

SCHIFFBAUFORSCHUNG

WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE MITTEILUNGEN

Herausgegeben vom Institut für Schiffbau, Rostock
und der Sektion Schiffstechnik der Universität Rostock

Propeller mit voller Saugseitenkavitation - ein Antriebsorgan für schnelle Schiffe

Aus dem Institut für Schiffbau Rostock
Direktor: Dipl.-Ing. *Siegfried Kruppa*

91. Mitteilung der Schiffbau-Versuchsabteilung

Von Dr.-Ing. *Erhard Dörp*

1. Einleitung

Schraubenpropeller als heute noch immer weitverbreitetste Schiffsantriebsmittel sind während ihres Betriebs recht unterschiedlichen Bedingungen ausgesetzt, die, gepaart mit den angestrebten höheren Geschwindigkeiten entsprechend der allgemein erhobenen Forderung nach schnelleren Schiffen, insbesondere zu Kavitationserscheinungen an den Propellern führen.

Da im allgemeinen beim Auftreten von Kavitation jedoch ein Abfallen des Propellerwirkungsgrades sowie gefährliche Schwingungen und insbesondere Zerstörungen des Propellers zu beobachten sind, war es, von wenigen Ausnahmen abgesehen, Aufgabe der Konstrukteure, die Propeller so auszulegen, daß Kavitation gänzlich vermieden bzw. bei nicht mehr vermeidbarer Kavitation deren Ausdehnung auf ein Minimum beschränkt wird.

Über einen bestimmten Geschwindigkeitsbereich hinaus ist aber selbst durch konstruktive Maßnahmen ein Unterdrücken der Kavitation nicht mehr möglich. Damit bestand bzw. besteht auch heute noch die Aufgabe für die Propellerkonstrukteure darin, bei nicht mehr vermeidbarer Kavitation aber deren schädigende Einflüsse unwirksam zu machen bzw. weitestgehend zu verringern. Als eine alternative Lösung hierfür ist der sogenannte Superkavitationspropeller anzusehen, der, bei schnellen Schiffen eingesetzt, den Zustand der vollen Saugseitenkavitation auf den Propellerblättern ausnutzend weder gefährliche Materialzerstörungen und Schwingungen noch bei entsprechend günstiger Formgebung größere Wirkungsgradverluste erleidet.

Es wurden ein herkömmlicher, für kavitationsfreien Betrieb entworfener Propeller und ein Superkavitationspropeller untersucht. Die für beide Propeller ermittelten Propellercharakteristiken lassen deutlich unter Kavitationsbedingungen den Vorteil eines superkavitierenden Propellers gegenüber einem herkömmlichen Propeller erkennen, so daß der Superkavitationspropeller ein Schiffsantriebsmittel der Zukunft sein könnte.

2. Normalpropeller und Superkavitationspropeller

Schraubenpropeller sind auf Grund jahrzehntelanger Erfahrungen und gerade in letzter Zeit auf Grund der verstärkten Berücksichtigung theoretischer Methoden für den Propellerentwurf, einhergehend mit dem infolge des zum Teil hohen Arbeitsaufwandes bei der Anwendung dieser Methoden unvermeidlichen Einsatz der modernen Rechentechnik, zu einem Antriebsmittel entwickelt worden, das sich im Vergleich zu anderen Schiffsantrieben insbesondere durch einen hohen Wirkungsgrad und ein hohes Maß an Zuverlässigkeit der Wirkung bei unterschiedlichsten Betriebsbedingungen auszeichnet.

Diese hervorstechenden Merkmale lassen unschwer verstehen, daß der Schraubenpropeller gegenwärtig noch das weitverbreitetste Antriebsmittel der See- und Flußschiffe ist.

Es gibt aber auch im Verhalten dieser Propeller sowohl bei der Erfüllung einiger gegenwärtiger als auch vieler zukünftiger Antriebsprobleme Begrenzungen. So ist der Bereich, in dem sich die herkömmliche Schiffsschraube nicht als hinreichendes Propulsionsmittel bestätigen konnte, der sehr hoher Schiffsgeschwindigkeiten. Der Grund hierfür muß in dem bei diesen Geschwindigkeiten unvermeidlichen Auftreten von Kavitation am Propeller gesucht werden.

