

Volkseigener Schiffbau
Schiffbau-Versuchsanstalt

Zweigstelle des VEB Schiffbau-Projekt- und Konstruktionsbüros Berlin
6. Mittellung der Schiffbau-Versuchsanstalt

Kavitationsprobleme an Schiffsschrauben

Von Dr.-Ing. FRITZ GUTSCHE, Berlin

DK 629.12.087.1:532.528

Seit etwa 60 Jahren, von den Tagen der Probefahrten des englischen Minenlegers „Daring“ an, beschäftigen sich die Schiffbauer mit dem Problem der Kavitation. Damals wie heute ist es die Forderung nach Steigerung der Wellenleistung, die den Schraubenkonstrukteur bei Überschreitung einer gewissen Grenze vor eine schwierige Aufgabe stellt. Waren es damals Fragen der Leistungssteigerung, die dem Konstrukteur zu schaffen machten, so sind es heute Probleme des Wirkungsgrades und der Festigkeit, die zu intensiver Beschäftigung mit den einschlägigen Fragen zwingen. Zwar haben die Ergebnisse der Strömungsforschung in den Kavitationstanks mancherlei Aufklärung gebracht, die Größe des Wirkungsgrades durch die Art der Formgebung in gewisser Weise zu beeinflussen. Es ist jedoch bis heute nicht oder doch nur bis zu einem gewissen Grade gelungen, das Wesen der mit dem Auftreten der Kavitation an den Schraubenflügeln verbundenen Zerstörungserscheinungen aufzuklären.

1. Erörterung der allgemeinen Erscheinungen

Wird eine Schiffsschraube von langsamen Umdrehungen beginnend mit stetig sich steigender Drehzahl angetrieben, so erreicht man bald eine gewisse Drehzahl, bei der sich am Schraubenflügel an den Stellen geringsten Druckes beginnend Luftbläschen aus dem Wasser abscheiden, die mit dem Schraubenstrahl davonschwimmen. Dieser physikalisch sehr einfache Vorgang, und zwar der Ablösevorgang der Luftbläschen von der Blattoberfläche, ist die Ursache des bekannten Schraubengeräusches, dessen Frequenzspektrum den ganzen hörbaren Bereich bestreicht und weit darüber hinaus in den akustisch mit dem menschlichen Hörorgan nicht mehr wahrnehmbaren Bereich der Frequenzen bis zu einigen Zehntausenden Hertz reicht. Wird die Drehzahl weiter gesteigert, so treten zu den immer zahlreicher auftretenden Luftbläschen Dampfblasen des Wassers hinzu, die aber im Gegensatz zu den abschwimmenden Luftblasen nur eine kurze Lebensdauer haben und bei ihrer Wanderung über das Schraubenblatt bei Eintritt in Gebiete höheren Druckes wieder kondensieren. Diese Kondensation kann je nach Formgebung der Schraubenblätter und ihrer Belastung auf oder hinter dem Flügelblatt erfolgen. In beiden Fällen ist der Zusammensturz der Dampfblasen mit einer heftigen Druckschwankung verknüpft, die sich als intensives akustisches Signal — als Knattern, Schlagen oder Prasseln — nach außen hin bemerkbar macht. Spielt sich der Kondensationsvorgang auf der Flügeloberfläche ab, dann hinterläßt er üblicherweise nach einiger Zeit örtlich eng begrenzte Anfressungen an den Flügelblättern, die zur völligen Zerstörung des Materials führen können. Bei entsprechend großer Ausdehnung der Kavitationsblasen und Lage ihrer Kondensationszonen im Bereich der austretenden Flügelkante können heftige mechanische Vibrationen der ganzen Propellerflügel erzeugt werden, die sich auf das hintere Wellenlager und damit auf das Hinterschiff übertragen. Die geschilderten Erscheinungen treten mit zunehmend gesteigerter Drehzahl zuerst an den Flügelspitzen auf, um sich dann mehr und mehr auf die weiter innen liegenden Zonen der Schraubenblätter auszudehnen. Wird die Schraubendrehzahl noch weiter gesteigert, so erreicht man bald einen Drehzahlbereich, in dem die ganzen Flügelblätter von der Nabe bis zur Flügelspitze voll kavitieren und nur noch die Druckseiten vom Wasser benetzt werden, während die

Saugseiten unbenetzt in den dämpferfüllten Hohlraum hineinreichen, der sich erst weit hinter der Schraubenebene wieder schließt. Dieser Arbeitszustand der Schraubenflügel läßt sich zweckmäßig kennzeichnen als Betriebszustand mit voller Saugseitenkavitation, im englischen Sprachgebrauch wird er „super cavitation“ genannt.

Bild 1 zeigt die Aufnahme eines in einem Kavitationskanal arbeitenden Modellpropellers in dem Stadium, wo ein kleiner Bereich an den Spitzen der Flügelblätter bereits mit voller Saugseitenkavitation arbeitet, während sich im inneren Bereich der Flügelblätter auf der Saugseite einige isolierte Kavitationsblasen bilden. Sehr deutlich kann man an der Ausbildung der Flügelspitzenwirbel erkennen, wie diese am umlaufenden Flügel selbst (auf den Beschauer zulaufenden unteren Flügel) stark milchig wirken und erst in einem ge-

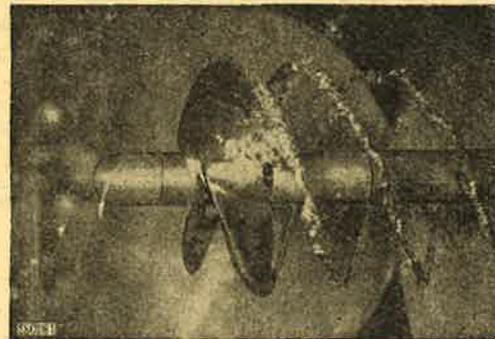


Bild 1. Kavitierender Modellpropeller [1]

wissen Abstand hinter der Schraube ein glänzendes Aussehen von blasen- oder röhrenförmigen Hohlräumen mit gut das Licht reflektierenden Oberflächen annehmen. Man kann hieraus schließen, daß die Hohlräume der Spitzenwirbel am Flügel selbst und in unmittelbarer Nähe mit einem Wasserdampf-Luft-Gemisch angefüllt sind, aus dem sich mit zunehmendem Abstand von der Schraube der Wasserdampf kondensiert, so daß in größerer Entfernung nur noch mit Luft gefüllte Hohlräume übrig bleiben.

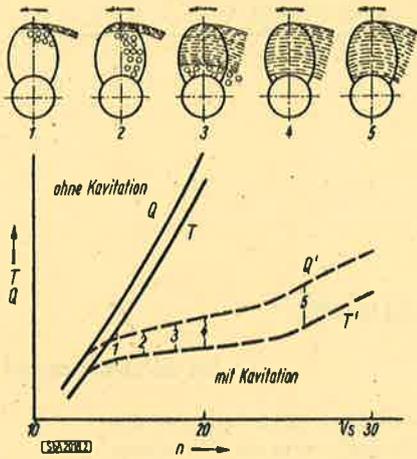


Bild 2
Schub und Drehmoment
für Schrauben ohne und
mit Kavitation [1]

Bild 2 zeigt den Verlauf der am Propeller gemessenen Kräfte für eine Modellschraube, die bei gleicher Fortschrittziffer $\frac{v}{n \cdot D}$ als alleinfahrende Schraube

- einmal ohne Kavitationserscheinungen und
- mit auftretender Kavitation bei verschiedenen Drehgeschwindigkeiten untersucht wurde.

