahl führen. Die Kenntnis der Größe dieser periodischen Lasten ist nicht nur wichtig für die Dimensionierung des Wurzelquerschnittes eines Festpropellers oder des Flügelzapfens eines Verstellpropellers, sondern auch für die Festlegung der Lagerkonstruktion, die die bei Schräganströmung entstehenden Querkräfte und Momente aufnehmen soll. Diese Effekte der Schräganströmung treten dabei sowohl bei Fahrzeugen mit geneigter Propellerwelle (Schnellboote, Motorboote u.s.w.) als auch bei Einschraubenschiffen infolge der Hinterschiffsform auf.

3. Die Einzelkräfte am Flügel bei Schräganströmung wachsen ebenso mit zunehmendem Neigungswinkel  $\varphi$  und Fortschrittsgrad. In der vorliegenden Meßanordnung tritt bei rechtsdrehendem Propeller das Kraftmaximum in der  $3^{\circ 00}$  — Position (Steuerbord) und das Kraftminimum in der  $9^{\circ 00}$  — Position (Backbord) auf. Das erklärt die Schubexzentrizität, die ein zusätzliches Moment im Wellenlager bedingt. Bei linksdrehendem Propeller liegt das Kraftmaximum auf Backbord. Die bei Schräganströmung auftretenden periodischen Lasten am Einzelflügel von der Frequenz gleich der Drehzahl sind relativ erheblich größer als die periodischen Lasten des ganzen Propellers von der Frequenz gleich Drehzahl mal Flügelzahl an der Propellerwelle (siehe Abb. 13 und 14).

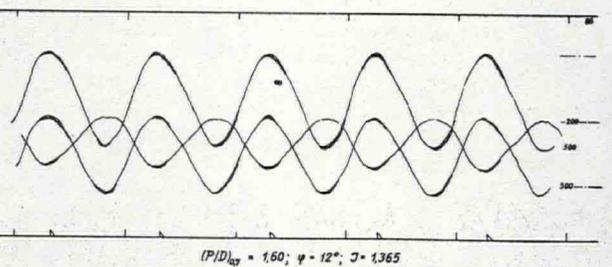
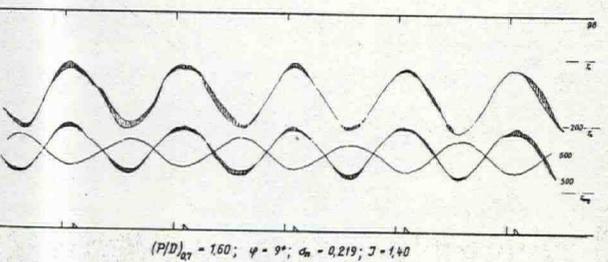
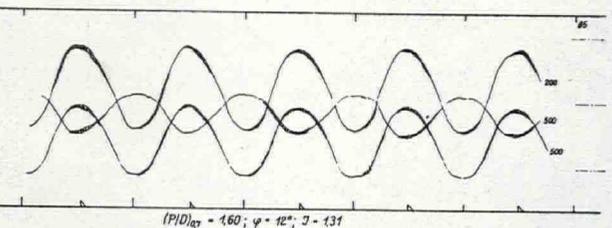
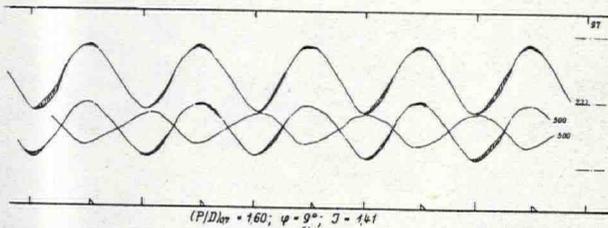
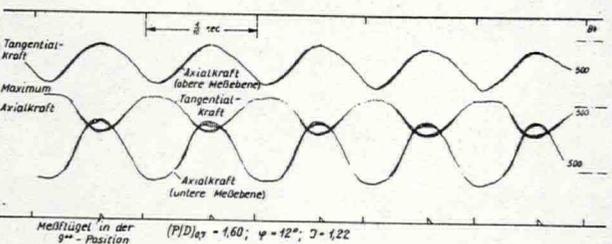
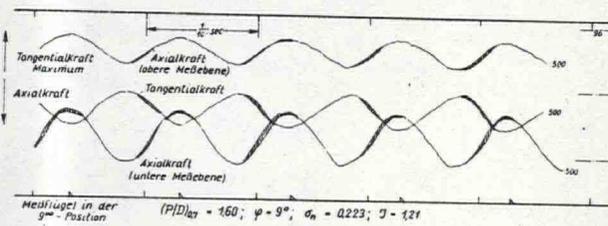
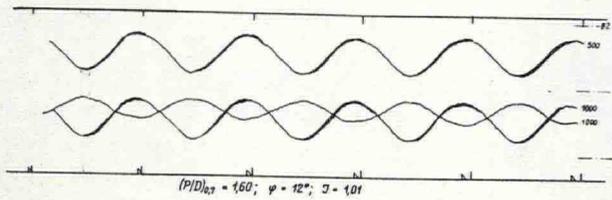
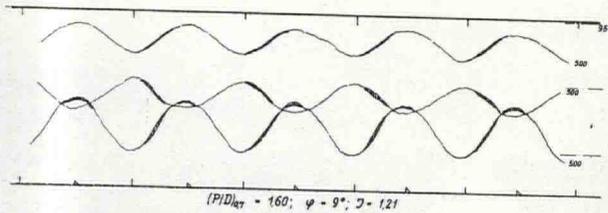