Kavitation tritt immer dann auf, wenn die Geschwindigkeit der Flüssigkeit infolge der Umströmung der Propellerblätter so groß wird, daß der zugehörige Druck in der Flüssigkeit auf den Dampfdruck absinkt, so daß an diesen Stellen das Wasser verdampft, sich also gasgefüllte Hohlräume, die Kavitationsblasen, bilden.

Mit dem Auftreten der Kavitation sinkt einmal der Wirkungsgrad des Propellers und zwar um so stärker je größer das Kavitationsgebiet wird [1].

Zum anderen treten auf den Propellerblättern an den Stellen, wo auf Grund der wieder ansteigenden Drücke in der Flüssigkeit die Kavitationsblasen mit großer

Energiefreigabe zerplatzen, Erosionserscheinungen auf, die im Zusammenspiel mit elektrochemischen Vorgängen im Seewasser zu starken Korrosionserscheinungen mit erheblichen Zerstörungen der Propellerblätter führen [2]. Auf Grund dieser Erscheinungen erwuchs für die Propellerentwicklung die Forderung, die auch heute im allgemeinen noch gültig ist, die Propeller so zu konstruieren, daß Kavitation vermieden wird.

Die gebräuchlichste Methode zur Erfüllung dieser Forderung besteht darin, durch Verwendung sehr flacher Profile für die einzelnen Propellerblattschnitte bei sehr kleinen Anstellwinkeln jedes dieser Profile, also einer geringen Steigung der Propellerblätter, hohe Übergeschwindigkeiten an den Blättern und damit niedrige Drücke zu vermeiden, wobei zur Gewährleistung eines trotzdem hohen Propellerschubes recht breite Flügelblätter gewählt werden (Bild 1).

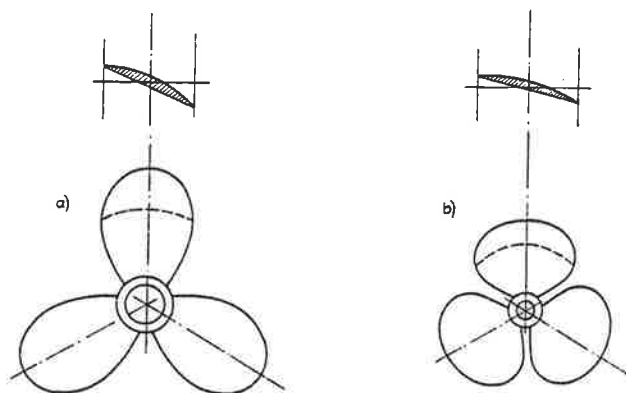


Bild 1. Propeller, a) langsamläufiger Schiffpropeller, b) schnellaufender Schiffpropeller

Nun kann zwar durch derartige konstruktive Maßnahmen das Auftreten von Kavitation bei gleichmäßiger Propelleranströmung hinausgezögert werden. Aber bereits bei den heute schon üblichen Schiffsgeschwindigkeiten und Leistungen der Antriebsmaschinen ist das Auftreten von Kavitation beim Betrieb des Propellers hinter einem Schiff infolge des Durchschlagens der Propellerblätter durch den Nachlaufkern und der dabei auftretenden hohen Unterdruckspitzen auf Grund der großen effektiven Anstellwinkel oft unvermeidlich. Jede Erhöhung der Propellerdrehzahl über einen kritischen Wert hinaus zur gewünschten Steigerung der Schiffsgeschwindigkeit auf Werte von $v_0 > 35$ kn führt dann aber sicher bei jeder Winkelstellung eines jeden Propellerblattes zum Auftreten von Kavitation am Propeller mit all ihren bereits beschriebenen nachteiligen Folgen für Propeller und Schiff.

Damit ergab die Entwicklung im Schiffbau mit ihrem Trend zu höheren Schiffsgeschwindigkeiten zwangsläufig die Notwendigkeit der Entwicklung und des Baues eines neuartigen Propellertyps, falls nicht gar auf völlig neue Antriebsarten zurückgegriffen werden sollte.

Seit mehr als 25 Jahren wird mit von Jahr zu Jahr wachsender Intensität an diesem Problem gearbeitet, und bereits im Jahre 1954 lag nach einem jedoch nur vorläufigen Abschluß umfangreicher theoretischer und experimenteller Untersuchungen der erste Propeller vor, der als Lösung des „Kavitationsproblems“ angesehen werden konnte [3].