Während bei den Messungen ohne Kavitationserscheinungen (Fall a) Schub und Drehmoment des Propellers proportional dem Quadrat der Drehzahl ansteigen, bleiben die Meßwerte bei auftretender Kavitation nach Überschreiten einer gewissen Drehzahl unter diesen, wobei es vorkommen kann, daß der Schub in einem gewissen Bereich mit steigender Drehzahl überhaupt nicht mehr zunimmt. Erst nach Überschreiten einer zweiten Grenze steigt er dann mit steigender Drehzahl wieder an. Die Erklärung für dieses Verhalten liefert die gleichzeitig vorgenommene Beobachtung der Kavitationserscheinungen, deren Ergebnisse in den schematischen Skizzen in Bild 2 angedeutet sind.

Während die untere Grenze des Drehzahlbereiches, bei der die Abweichung der Schraubenkräfte beginnt, mit dem Beginn der vollen Saugseitenkavitation an der Flügelspitze zusammenfällt, ist die obere Grenze des Drehzahlbereiches mit dem Kavitationszustand verknüpft, in dem die ganze Saugseite von der Nabe bis zur Spitze volle Saugseitenkavitation aufweist. Mit der Änderung der Propellerkräfte ist naturgemäß auch eine Änderung des Schraubenwirkungsgrades verknüpft,

allerdings bei weitem nicht in so starkem Maße wie bei den Kräften.

2. Rechnerische Bestimmung der Kavitationseinflüsse

Die rechnerische Bestimmung der Geschwindigkeiten, Drücke und Anstellwinkel nach der Schraubenwirbeltheorie gibt die Möglichkeit, die Kavitationserscheinungen am einzelnen Blattschnitt der Schraubenflügel zu untersuchen. Mit Kenntnis des Druckverlaufes über die einzelnen Schraubenblattschnitte in Abhängigkeit vom Anstellwinkel α oder Auftriebsbeiwert c_a kann man die relative Anströmgeschwindigkeit des Blattschnittes oder die Drehzahl der Schraube bestimmen, bei deren Überschreitung Luftabscheidung bzw. Dampfausscheidung aus dem Wasser auftritt.

Bezeichnet p_{krit} den absoluten Druck, bei dessen Unterschreitung die Luft- bzw. Dampfausscheidung beginnt, so darf der Druck p an keiner Stelle der Flügeloberfläche auf diesen Druck absinken, um Kavitationsbildung zu vermeiden. Bezeichnet weiterhin p_0 den statischen Druck (verabredungsgemäß auf Mitte Welle oder an dem zu prüfenden Schnitt in seiner höchsten Stellung), so wird $p = p_0 + \Delta p$, wobei sich die Druckänderung Δp aus den bekannten Druckverteilungsmessungen an Profilen im Windkanal $\frac{\Delta p}{q} = f\left(\alpha; \frac{x}{l}\right)$

und $q = \frac{\rho}{2} w^2$ ergibt, wobei w die Relativgeschwindigkeit am Ort des untersuchten Flügelschnittes bedeutet.

Kennzeichnet man mit $\frac{\Delta p_{min}}{q}$ den auf den Staudruck q der Anströmung bezogenen tiefsten Wert der Drucksenkung auf der Profilloberfläche, so muß zur Vermeidung von Kavitation die Ungleichung erfüllt sein:

$$p_{krit} > p_0 + \frac{\Delta p_{min}}{q} \cdot q,$$

woraus sich das Kavitations-Kriterium ergibt

$$-\frac{\Delta p_{min}}{q} < \frac{p_0 - p_{krit}}{q}$$

oder mit der von Thoma eingeführten Kavitationszahl

$\sigma = \frac{p_0 - e}{q}$, in der für den kritischen Druck der Dampfdruck des Wassers $e = p_{krit}$ gesetzt ist,

$$-\frac{\Delta p_{min}}{q} < \sigma.$$

Aus den Druckverteilungsmessungen einer systematischen Profierreihe, von denen als Beispiel die Einzel-

Bild 3. Druckverteilung an Kreisabschnitt- und Tragflügelprofil bei gleichem Anstellwinkel [2]

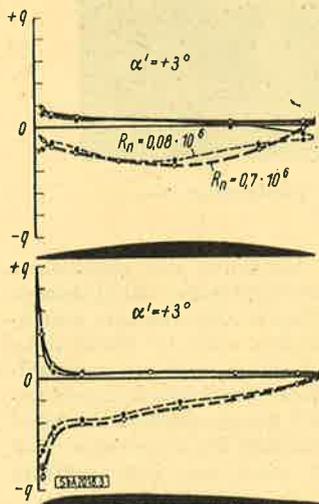
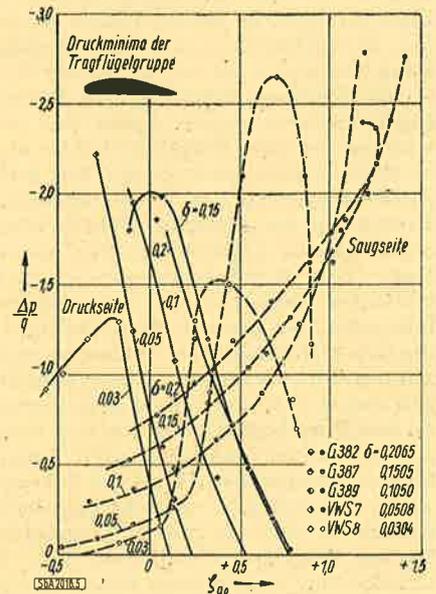
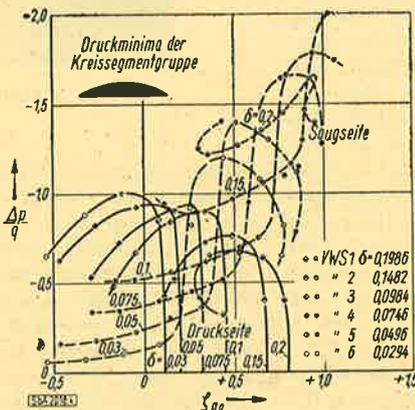


Bild 4 (unten). Druckminima der Kreissegmentgruppe [2]

Bild 5 (rechts). Druckminima der Tragflügelgruppe [2]



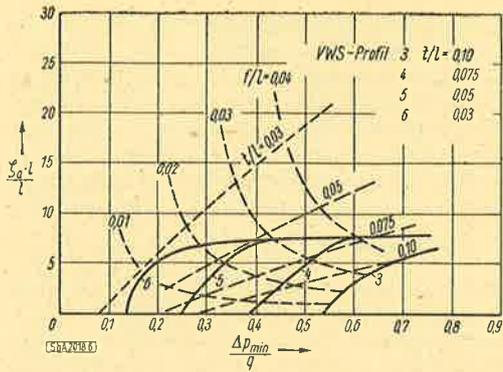


Bild 6 (links). Druckminima der Karman-Treffitz-Profile bei stoßfreier Anströmung im Vergleich mit den Druckminima nach Bild 4

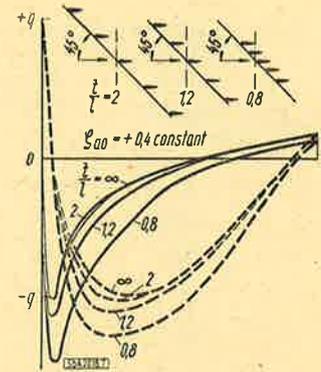


Bild 7 (rechts). Druckverteilung an dem Tragflügelprofil VWS 12 ($s/l = 0,10$) bei gleichbleibendem Auftriebsbeiwert $C_{a0} = 0,4$ und verschiedener Gitterteilung t/l [3]

messungen an einem Kreisabschnittprofil und einem üblichen Tragflügelprofil vom gleichen Dickenverhältnis bei gleichem Anstellwinkel in Bild 3 dargestellt sind, wurden die Diagramme Bild 4 und 5 zusammengestellt.