Abb. 24: Meßschieb von zwei Versuchen bei Normaldruck und bei Unterdruck (Kavitation)

Abb. 25: Meßschieb einiger Versuche

Zusammenfassend kann man sagen:

1. Mittlerer Schub und mittleres Drehmoment werden mit zunehmendem Neigungswinkel und Fortschrittsgrad größer als bei axialer Anströmung. Hinsichtlich des Wirkungsgrades siehe Abschnitt 3. 1.
2. Durch die Schräganströmung ist das Auftreten einer Querkraft senkrecht zur Propellerachse bedingt, deren Größe ebenso mit zunehmendem Neigungswinkel und Fortschrittsgrad wächst (s. Abb. 17). Sie ist bei der vorliegenden Meßanordnung nach oben, also der Anströmrichtung entgegengerichtet. Die Drehrichtung des Propellers bleibt ohne Einfluß auf die Querkraftrichtung.

4. Die gemessenen Phasenwinkel sind klein. Die vorliegenden Meßergebnisse sollen durch weitere Untersuchungen bestätigt werden.
5. Die bei Schräganströmung durchgeführten Kavitationsbeobachtungen zeigen ebenfalls den Einfluß der unterschiedlichen Größe der Anströmgeschwindigkeit und des Anstellwinkels in der Steuerbord- und Backbord-Position. In der  $9^{\circ 00}$  — Position z. B. ist die Saugseitenkavitation immer geringer. Mit wachsendem örtlichen Fortschrittsgrad wird die Ausdehnung der Saugseitenkavitation kleiner. Das entspricht einer Verringerung der örtlichen Belastung. Die am Einzelflügel gemessenen Kräfte sind bei Auftreten von Kavitation geringfügig kleiner.

In einer weiteren Arbeit ist geplant, den Versuchsumfang zu erweitern, vor allem auch im Hinblick auf Messungen bei Kavitation und auf die Messungen der hydrodynamischen Flügelmomente. Letztere können bei der hier vorgelegten Meßeinrichtung ohne Verfälschung durch Reibung gemessen werden.

Die Arbeit entstand durch Anregung von Herrn Obering. H. P. Rader (HSVA). Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), die die Mittel für die Durchführung dieser Forschungsarbeit bereitstellte, sei besonders gedankt.

### 5. Bezeichnungen:

Symbol	Dimension	Bezeichnung	Definition
$A_E/A_0$	[ - - ]	Flächenverhältnis	$A_0 = \frac{D^2 \cdot \pi}{4}$
D	[ mm ]	Propellerdurchmesser	
e	[ mm ]	Exzentrizität des Schubmittelpunktes	
$F_{axial}$	[ kp ]	Axialkraft am Einzelflügel	
$F_{tangential}$	[ kp ]	Tangentialkraft am Einzelflügel	
$F_z$	[ kp ]	Querkraft des gesamten Propellers in vertikaler Richtung	
J	[ - - ]	Fortschrittsziffer	$J = \frac{V_A}{n \cdot D}$
$\frac{J}{(P/D)_{0,7}}$	[ - - ]	reduzierte Fortschrittsziffer	
$K_T$	[ - - ]	Schubbeiwert	$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4}$
$K_{T\varphi}$	[ - - ]	Schubbeiwert eines schräg angeströmten Propellers	$K_{T\varphi} = \frac{T\varphi}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4}$
$K_Q$	[ - - ]	Drehmomentbeiwert	$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5}$
$K_{Q\varphi}$	[ - - ]	Drehmomentbeiwert eines schräg angeströmten Propellers	$K_{Q\varphi} = \frac{Q\varphi}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5}$
$K_z$		Querkraftbeiwert eines schräg angeströmten Propellers	$K_z = \frac{F_z}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4}$
n	[ sec <sup>-1</sup> ]	Propellerdrehzahl	
$(P/D)_{0,7}$	[ - - ]	Steigungsverhältnis am Radius 0,7 R	
Q	[ mkp ]	Drehmoment	
$Q\varphi$	[ mkp ]	Drehmoment eines schräg angeströmten Propellers	
$Re_{0,7}$	[ - - ]	Reynoldszahl am Radius 0,7 R	$Re_{0,7} = \frac{n \cdot D^2}{\nu} \left( \frac{1}{D} \right)_{0,7} \cdot \sqrt{J^2 + (0,7\pi)^2}$ $J_B = 0,7 \dots 0,75 (P/D)$