Es war dies ein Propeller für schnelle Schiffe, bei dem, da Kavitation ohnehin nicht mehr zu vermeiden war, dem Grundgedanken der gewonnenen theoretischen Erkenntnisse folgend, das Auftreten von Kavitation direkt gefordert wird, und zwar derart, daß der Zustand der vollen Kavitation auf der Saugseite der Propellerblätter erreicht wird. Im Gegensatz zur Ausdehnung der Kavi-

tationsblasen bei teilweiser Kavitation über nur einen begrenzten Teil der Propellerblätter brechen die Kavitationsblasen, deren begrenzende Trennungsfläche im Zustand der vollen Saugseitenkavitation an der scharfen Eintrittskante und an der Hinterkante der Propellerblätter entstehen, erst hinter dem Blatt zusammen, so daß die gesamte Saugseite der Propellerblätter von einer Kavitationsblase bedeckt ist, während die Druckseite voll umströmt wird.

Damit treten bei diesen für den Betrieb im vollkavitierenden Zustand entwickelten Propellern, den sogenannten Superkavitationspropellern (SC-Propeller), weder die bei der Beschreibung der partiellen Kavitation erwähnten gefährlichen Erosionserscheinungen noch die durch die Kavitation hervorgerufenen Schwingungen der Propellerblätter auf. Hierin liegt ein erster Vorteil begründet.

Die bei den herkömmlichen Propellern im Zusammenhang mit der Kavitationsentstehung und weiteren Kavitationsausbildung zu verzeichnenden Wirkungsgradverluste treten natürlich auch bei dem Superkavitationspropeller auf. Es ist dies eine unvermeidliche Erscheinung infolge der sich zuungunsten insbesondere des Propellerschubes verändernden Druckverteilung durch die Kavitation. Mit Hilfe in der Vergangenheit entwickelter linearisierter und nichtlinearisierter Theorien zur Berechnung der Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte von Profilen bei voll ausgebildeter Saugseitenkavitation wurden aber schließlich, ausgehend von Keilprofilen als einfachster Form, Superkavitationsprofile mit sehr günstigen Gleitzahlen gefunden. Mit Propellern, bei denen derartige geeignete Profilformen als Blattschnitte Verwendung fanden, wurden dann beim Zustand voller Saugseitenkavitation Wirkungsgrade erzielt, die in der Größenordnung der Wirkungsgrade guter herkömmlicher Propeller liegen, die in gesunder Strömung, also ohne Kavitation, arbeiten [3], [4]. Mit diesem zweiten Vorteil des Superkavitationspropellers gegenüber einem herkömmlichen Propeller unter der Betriebsbedingung voller Saugseitenkavitation wird trotz einiger auch auftretender Nachteile, die aber mehr fertigungstechnischer Art sind — größere Fertigungsgenauigkeit, höhere Werkstofffestigkeit —, die Ansicht erhärtet, daß der Superkavitationspropeller für den Propellerantrieb schnell fahrender Schiffe die einzige Alternative zu sein scheint.

3. Propellercharakteristiken

Im Folgenden werden die Charakteristiken eines herkömmlichen Propellers und eines Superkavitationspropellers, aufgenommen sowohl im kavitationsfreien Betrieb als bei unterschiedlichen Kavitationsbedingungen, gegenübergestellt, um anhand eines Vergleichs der Propellerwirkungsgrade den Wert des Superkavitationspropellers für den Antrieb schneller Schiffe auch quantitativ nachzuweisen.

Bei dem herkömmlichen Propeller handelt es sich um einen mit Hilfe der Wirbeltheorie entworfenen Verstellpropeller. Der Modellpropeller hat die in Tabelle 1 angegebenen wichtigsten Daten.

Tabelle 1. Verstellpropeller-Modell

Blattzahl:	z	$= 3$
Durchmesser:	D	$= 300 \text{ mm}$
Nabendurchmesser Verhältnis:	$\frac{d_n}{D}$	$= 0,294$
Konstruktionssteigungsverhältnis am Blattschnitt $x = 0,7$:	$\left(\frac{P}{D}\right)_{0,7}$	$= 0,884$
Flächenverhältnis:	$\frac{F_a}{F_0}$	$= 0,326$
Drehrichtung:		links
Blattschnitte:		NACA 16-Profil