Sie geben die Werte $\frac{\Delta p_{\min}}{q}$ für die Saug- und Druckseite der untersuchten Profile in Abhängigkeit vom Auftriebsbeiwert ζ_a an und können daher in dieser oder in einer von anderer Seite etwas anders gebrachten Darstellungsart als Rechenunterlagen für die Beurteilung des Kavitationseinsatzes dienen.

Vergleicht man die experimentell für die Kreisabschnittgruppe gefundenen Werte mit den theoretisch gerechneten Werten für Kreiszweiecke nach dem von Karman-Treffitz angegebenen Verfahren für stoßfreien Eintritt (Bild 6), so darf man die Übereinstimmung der für stoßfreien Anstellwinkel geltenden Werte recht zufriedenstellend nennen. (Der Wölbungsparameter der Profile VWS 3 ... 6 mit nicht gekrümmter Druckseite

ist bei diesem Vergleich $\frac{f}{l} = \frac{t}{2l}$ zu setzen.)

Messungen der Druckverteilung an Profilen, die in Gitterstellung untersucht wurden (Bild 7), zeigen bei enger Stellung der Profile eine Erhöhung der Druckabsenkung, die im wesentlichen auf die Verengung der Strömungsquerschnitte durch die Profildicke zurückzuführen ist. Im Bereich der Flügelwurzel ergeben sich bei Schiffsschrauben sehr oft ähnliche Gitterstellungen, so daß bei Untersuchung dieser Schnitte auch hierauf Rücksicht genommen werden muß. Bei der Nachprüfung der in den äußeren Blattzonen vor allem der Kavitation ausgesetzten Blattanschnitten spielt dieser Gittereinfluß im allgemeinen eine nur untergeordnete Rolle.

Außer den bisher behandelten Beobachtungsergebnissen existieren einige Ergebnisse, die an Profilen im Kavitationskanal bei mehr oder weniger stark ausgebildeter Kavitationserscheinung gewonnen wurden [4] [5]. Aus den von Walchner an drei Profilen beobachteten Werten für die Ausdehnung der Kavitationszonen auf der Saug- und Druckseite lassen sich bei Annahme einiger Vereinfachungen für die Abhängigkeit des Auftriebs- und Profildruckwiderstandes von Anstellwinkel und Kavitationszahl Beziehungen aufstellen, deren Anwendung in der Propellerberechnung auch die Betriebszustände der Schrauben bei teilweise und voll ausgebildeter Kavitation erfaßt. Daß hierbei im Grenzfall rein formal physikalische Abnormitäten auftreten, wie etwa $\zeta_a = \sigma$ für ein sehr dünnes Profil bei $\alpha = 0^\circ$, mindert den Wert der Näherungsformel nicht im geringsten. Diese Grenzfälle sind in den zur Benutzung kommenden Diagrammen sowieso ausgeschaltet, da hierfür keine Beobachtungswerte vorliegen. In Verbindung mit der vom Bericht bereits früher durchgeführten Aufteilung des Profildruckwiderstandes in seine beiden Anteile, den Oberflächenreibungswiderstand und den durch Ablösungserscheinungen bedingten Druck- oder Normalwiderstand gelingt es, hierbei auch den

Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit auf Schub- und Drehmoment rechnerisch angenähert zu erfassen (Bild 8).

Die Anwendung dieser Näherungsrechnung auf die Bestimmung des Profildruckwiderstandes zeigt, daß dünne Kreisabschnittprofile bei Kavitation in einigen Betriebszuständen sogar günstiger sein können als ohne Kavitation, wie es auch die Messungen von Walchner bestätigen.

In Bild 9 sind beispielsweise die für den Wirkungsgrad einer Schraube ausschlaggebenden Gleitzahlen ε in Abhängigkeit von der Auftriebszahl ζ_{a0} für drei verschieden dicke Profile, einmal ohne Kavitation (ausgezogen), dargestellt. Für die Profile ohne Kavitation wurden die Normalwiderstandsbeiwerte nach [2] benutzt; die Reibungsbeiwerte sind für beide Fälle gleich groß.

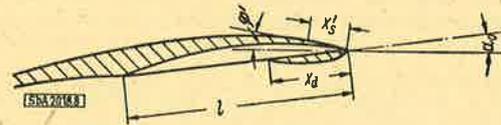


Bild 8. Kreisabschnitt bei vollausgebildeter Saugseiten- und teilweise ausgebildeter Druckseitenkavitation; Einsatzpunkt der Saugseitenkavitation hinter Profilkante $x'_s > 0$ (schematisch)

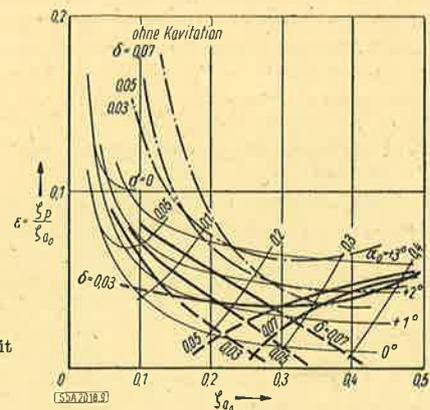


Bild 9
Profilgleitzahlen ε mit und ohne Kavitation

Die Darstellung zeigt, daß die Profile mit Kavitation im Bereich niedriger Auftriebsbeiwerte den ohne Kavitation angeströmten Profilen überlegen sind. Der Grund hierfür ist einfach in der Tatsache zu suchen, daß die in der Kavitationsblase liegende Saugseite des Profils nicht von Wasser benetzt wird und daher auf dieser Profilstelle kein Oberflächenreibungswiderstand entsteht. Hierbei ist allerdings zu bemerken, daß für die kavitierenden Profile messerscharfe Eintrittskanten angenommen wurden. Jede Zunahme der Kantendicke t' macht sich bei der an der Vorkante ablösenden Strömung unmittelbar mit einer Zunahme des Profildruckwiderstandes um $\Delta \zeta_p \approx \frac{\Delta t'}{l}$ bemerkbar.

An dieser Stelle sei auch auf den Einfluß der Schräganströmung hingewiesen, der sich bei Blattanschnitten

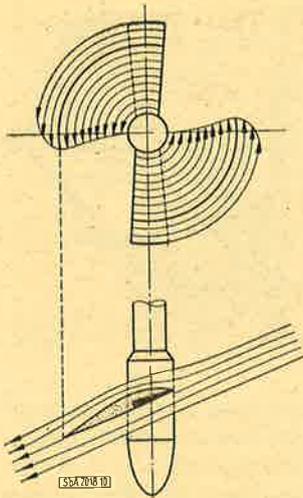


Bild 10. Zweiflügelige Schraube mit Überkavitation [6]

im äußeren Bereich der Flügelblätter derart zeigt, daß die Druckverteilung an der Flügelvorkante wegen der hier wirksam werdenden räumlichen Umströmung nicht die großen Druckunterschiede aufweist, wie sie bei eben angeströmten Profilen bei gleichem rechnerischen Anstellwinkel auftreten. Für rechnerische Untersuchungen wird man an diesen Stellen zweckmäßig mit der Druckverteilung rechnen, die sich an dem gleichen Profil bei Schräganströmung einstellt, wobei die Verhältniszahlen

$$\frac{\Delta p \vartheta}{q} = \frac{\Delta p}{q} \cdot \cos^2 \vartheta$$

wenn ϑ den Winkel der Anblasrichtung gegen die Normale zur eintretenden Flügelkante bedeutet.

Da das Wasser auf der Saugseite unter Bildung eines freien Strahles nach hinten abströmt, spielt die bei anliegender Strömung so wichtige Formgebung der Saugseitenkontur keine Rolle mehr, und man könnte den Blattschnitt lediglich nach Gesichtspunkten der Flügelfestigkeit gestalten. Dies gilt uneingeschränkt allerdings nur für Propeller, die nicht rückwärts zu arbeiten brauchen, da bei Rückwärtslauf die austretende Kante zur eintretenden wird.