T	[ kp ]	Schub	
$T_\varphi$	[ kp ]	Schub eines schräg angeströmten Propellers	
$x_F$	[ - - ]	Angriffspunkt aus der resultierenden Kraft am Einzelflügel	$x_F = \frac{r_F}{R}$
$x_n$	[ - - ]	dimensionsloser Nabenradius	$x_n = \frac{\text{Nabenradius}}{R}$
$V_A$	[ m/s ]	Fortschrittsgeschwindigkeit	
z	[ - - ]	Anzahl der Propellerflügel	
$\eta_0$	[ - - ]	Wirkungsgrad	$\eta_0 = \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{J}{2\pi}$
$\eta_\varphi$	[ - - ]	Wirkungsgrad des schräg angeströmten Propellers (s. Abb. 10 und 11)	$\eta_\varphi = \frac{K_{T\varphi}}{K_{Q\varphi}} \cdot \frac{J}{2\pi}$
$\nu_0$	[ Hz ]	Eigenfrequenz	
$\sigma_n$	[ - - ]	Kavitationszahl bezogen auf die resultierende Geschwindigkeit	$\sigma_n = \frac{p-e}{\rho/2 (\pi n D)^2 (J^2/\pi^2 + 0,49)}$
$\varphi$	[ ° ]	Wellenneigung zur Tunnelachse	
$\omega$	[ sec <sup>-1</sup> ]	Winkelgeschwindigkeit	$\omega = 2\pi \cdot n$

### 6. Literatur:

- [1] Gutsche, F.: Untersuchung von Schiffsschrauben in schräger Anströmung. Schiffbauforschung 1964
- [2] Bossow, G.: Untersuchung über das hydrodynamische Flügelmoment an Schiffsverstellpropellern. Schiffbauforschung 1962
- [3] Die neue Kavitationsanlage der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt. Schiff und Hafen 1961
- [4] Graff, W.: Über den Einfluß ungleichförmiger Anströmung auf die Schraubenwirkung. STG 1935
- [5] Dathe, H. M.: Über die Verteilung der induzierten Geschwindigkeiten in der Umlaufebene einer schräg angeströmten Luftschraube und ihren Einfluß auf die Luftkraftverteilungen und Blattbeanspruchungen. Z. f. Flugwissenschaft 1963
- [6] Yamazaki, R.: On the Theory of Screw Propellers in Non-Uniform Flows. Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka
- [7] v. Manen, J. D.: Durch die Schraube erregte Schiffsschwingungen. Schiffstechnik 1966
- [8] Lerbs, H. W.: On the Effects of Scale and Roughness on Free Running Propellers. Journal of the American Society of Naval Engineers 1951
- [9] Meyne, K.: Experimentelle Betrachtungen zum Maßstabeffekt bei Modellpropelleruntersuchungen. Schiffstechnik 1968
- [10] Huse, E.: An Experimental Investigation of the Dynamic Forces and Moments on one Blade of a Ship Propeller. Norwegian Ship Model Experiment Tank, 1967
- [11] Wereldsma, R.: Experimental Determination of Thrust Eccentricity, and Transverse Forces, Generated by a Ship Propeller. International Shipbuilding Progress 1962
- [12] Lerbs, H. und Krohn, J.: Beitrag zur Messung von Schub- und Drehmomentenschwankungen. Schiff und Hafen 1957
- [13] Stuntz, G. R., Pien, P. C., Hinterhan, W. B. und Ficken, N. L.: Series 60 - The Effect of Variations in Afterbody Shape upon Resistance, Power, Wake Distribution and Propeller Excited Vibratory Forces. SNAME 1960