Bild 2
Freifahrtversuche im Kavitationskanal mit einem Verstellpropellermodell

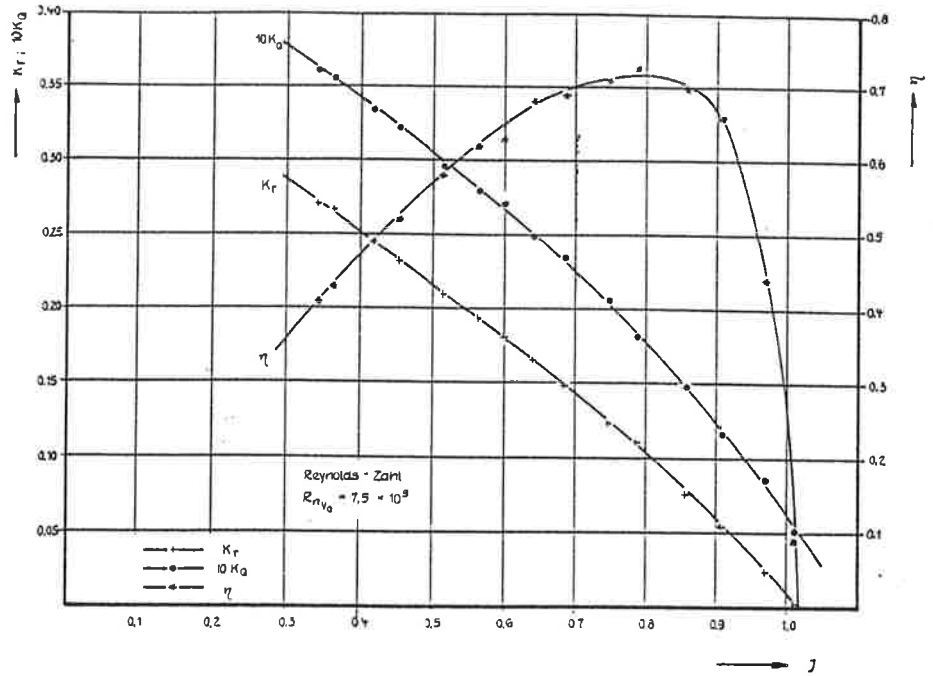
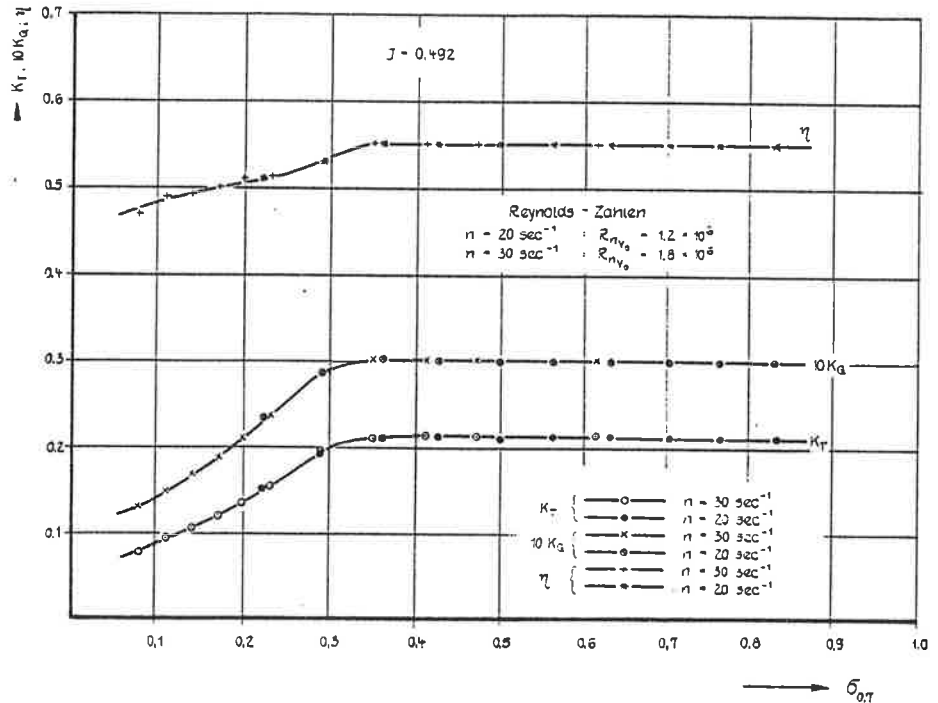


Bild 3
Propellercharakteristiken des Verstellpropellers in Abhängigkeit von $\sigma_{0,7}$ für $J = 0,492$