Es ist dem Berichterstatter erst jetzt bekannt geworden, daß auch *Posdunin* [6] bereits vor 10 Jahren diesen Gedanken verfolgt und in einigen Propellermodellen im Kavitationstank erfolgreich untersucht hat (Bild 10). Eine seiner Versuchsreihe zur zweckmäßigen Ausbildung der Flügelkanten zeigt als günstigstes Nasenprofil der eintretenden Kante den symmetrischen Querschnitt einer Halbellipse mit einer großen Halbachse von 3- bis 3,5facher Profildicke. Ob die genannten Versuche in der UdSSR zu praktischer Anwendung beim Bau von großen Propellern führten, ist unbekannt.

Es ist dem Berichterstatter erst jetzt bekannt geworden, daß auch *Posdunin* [6] bereits vor 10 Jahren diesen Gedanken verfolgt und in einigen Propellermodellen im Kavitationstank erfolgreich untersucht hat (Bild 10). Eine seiner Versuchsreihe zur zweckmäßigen Ausbildung der Flügelkanten zeigt als günstigstes Nasenprofil der eintretenden Kante den symmetrischen Querschnitt einer Halbellipse mit einer großen Halbachse von 3- bis 3,5facher Profildicke. Ob die genannten Versuche in der UdSSR zu praktischer Anwendung beim Bau von großen Propellern führten, ist unbekannt.

3. Experimentelle Untersuchung der Kavitationserscheinungen

Zur versuchsmäßigen Untersuchung der Kavitationserscheinungen im Modellmaßstab wurden in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Versuchsstände gebaut. Diese bestehen im allgemeinen (Bild 11) aus einem geschlossenen

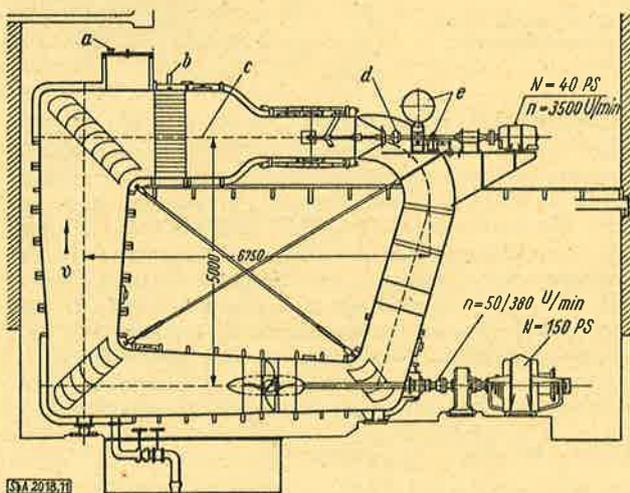


Bild 11. Kavitationskanal in Kristinehamn (Schweden)

nen Rohrkanal, dessen Wasserfüllung durch eine im unteren Kanalteil befindliche Umwälzpumpe in Umlauf versetzt wird. Im oberen Kanalteil ist anschließend an eine düsenartige Einschnürung die Meßstrecke angeordnet, in der die Modellschrauben bis zu Größen von 0,6 m Dmr. untersucht werden. Der statische Druck p_0 innerhalb des abgeschlossenen Umlaufkanals kann durch eine Luftpumpe abgesenkt werden, so daß zur Erzielung einer bestimmten Kavitationszahl $\sigma = \frac{p_0 - e}{q}$

sowohl die Änderung des statischen Druckes als auch die Änderung der Wasserumlaufgeschwindigkeit = Anströmgeschwindigkeit bzw. die Änderung der Schraubendrehzahl zur Verfügung stehen (Anströmgeschwindigkeit und Drehzahl sind durch die Fortschrittsziffer

$$J = \frac{v}{n \cdot D}$$

miteinander gekoppelt).

Gemessen werden Geschwindigkeit und statischer Druck des Wassers, Drehzahl, Schub und Drehmoment des Versuchspropellers. Durch seitliche Fenster im Kanal kann beobachtet oder photographiert werden, wobei üblicherweise stroboskopische Beleuchtung benutzt wird.

Da in jedem mit der Atmosphäre in Berührung kommenden Wasser Luft gelöst wird, deren Lösungsmenge sich gemäß dem Gesetz von *Henry* nach Druck und Temperatur richtet, scheidet sich bei sinkendem Druck zuerst Luft in kleinen Bläschen ab, während bei Unterschreitung des Dampfdruckes e größere Mengen Wasserdampf frei werden (Bild 12). Die bisherigen Beobachtungen dieses physikalischen Vorganges lassen vermuten, daß der Beginn und die mengenmäßige Intensität der Luftabscheidung von der Zeitdauer abhängen, während der das Wasser unter dem kritischen Druck steht [7]. Auch für die Verdampfung des Wassers spielt die Vorgeschichte der Wasserteilchen anscheinend eine gewisse Rolle [8], während der Verdampfungsprozeß selbst sehr schnell vor sich geht. Die Tatsache, daß sich beide physikalischen Vorgänge überlagern, zwingt zur gesonderten Berücksichtigung beider Einflüsse, und so ist man dazu übergegangen, entweder den Grad der Luftsättigung neben der eigentlichen Kavitationszahl gesondert zu berücksichtigen, oder eine abgeänderte Kavitationszahl zu benutzen, die beiden Erscheinungen Rechnung trägt [9]. Bild 13 und 14 zeigen Aufnahmen ein und desselben Modellpropellers bei gleicher Kavitationszahl und verschiedenem Luftgehalt. Man erkennt an diesen vier Aufnahmen gut den Einfluß der gelösten Luft: Während die Bilder der Versuche mit luftarmem Wasser nur spärliche Ansätze der Luftblasenbildung, dagegen aber schon teilweise Flächenablösung durch Wasserdampf zeigen, ist die Blasenbildung bei gesteigertem Luftgehalt überraschend hoch. Hierdurch unterscheiden sich auch die mannigfachsten Kavitationserscheinungen voneinander und lassen sich nach ihrer Erscheinungsform in einige Hauptgruppen einteilen:

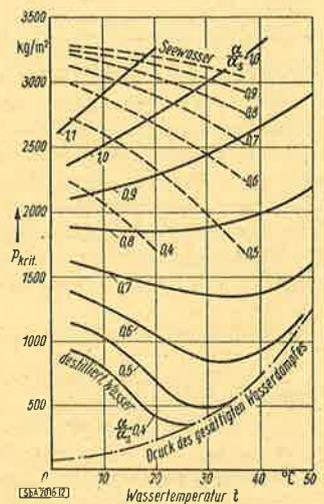
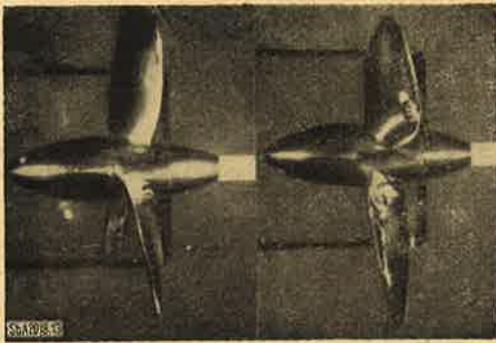


Bild 12. Kritischer Druck von Seewasser und destilliertem Wasser bei verschiedenem Luftgehalt α in Abhängigkeit von der Wassertemperatur nach Versuchen von *Kurokawa* [7]

- a) in die bereits an der Flügelvorkante vollinsetzende Flächenkavitation (sheet cavitation) mit kleinem oder verschwindendem Einfluß des Luftgehaltes und

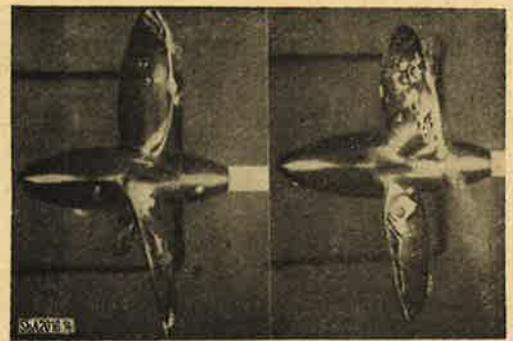


$a/a_s = 0,125$

$a/a_s = 0,207$

Bild 13 und 14

Modellpropeller (KMW Kristinehamn Prop. 128 A) bei verschiedener Luft-sättigung



$a/a_s = 0,285$

$a/a_s = 0,504$

b) in die vornehmlich auf Mitte Saugseite erscheinende Blasen kavitation (bubble cavitation) mit großem Einfluß des Luftgehaltes.

Je nach dem Ort ihres Ursprungs teilt man dann noch ein in die Flügelspitzen-, die Druckseiten-, die Saugseiten- und die Nabenkavitation.

Wird die Belastung eines sich schnell drehenden Propellers mit Kavitation durch langsame Steigerung seines Nutzsches erhöht, so daß also der Anstellwinkel der Blattschnitte stetig zunimmt, so durchläuft er folgende Stadien der Kavitationserscheinungen (s. Skizzen in Bild 15 und 16): Bei geringer Belastung zeigt sich auf der Druckseite hinter der Vorkante ein Bereich abgerissener Strömung, der mit zunehmender Belastung immer kleiner wird und allmählich verschwindet. Noch bevor die Druckseite frei wird, tritt dafür auf der Saugseite, je nach Breite und Dicke der Flügelblätter verschieden, von der Vorkante ausgehend Flächenkavitation oder auf Mitte Saugseite Blasen- bzw. Flächenkavitation auf.

Behält man den Schubbelastungsgrad oder die Fortschrittsziffer $\frac{v}{n \cdot D}$ bei, so beobachtet man bei gesteigerter Drehzahl ein allmähliches Wachsen der Kavitationsblasen, so daß die anfangs auf dem Flügelblatt endenden Kavitationszonen bis in den abströmenden Strahl hineinreichen. Endet die Kavitationsblase noch auf dem Flügelblatt, dann kommt es zu den gefürchteten Erosionserscheinungen im Bereich der Zone, wo die Dampfblasen kondensieren und zusammenstürzen (Bild 17). Fällt die Kondensationszone unmittelbar hinter die austretende Kante, dann sind zwar die hammerähnlichen Kondensationsschläge auf das Flügelblatt verschwunden, dafür macht sich in diesem Bereich aber eine starke Labilität der ganzen Flügelumströmung bemerkbar, die zu starken mechanischen Erschütterungen der Flügel führen kann.

4. Vergleich der rechnerischen Ergebnisse mit Beobachtungen und Einwirkung äußerer Einflüsse

Edstrand [9] hat die bereits in Bild 15' und 16 behandelte Modellschraube für einen Fortschrittsgrad nachgerechnet und für die Beurteilung der Kavitationsgefahr die Werte $\frac{\Delta p_{min}}{q}$ aus Bild 4 für Druck- und Saugseite in Bild 18 den örtlichen Kavitationszahlen $\sigma = \frac{p_0 - e}{q}$ gegenübergestellt. Außer der bei der Nach-

rechnung erzielten guten Übereinstimmung zwischen gerechnetem und gemessenem Schub nennt er auch die Übereinstimmung der im Versuch beobachteten Ausbreitung der Kavitationszonen mit der nach den Windkanalversuchen (Bild 4 und 5) geschätzten Ausbreitung „ziemlich gut“.

Bei Vergleichsversuchen mit denselben Modellschrauben in verschiedenen Versuchsständen ergeben sich Abweichungen in den Ergebnissen, deren Aufklärung und Beseitigung noch heute eine der aktuellsten Fragen auf den Tagungen der internationalen Tankleiterkonferenzen darstellt [10], [11]. Es hat sich gezeigt, daß besonders für Kavitationsversuche die Genauigkeit bei der Anfertigung der Modelle eine wichtige Rolle spielt; darüber hinaus ist aber auch die Güte der Meßeinrichtungen auf einen recht hohen Stand zu bringen, damit aus den Beobachtungsergebnissen zuverlässige Schlüsse gezogen werden können.

Die bisherigen Betrachtungen bezogen sich lediglich auf alleinfahrende „Freifahrtschrauben“ mit homogener Anströmung. Wird eine Schraube hinter dem Schiff untersucht, dann genügt für die Beurteilung der Kavitationsgefahr nicht mehr allein die Angabe der mittleren Kavitationszahl. Infolge der ungleichförmigen Anströmung werden die Flügelschnitte beim Umlauf unter ver-

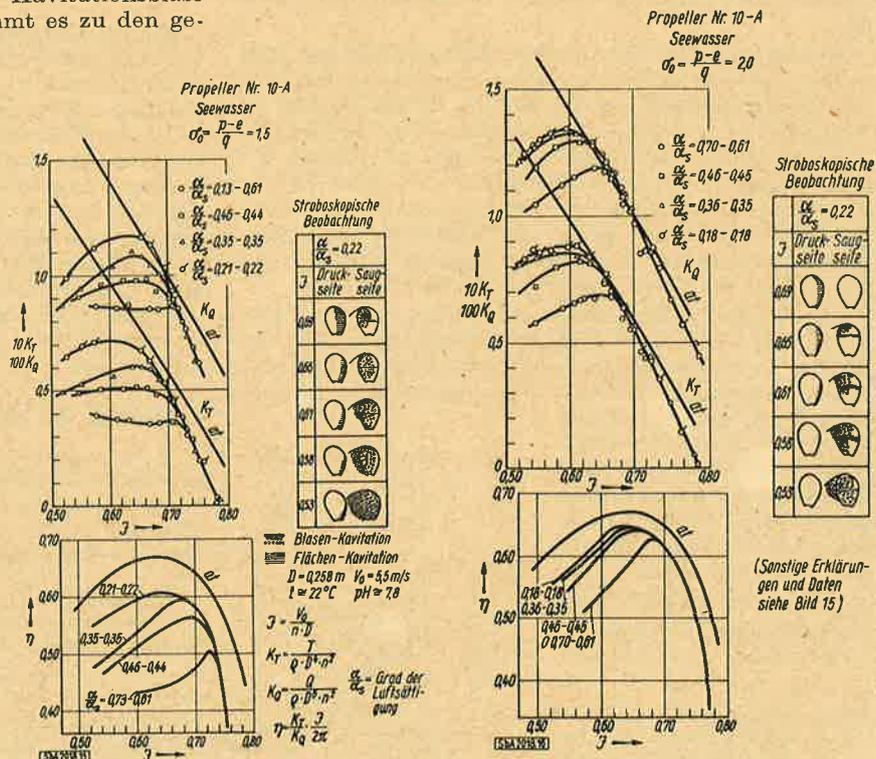


Bild 15 und 16. Modellpropeller Göteborg Nr. 10 in Seewasser [9]

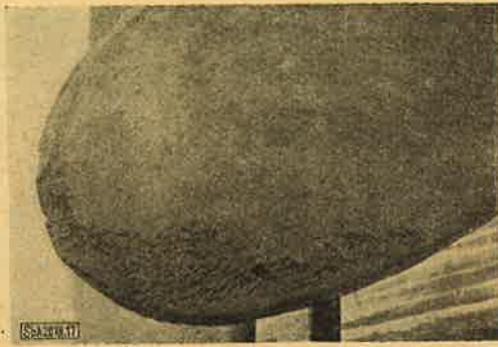


Bild 17. Kavitationszerstörungen an einer Schiffsschraube (n. Hunter)

änderlichem Anstellwinkel mit veränderlicher Geschwindigkeit angeströmt. Die Nachbildung der im Einzelfall vorliegenden Verhältnisse durch ein vor die Modellschraube gesetztes wabenförmiges Regelorgan brachte bereits einen erheblichen Einfluß auf die Kavitationserscheinungen. Allerdings muß man sich darüber klar sein, daß die Nachbildung einer bekannten Mitstromverteilung hinter dem Schiff durch ein derartiges Regelorgan keineswegs die Einflüsse des davor befindlichen Schiffskörpers auf die Schraube in vollkommener Weise ersetzen kann.