Dieser Propeller wurde in dem Kavitationskanal des Instituts für Schiffbau Rostock, Schiffbau-Versuchsabteilung, bei Konstruktionssteigung untersucht [5]. Bei dem Meßstreckenquerschnitt dieses Kanals von $F_{\text{Kanal}} = 0,60 \text{ m} \times 0,60 \text{ m}$ ergibt sich mit der Propellerkreisfläche $F_0 = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ ein Flächenverhältnis für die Einschnürung des Kanalquerschnittes durch den Propeller von

$$\frac{F_{\text{Kanal}}}{F_0} = 1,244$$

Gemessen wurden der Schub T und das Moment Q . Auf Bild 2 sind die aus diesen Meßwerten ermittelten Propellerbeiwerte

Schubbeiwert

$$k_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (1)$$

Momentenbeiwert

$$k_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (2)$$

Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{k_T}{k_Q} \quad (3)$$

in Form der Freifahrtkurven über dem Fortschrittsgrad

$$J = \frac{v_0}{n \cdot D} \quad (4)$$

dargestellt. Die auf die resultierende Geschwindigkeit V_0 am Blattschnitt $x = 0,7$

$$V_{0,7} = \sqrt{v_0^2 + (0,7 \pi n D)^2} \quad (5)$$

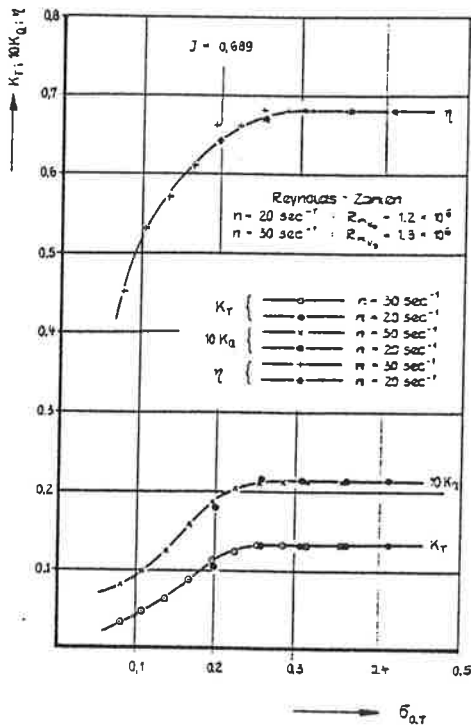


Bild 4. Propellercharakteristiken des Verstellpropellers in Abhängigkeit von $\sigma_{0,7}$ für $J = 0,689$

bezogene Reynoldssche Zahl betrug bei diesen Versuchen

$$R_{nV_0} = \frac{V_{0,7} \cdot l_{0,7}}{\nu} = 7,5 \cdot 10^5 \quad (6)$$

In den Bildern 3 und 4 sind die Propellerbeiwerte für zwei Fortschrittsgrade $J = 0,492$ und $J = 0,689$ in Abhängigkeit von der auf die resultierende Geschwindigkeit $V_{0,7}$ [Gl. (5)] bezogenen Kavitationszahl

$$\sigma_{0,7} = \frac{p_0 - p_D}{\rho/2(V_{0,7})^2} \quad (7)$$

dargestellt. In Gl. (7) bedeuten p_0 den Druck auf der Höhe der Mitte der Propellerwelle und p_D den Dampfdruck der Flüssigkeit mit der Dichte ρ .