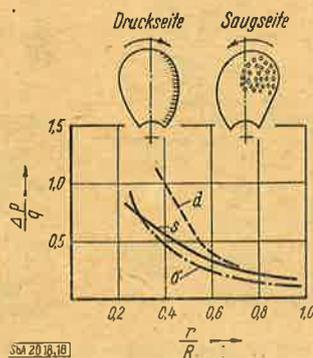
Außer der Ungleichförmigkeit des Zustromes, gekennzeichnet durch Verschiedenheit der örtlichen Zuströmgeschwindigkeit und Richtung der Stromfäden, spielt gerade bei Kavitationserscheinungen der statische Druck in der Umgebung der Schraube bzw. die Druckänderung durch in der Nähe befindliche Schiffsteile (Ruder, Gleitkörper od. dgl.) eine bestimmende Rolle. Besonders deutlich wird dies bei der Kortdüse, in deren Innern sich ein Druckverlauf ausbildet, wie er in Bild 19 nach Modellmessungen dargestellt ist. Der an der Düsenwand gemessene Druckverlauf ist dem statischen Druck des Wassers in der Tauchtiefe des Propellers zu überlagern, so daß die effektive Kavitationszahl für den in der Düse arbeitenden Propeller wesentlich unter der Kavitationszahl liegt, die für einen düsenfreien Propeller in gleicher Tauchtiefe einzusetzen ist.

Die Druckverteilung um die Blattsschnitte läßt sich in zwei Anteile aufspalten, deren einer durch die Verdrängungsströmung um die endlich dicken Profile bei Nullauftrieb und deren anderer durch die Zirkulation, d. h. die Auftriebserzeugung, bedingt ist. Infolge des nicht geringen Anteils der Flügeldicke an dieser Druckverteilung übt die Dicke der Schnitte einen erheblichen Einfluß aus auf die Größe der auftretenden Druckminima und somit auch auf die Kavitationszahlen der Schrauben bei gleicher Schraubenbelastung.

Das gleiche Problem macht sich bemerkbar, wenn man unter Beibehaltung des Flächenverhältnisses und der für die Festigkeit maßgebenden Flügeldicke auf eine andere Flügelzahl übergeht. Da hierbei das Dickenverhältnis der einzelnen Schnitte geändert wird, stellt der Übergang auf eine Schraube mit höherer Flügelzahl eine Verminderung der Kavitationsicherheit dar und umgekehrt.

Die in Bild 20 nach Versuchsergebnissen von Lerbs dargestellten Grenzen der

Bild 18. Örtliche Kavitationszahl σ und Druckbeizahl $\Delta p/q$ für die Blattsschnitte eines Propellerflügels [9]



Kavitationsgefährdung und Schubbeeinflussung für drei- und vierflügelige Schrauben könnten in guter Näherung durch ein einziges Diagramm ersetzt werden, wenn man in die hier gewählte Leitzahl auch noch die Flügelzahl hineinnehmen würde.

Entgegen der üblichen Gepflogenheit, die Kavitationszahl als Verhältniszahl der Druckdifferenz $p_0 - e$ und des Staudruckes der Fortschrittsgeschwindigkeit

$$q = \frac{\rho}{2} v^2 \text{ zu wählen, ist in Bild 20 hiervon abweichend der Staudruck der Spitzenumfangsgeschwindigkeit } q = \frac{\rho}{2} (D\pi n)^2 \text{ oder unter Fortlassung des Faktors } \pi^2$$

der Wert $\frac{\rho}{2} D^2 n^2$ benutzt worden. Dies hat den Vorteil, daß zu einer gleichbleibenden Propellerdrehzahl bei gleichem statischen Druck die gleiche Kavitationszahl gehört und diese auch bis zur Standprobe benutzt werden kann, während der übliche Verhältniswert hierfür unendlich groß wird. Offenbar hat sich der Gebrauch der üblichen Kavitationszahl vornehmlich durch die Versuchspraxis mit den Kavitationskanälen ergeben, wobei die Einhaltung der gleichbleibenden Umlaufgeschwindigkeit einfacher zu verwirklichen ist als die Einhaltung der Drehzahl bei veränderlicher Geschwindigkeit, aber gleichbleibendem statischen Druck.

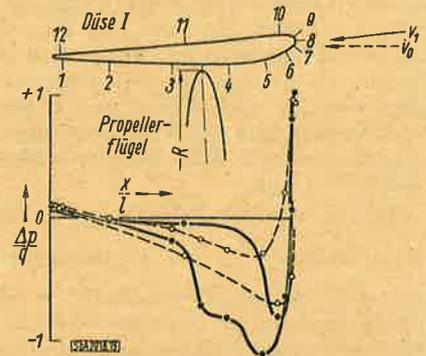


Bild 19. Druckverlauf in einer Kortdüse

Für die Untersuchung von Schrauben bei sehr kleinen Kavitationszahlen, die vornehmlich mit voller Saugseitenkavitation arbeiten, kommt man mit den vorhandenen Kavitationskanälen bald an eine Grenze, die durch die Höhe der möglichen Druckabsenkung gegeben ist. Da die Luftabscheidung bereits bei wesentlich größeren Absolutdrücken einsetzt als die Verdampfung, bereitet die im ganzen Kanal bei geringen Absolutdrücken vor sich gehende Entlüftung des Wassers gewisse Schwierigkeiten. Es ist deshalb wichtig, für derartige Fragen eine theoretische Grundlage aufzubauen, mit deren Hilfe extreme Probleme rechnerisch behandelt werden können, sowie erst einmal die rechnerischen Grundlagen durch Vergleichsversuche bestätigt sind.

5. Deutung der Zerstörungerscheinungen

Solange auch schon die durch die Kavitation verursachten Zerstörungen bekannt sind, existiert auch heute noch keine vollständige umfassende theoretische Hypothese, die die Zerstörung durch bekannte physikalische Vorgänge vollständig erklären könnte.

Wenn auch die allgemein vertretene Ansicht über den rein mechanischen Charakter der Zerstörungsvorgänge in den Kreisen der Kavitationsforscher überwiegt, so sind doch auch gerade in jüngster Zeit Beobachtungen gemacht worden, die auf eine Verbindung mit elektrochemischen Korrosionserscheinungen schließen lassen. Nechleba [12] weist in einem Bericht beispielsweise auf die Schutzwirkungen einer Hilfsspannung hin, an die er

die kavitationsgefährdeten Schaufeln einer Wasserturbine anlegte. Auch in England laufen derartige Versuche, und zwar ist festgestellt worden, daß durch elektrolytischen Korrosionsschutz die Grenze für die Beanspruchung ebenso hoch gehalten werden kann wie in einem nicht korrosiven Medium, und daß Korrosionsschäden vermieden werden können [13].

Es scheint festzustehen, daß die Kavitation in chemisch aggressiven Flüssigkeiten die Korrosion beschleunigt; ob diese Wirkung nur auf Grund der bei Kavitationsvorgängen intensivierten Mischvorgänge auftritt oder ob die anfänglich rein mechanisch auftretenden Schäden den Weg für verstärkten chemischen Angriff freimachen, bleibt noch dahingestellt. Möglicherweise entstehen auch durch die Kavitationsschläge in dem Kristallgitter elektrische Spannungen, die zu interkristalliner Korrosion führen.

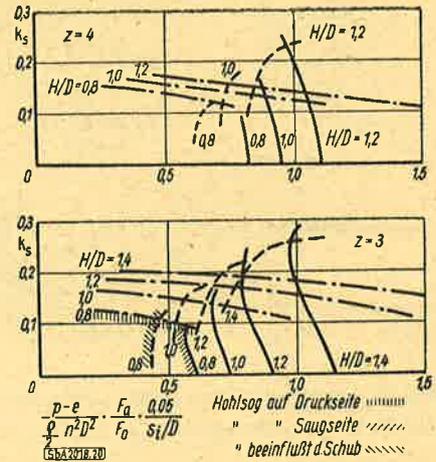
Die Bilder 21 bis 24 zeigen Kavitationsschäden an Propellern, die der Rechnung nach wohl schon hart an der Grenze der Kavitation arbeiten, aber den Erwartungen nach noch kaum Erosionsschäden aufweisen sollten. Betrachtet man sich die Anfressungen auf der Oberfläche genauer, dann fällt auf, daß

- die Erosion den ganzen Bereich von der eintretenden Kante bis zu einer verhältnismäßig scharf ausgeprägten Linie auf der Saugseite des Flügelblattes bestreicht. Teilweise tritt die Erscheinung auch auf der Druckseite auf;
- die Struktur der Erosionsschäden mitunter ein eigenartiges Muster hat, das man schwerlich mit irgendwelchen Strömungsvorgängen in Einklang bringen kann.

Nach den Versuchen in Venturidüsen weiß man, daß die Kavitationsschäden erst am Ende der Kavitationsblase auftreten, und zwar dort, wo die Hohlräume wieder zusammenbrechen. Die Tatsache, daß die Schäden an den in Bild 21 bis 24 dargestellten Schrauben bereits hinter der Vorkante einsetzen, läßt vermuten, daß an diesen Stahlgußschrauben eine Art Rauigkeitskavitation auftritt, die durch die Umströmung der einzelnen Rauigkeitsbuckel verursacht wird.

Bild 20

Kavitationsgrenzen für drei- und vierflügelige Propeller



Denkt man sich beispielsweise die einzelnen Körner der Rauigkeit ersetzt durch kleine halbkugelförmige Kalotten (Bild 25), so tritt an der Kuppe jeder Kalotte ein Unterdruck auf, der im ungünstigsten Fall bei unendlich dünner Grenzschicht den Unterdruck am Äquator einer in Polrichtung angeströmten Kugel in Potentialströmung gleichkommt ($\Delta p_2 = -1,25 q_1$).

Da jedoch die Rauigkeitsbuckel in die Grenzschicht eingebettet sind und nur im vorderen Bereich des Propellerflügels über die Grenzschichtdicke hinausragen, tritt eine wesentliche Minderung der Unterdrücke entsprechend der Geschwindigkeitsverteilung $w_3 = f(z)$ ein. Dicht hinter der eintretenden Flügelkante ist die Grenzschicht sehr dünn, außerdem herrschen an dieser Stelle die größten örtlichen Geschwindigkeiten. Beide Tatsachen bilden die Vorbedingung dafür, daß an den Rauigkeitserhebungen unmittelbar hinter der eintretenden Kante die größten Druckabsenkungen auftreten, die sich der aus der Umströmung des Profils ergebenden Druckverteilung überlagern.

Mit Berücksichtigung all dieser Einflüsse ergeben sich demgemäß unmittelbar hinter der eintretenden Kante

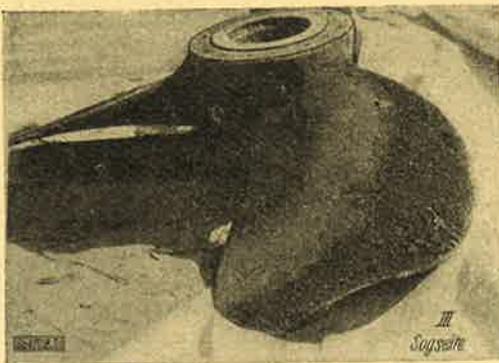


Bild 21 (links)

Stahlgußpropeller nach einer Betriebszeit von 6 Monaten

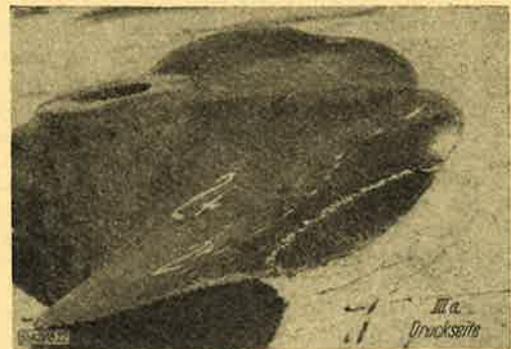


Bild 22 (rechts)

Stahlgußpropeller nach einer Betriebszeit von 6 Monaten

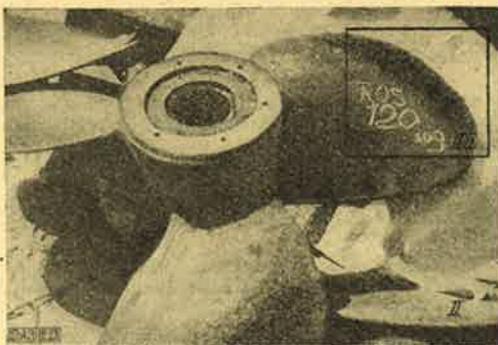


Bild 23 (links)

Stahlgußpropeller nach einer Betriebszeit von 9 1/3 Monaten



Bild 24 (rechts)

Stahlgußpropeller nach einer Betriebszeit von 9 1/3 Monaten

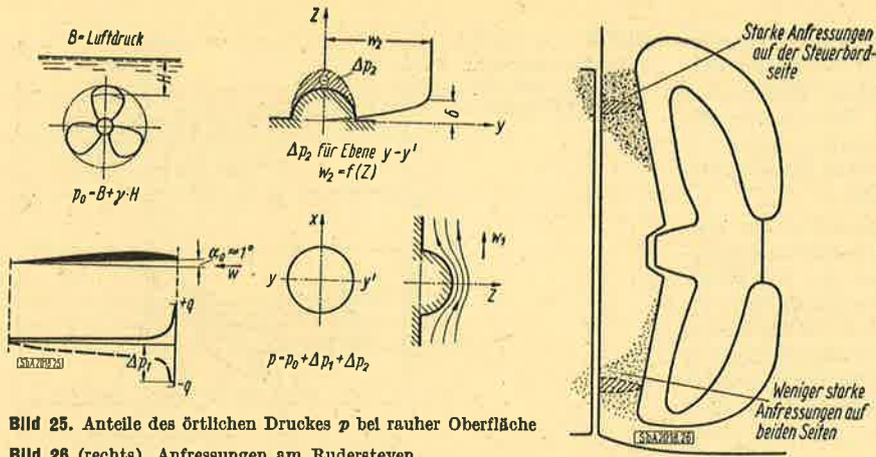


Bild 25. Anteile des örtlichen Druckes p bei rauher Oberfläche
Bild 26 (rechts). Anfressungen am Ruderstegen

auf der Saugseite örtliche Unterdrücke, die den für die Umströmung des Blattschnittes ermittelten Druck $p = p_0 + p_1$ (p_1 ist negativ) erheblich unterschreiten und so zu örtlicher Kavitation führen. Ist diese erst einmal an einer Stelle eingeleitet, so wird das an dieser Stelle befindliche Korn nicht etwa abgetragen, da die durch die zusammenstürzenden Dampfblasen verursachten mechanischen Angriffe erst hinter dem Korn auftreten und damit das Korn allmählich immer mehr aus der allgemeinen Kontur des Blattschnittes hervortreten lassen. Hierdurch wird die Kavitationsbildung nur noch verstärkt und als Folgeerscheinung die Zerstörung hinter dem betrachteten Korn intensiviert. Diese Vorstellung von den Einzelvorgängen erklärt auch räumlich und zeitlich gesehen den allmählichen Fortgang der Zerstörungserscheinungen. Wie weit dieser Versuch einer Deutung der wirklichen Vorgänge entspricht, muß die Erfahrung zeigen.