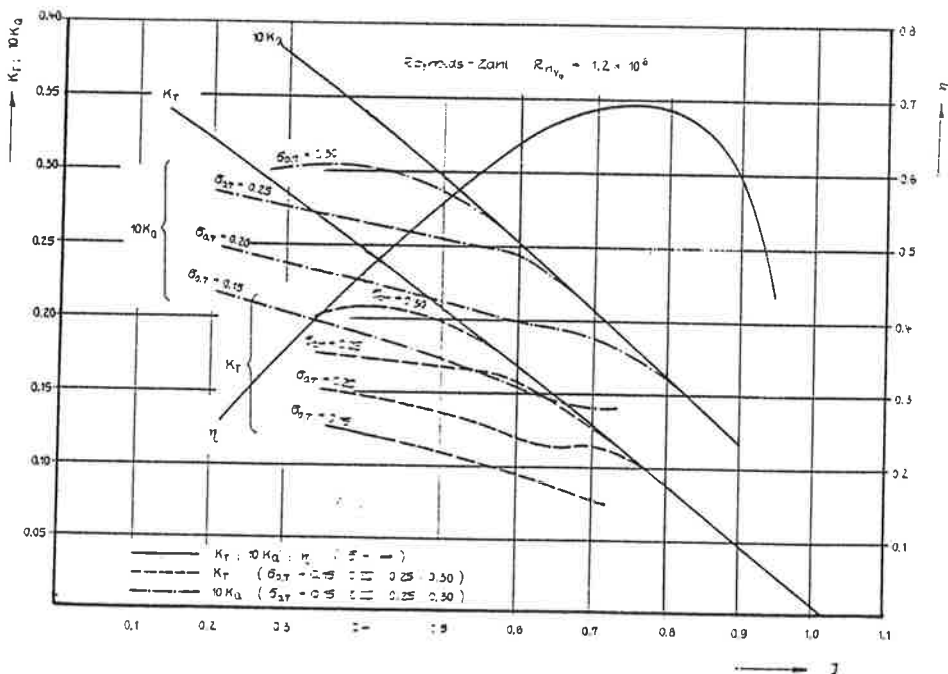


Bild 5. Propellercharakteristiken des Verstellpropellers in Abhängigkeit vom Fortschrittsgrad J

Die Kavitationsversuche wurden bei Reynolds-Zahlen von $R_{nV_0} = 1,2 \cdot 10^6$ bzw. $R_{nV_0} = 1,8 \cdot 10^6$ durchgeführt.

Aus den Bildern 3 und 4 und Bild 5, in der die Propellercharakteristiken in Abhängigkeit vom Fortschrittsgrad J für verschiedene konstante Kavitationszahlen $\sigma_{0,7}$ im Bereich der vollen Kavitation (z. B. bei $\sigma_{0,7} = 0,15$ auftretend für $J \leq 0,5$), der partiellen Kavitation und für den nichtkavitierenden Fall bei $\sigma = \infty$ dargestellt sind, wird der mit sinkender Kavitationszahl wachsende Einfluß der Kavitation auf die Propellerbeiwerte deutlich sichtbar.

Die Untersuchung des Superkavitationspropellers, dessen Hauptabmessungen in Tabelle 2 dargestellt sind,

Tabelle 2. Superkavitationspropeller-Modell

Blattzahl:	$z = 3$
Durchmesser:	$D = 156 \text{ mm}$
Nabendurchmesser Verhältnis:	$\frac{d_n}{D} = 0,25$
Steigungsverhältnis bei $x = 0,7$:	$\left(\frac{P}{D}\right)_{0,7} = 1,533$
Flächenverhältnis:	$\frac{F_a}{F_0} = 0,444$
Drehrichtung:	rechts
Blattschnitte:	Tulin-Burkart-Profile

erfolgte im Kavitationskanal des Strömungslabors an der Sektion Schiffstechnik der Universität Rostock [3].

Bei seinem Meßstreckenquerschnitt von $F_{\text{Kanal}} = 0,30 \text{ m} \times 0,30 \text{ m}$ ergibt sich hier ein Flächenverhältnis für die Einschnürung des Kanalquerschnittes durch den Propeller von

$$\frac{F_{\text{Kanal}}}{F_0} = 1,268$$

In den Bildern 6 und 7 sind die aus den Experimenten gewonnenen Propellercharakteristiken für zwei Fortschrittsgrade, $J = 0,9$ und $J = 1,05$, in Abhängigkeit von der Kavitationszahl $\sigma_{0,7}$ dargestellt.

Ähnlich wie in den Bildern 3 und 4, geltend für den als nichtkavitierenden Propeller entworfenen Propeller, zeigt sich auch hier der Einfluß der Kavitation auf die Propellerbeiwerte, wobei allerdings die Änderung des