Zur Vermeidung der durch Kavitation hervorgerufenen Schäden kann von der strömungstechnischen Seite ein erheblicher Beitrag geleistet werden. In vorliegendem Fall könnte auch von seiten der Hersteller der Propeller die Verschärfung der Kavitationsgefährdung dadurch vermieden werden, daß die Flügel, vor allem im Bereich der eintretenden Kanten, vollkommen glatt und sauber geliefert werden. Es wird aber nicht immer zu vermeiden sein, daß der Druck an den Schraubenflügeln an einigen Stellen doch den kritischen Druck unterschreitet. Um auch in diesen Fällen gegen Erosion sicher zu sein, müssen die Flügel aus einem Material bestehen, das die auftretenden Kavitationsbeanspruchungen ohne Schaden ertragen kann. Diese Forderung kann jedoch nur durch die Metallurgie erfüllt werden, und es ist als erfreuliche Tatsache zu buchen, daß es dem auf gleichem Gebiet arbeitenden Vertreter der Metallurgie, Prof. Erdmann-Jesnitzer, gelungen ist, in diese komplizierten Vorgänge einiges Licht zu werfen. Es bleibt nur zu hoffen, daß es gelingen möge, den heutigen Baustoff der Propeller durch eine neue Legierung zu ersetzen, die sowohl strömungstechnisch als auch gießertechnisch eine brauchbare Lösung ergibt.

Anfressungen am Ruderstegen

Nach der Ausarbeitung dieses Vortrages wurde durch die Zeitschrift „Shipen Werf“ vom 17. Juni 1955 ein Bericht von Bunyan (Lloyds Register of Shipping) bekannt, in dem auf Kavitationsanfressungen an einem profilierten Schraubenstegen (Bild 26) in Zusammenhang mit dem Abstand der Propellerflügel von Außenhaut und Schraubenstegen hingewiesen wird. Im Text heißt es wörtlich: „An interesting case of acute erosion of the rudder nose with a slim rudder is shown . . . This is possible due to breakdown of the flow, particularly on the suction side of the rudder. The matter is being investigated.“

Die vorliegende Beobachtung paßt ihrem Wesen nach so gut zu dem am Schluß dieses Vortrages geschilderten Erosionserscheinungen durch Oberflächenrauigkeit, daß es zweckmäßig schien, sie hier mit aufzunehmen. Obzwar genaue Angaben zu dem Beobachtungsbefund fehlen, ist anzunehmen, daß es sich um einen Ruderstegen aus Stahlguß handelt, der ähnliche Oberflächenrauigkeit aufweist wie die behandelten Stahlgußpropeller. Die Tatsache, daß schwere Anfressungen auf der Saugseite des oberen Steventeils auftreten, läßt sich unter Annahme der vorgeschlagenen Deutungsweise zwanglos dadurch erklären, daß ähnlich wie auf dem Propellerflügel hinter der eintretenden Flügelkante in der dünnen Grenzschicht die Rauigkeitsbuckel als Kavitationserzeuger wirken; da die Anströmung des Schraubenstevens im drallbehalteten Schraubenstrahl infolge der ungleichförmigen Mitstromverteilung hinter dem Schiff im oberen Teil größeren Anstellwinkel und damit auf der Saugseite auch größere Unterdrücke erzeugt als im unteren Teil, treten im oberen Teil auf der Saugseite offenbar auch stärkere Anfressungen auf als im unteren Teil, wo geringe Spuren der Anfressungen auf beiden Seiten zu finden sind. Gerade dieser letzte Befund im unteren Teil weist darauf hin, daß es sich hier nicht um den vermuteten Zusammenbruch der Strömung handelt, sondern allein um das Zusammenwirken von erheblichen Unterdrücken am profilierten Schraubenstegen mit örtlich auftretenden Unterdruckspitzen an Rauigkeitsbuckeln. Wäre der vermeintliche Zusammenbruch der Strömung um den Stegen die eigentliche Ursache, dann müßte die Intensität der Erosionserscheinungen nach der Nabe hin zunehmen, da dort im Schraubenstrahl größere Anstellwinkel auftreten als im äußeren Bereich.

Die Tatsache, daß derartige Anfressungen erst in neuerer Zeit häufiger an strömungsgerecht gestalteten Schiffsstegen beobachtet werden, ist darauf zurückzuführen, daß einmal die Fahrgeschwindigkeit erheblich zugenommen hat und zweitens die früher üblichen Stegenquerschnitte strömungswidrige Form zeigten, bei deren Umströmung der Vorkanten bereits Ablösung einsetzte und somit die dahinter befindlichen Rauigkeitsbuckel strömungsmäßig gar nicht mehr zur Geltung kamen.

Die Schlussfolgerung aus den vorstehenden Beobachtungen muß also lauten: Bei allen Bauteilen des Schiffes und der Propeller, die infolge ihrer Umströmung Unterdruck aufweisen, ist zur Vermeidung von Kavitation im vorderen Bereich ihrer angeströmten Oberfläche auf Verminderung jedweder Rauigkeit zu achten. Daß hierdurch gleichzeitig die strömungsmäßige Güte der Bauteile erhöht wird, braucht in diesem Zusammenhang kaum noch erwähnt zu werden.

Literatur

- [1] Todd, F. H.: The Fundamentals of Ship Model Testing. Trans of The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 59 (1951) S. 850.
- [2] Gutsche, F.: Versuche über Profileigenschaften. Mitteilungen der VWS Nr. 10.
- [3] Gutsche, F.: Einfluß der Gitterstellung auf die Eigenschaften der im Schraubenentwurf benutzten Blattschnitte. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft 1938.
- [4] Martyrer, E.: Kraftmessungen an Widerstandskörpern und Flügelprofilen im Wasserstrom bei Kavitation. Hydromechanische Probleme des Schiffsantriebs I. S. 268.
- [5] Walchner, O.: Profilmessungen bei Kavitation. Ebendort S. 256.

- [6] *Podunin, W. L.*: Theoretische Grundlagen für den Entwurf und Arbeitsweise von Schiffsschrauben mit Superkavitation. Mitteltg. d. Akademie d. Wissenschaften der UdSSR, 1945, Abtlg. Techn. Wissenschaften Nr. 10 bis 11, S. 977.
- [7] *Gutsche, F.*: Hohlsg (Kavitations)bildung in lufthaltigem Wasser. Schiffbau, Jg. 40 (1939) S. 196.
- [8] *Knapp, R. T.*: Diskussion zu „Comparative Cavitation Tests of Propellers in Sixth International Conference of Ship Tank Superintendents, New-York (1953) S. 90.
- [9] *Edstrand, H.*: Cavitation tests with model propellers in natural sea water with regard to the gas content of the water and its effect upon cavitation point an propeller characteristics. Meddelanden fran Statens Skeppsprovninganstalt Nr. 15, Göteborg 1950.
- [10] *Saunders, H. E.*: Sixth International Conference of Ship Tank Superintendents. Published by Society of Naval Architects and Marine Engineers, New-York 1953.
- [11] *Norström-Edstrand*: Siebente Internationale Konferenz über Schiffshydrodynamik. Meddelanden fran Statens Skeppsprovninganstalt Nr. 34 (1955).
- [12] *Nechleba, M.*: Das Problem der Kavitation. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Dresden, Bd. 3 (1953/1954) H. 4, S. 545.
- [13] *Eisenberg, Ph.*: Kavitation. Forschungshefte für Schiffstechnik, Bd. 1, Heft 3 bis 5.

SbA 2018