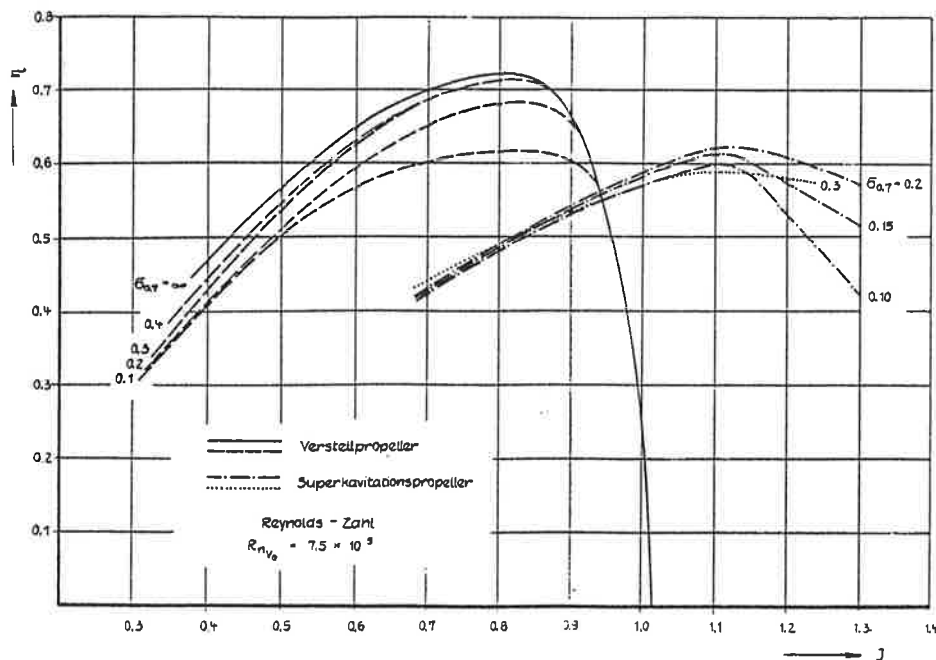


Bild 9
Wirkungsgrade eines Normalpropellers und eines Superkavitationspropellers bei mehreren Kavitationszahlen

Die besten Wirkungsgrade eines SC-Propellers werden also bei der größtmöglichen Kavitationszahl $\sigma_{0,7}$ und dem größten Fortschrittsgrad erreicht, bei denen gerade noch der Zustand der vollen Saugseitenkavitation am gesamten Propellerblatt erreicht wird. Dieses folgt aus der Tatsache, daß die günstigste Gleitzahl bei der Umströmung eines Profils mit Kavitation unmittelbar vor dem Übergang von der vollen zur partiellen Kavitation auftritt. Hieraus erklärt sich auch sofort die Formgebung der Blattschnitte von SC-Propellern, von denen als Beispiel hier ein Tulin-Burkart-Profil dargestellt wird, wie es beim untersuchten Propeller Verwendung gefunden hat.

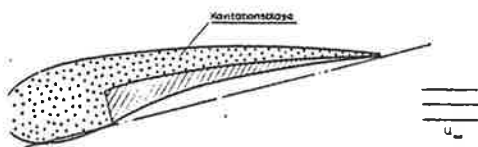


Bild 10. Tulin-Burkart-Profil mit voller Saugseitenkavitation

Die Form der voll umströmten Unterseite entscheidet allein über die Profiltüte, während die scharfe Eintrittskante die Ausbildung des Zustandes der vollen Saugseitenkavitation bei genügend niedrigen Kavitationszahlen auch noch bei sehr kleinen Anstellwinkeln, bzw. beim Propellerbetrieb dem gleichkommend bei möglichst großen Fortschrittsgraden, gewährleisten soll.

Da auf Grund der Profilform herkömmlicher Propeller, bei denen ja Kavitation vermieden werden soll und wo gerade unter diesen Bedingungen einer gesunden Umströmung der Propellerblätter die besten Propellerwirkungsgrade erzielt werden sollen, der Zustand der vollen Saugseitenkavitation bei ihnen bei viel niedrigeren Kavitationszahlen als bei einem vergleichbaren SC-Propeller erreicht wird, tritt in Bild 9 der Vorteil des Superkavitationspropellers gegenüber dem Normalpropeller ganz augenscheinlich hervor.

So hat zwar der Normalpropeller bei kavitationsfreiem Betrieb einen etwa 15% höheren maximalen Wirkungsgrad als der Superkavitationspropeller bei voller Saug-

seitenkavitation (im kavitationsfreien Betrieb ist der Wirkungsgrad des SC-Propellers noch niedriger). Bei $\sigma_{0,7} \leq 0,15$ werden aber mit dem SC-Propeller bereits gleich große oder sogar größere Wirkungsgrade erzielt als mit dem Verstellpropeller bei gleicher Kavitationszahl. Hinzu kommt, daß der Verstellpropeller z. B. bei $\sigma_{0,7} = 0,15$, wo die maximalen Wirkungsgrade beider Propeller noch etwa gleich groß sind, aber nur bei den niedrigen Fortschrittsgraden $J \leq 0,5$ volle Kavitation auf der Saugseite der Propellerblätter aufzuweisen hat, während bei $J > 0,65$ partielle Kavitation und bei $J > 0,65$ auch noch Druckseitenkavitation auftritt, die dann eine zusätzliche Gefährdung des Propellers durch Materialzerstörung und Schwingungen mit sich bringen.

Damit zeigt diese Gegenüberstellung der Wirkungsgrade eines herkömmlichen Propellers und eines Superkavitationspropellers in Verbindung mit den in Abschnitt 2 dargelegten Folgen der Kavitation für den Propellerbetrieb mit aller Deutlichkeit die große Bedeutung von Superkavitationspropellern für den Einsatz auf schnellen Schiffen.

5. Zusammenfassung

Mit dem Auftreten von Kavitation am Propeller gehen Materialzerstörungen, Schwingungen, verbunden mit störenden Geräuschen und Wirkungsgradverluste einher, die selbst durch konstruktive Maßnahmen am Propeller, durch welche die Entstehung von Kavitationsblasen unterdrückt werden soll, bei hohen Schiffsgeschwindigkeiten nicht mehr zu vermeiden sind.

Einen Ausweg zeigt der Superkavitationspropeller, bei dem das Auftreten von voller Saugseitenkavitation gefordert wird. Da bei diesen Propellern weder Materialzerstörungen noch Schwingungen auftreten und, wie anhand der aus Messungen gewonnenen Propellercharakteristiken eines derartigen SC-Propellers und eines für kavitationsfreien Betrieb entworfenen herkömmlichen Propellers gezeigt werden kann, die Wirkungsgrade in der Größenordnung der Wirkungsgrade der durch Kavitation gefährdeten herkömmlichen Propeller liegen, können diese Superkavitationspropeller als Alternative für den Propellerantrieb schnellfahrender Schiffe angesehen werden.

Bezeichnungen

$D = 2 R$	Propellerdurchmesser
F_{kanal}	Kanalquerschnittsfläche
$F_0 = \pi \cdot R^2$	Propellerkreisfläche
$J = \frac{v_0}{n \cdot D}$	Fortschrittsgrad
$k_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5}$	Momentenbeiwert
$k_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4}$	Schubbeiwert
$l_{0,7}$	Blattschnittlänge bei $x = 0,7$
n	Propellerdrehzahl
p_D	Dampfdruck
p_0	Druck in der ungestörten Strömung
Q	Propellermoment
$Rn v_0 = \frac{V_{0,7} \cdot l_{0,7}}{\nu}$	Reynolds-Zahl
T	Propellerschub
$V_{0,7} = \sqrt{v_0^2 + (0,7 \pi \cdot n D)^2}$	resultierende Geschwindigkeit am Blattschnitt $x = 0,7$
v_0	Geschwindigkeit der ungestörten Anströmung

$x = \frac{r}{R}$	dimensionsloser Propeller-radius
$\eta = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{k_T}{k_Q}$	Propellerwirkungsgrad
ν	kinematische Zähigkeit der Flüssigkeit
ρ	Dichte der Flüssigkeit
$\sigma_{0,7} = \frac{p_0 - p_D}{\rho/2 (V_{0,7})^2}$	Kavitationszahl am Blattschnitt $x = 0,7$

Literatur

- [1] Schmitz, G.: Profilgleitzahlen und Wirkungsgrad von Schiffspropellern bei voller Saugseitenkavitation. Wissenschaftliche Zeitschrift der Universität Rostock, Math.-Naturwiss. Reihe (1959/60) 1.
- [2] Eisenberg, Ph.: Kavitation. Forschungshefte für Schiffstechnik, 1952, Schifffahrts-Verlag „Hansa“.
- [3] Dörp, E.: Propeller bei voller Saugseitenkavitation und Wirbeltheorie des Propellers. Schiffbauforschung, Rostock 11 (1972) 5/6.
- [4] Schmitz, G.: Fortschritte der Hydromechanik des Schiffes in Theorie und Experiment. ZAMM 52 (1972) 10.
- [5] Dörp, E.: Versuche im Kavitationskanal mit Modellen von 3 Verstellpropellern. Versuchsbericht Nr. 853, Institut für Schiffbau Rostock, Schiffbau-Versuchsabteilung, Juni 1973.