

# Entwicklung einer Methode zur Vorhersage der Kavitationserosion an Schiffspropellern

Von Kand. d. techn. Wiss. *E. P. Georgijewskaja*, Kand. d. techn. Wiss. *M. A. Mawljudow*, ZWFI „Akademik A. N. Krylow“ und Dr.-Ing. *Manfred Mehmel*, VEB Kombinat Schiffbau, Direktorat Forschung und Erzeugnisentwicklung

## 1. Einleitung

An den Propeller als Vortriebsorgan werden bezüglich der Auslegung wachsende Anforderungen gestellt, da er in Verbindung mit der Maschinenanlage wesentlichen Einfluß auf die Betriebskosten und damit die Wirtschaftlichkeit eines Schiffes hat.

Die optimale Anpassung an die Antriebsanlage, die Vermeidung von Schwingungserregung bzw. von unzulässig hohen Druckimpulsen und besonders die Sicherheit gegen Kavitation sind dabei wichtige Voraussetzungen für einen geringen Brennstoffverbrauch und für den störungsfreien Betrieb eines Schiffes.

Eine Verminderung der Einsatzdauer des Propellers und damit des Schiffes wird unter anderem durch die Kavitationserosion, deren Zerstörungswirkung recht beträchtlich sein kann, bewirkt. Diese Erscheinung wurde erstmals an Propellern schneller Boote und Schiffe beobachtet. Das Auftreten noch intensiverer Zerstörung fiel mit dem Einsatz von Tragflügelbooten zusammen, bei denen die Leistung zur Schraube mittels einer geeigneten Welle ( $\varphi = 10^\circ \dots 15^\circ$ ) übertragen wird. Selbst an Propellern von Trockenfrachtern großer Verdrängung und Großtankern wurde Erosion beobachtet, besonders bei einem stark ungleichförmigen Nachstrom in der Propellerkreisebene und großen Fortschrittsgeschwindigkeiten. Beim Einsatz von Propellern in Ruderdüsen an Fischereifahrzeugen und Transportschiffen wurden Zerstörungen der inneren Düsenoberfläche als Ergebnis des gleichzeitigen Wirkens erosiver und korrosiver Faktoren festgestellt.

Die Kavitationserosion ist jedoch nicht nur auf Schiffspropeller beschränkt, sondern tritt in vielen Strömungsmaschinen, die mit flüssigen Medien arbeiten bzw. von diesen angetrieben werden, auf.

Der Hauptweg zur Vermeidung von Kavitationserosion besteht in der Verhinderung des Entstehens von Kavitation. Da dieser Weg aus physikalischen, technischen oder ökonomischen Gesichtspunkten nicht immer beschritten werden kann, ist sie in vielen Fällen nicht vermeidbar.

Nach *Ackl* [1] ist die zerstörende Wirkung der Kavitation das Resultat gleichzeitig wirkender mechanischer, chemischer und elektrochemischer Effekte. Dabei spielen die mechanischen Kräfte infolge des Kavitationsblasenkollapses eine dominierende Rolle und zwar als Hauptzerstörungsfaktor durch die lokale Zerstörung und Abtragung von Werkstoff (Kavitationserosion) oder als Wegbereiter für den korrosiven Angriff. Es ist somit eine Problematik, die sowohl mit der Hydromechanik als auch mit der Werkstoffkunde verbunden ist.

Die Untersuchung des Prozesses der Kavitationserosion begann schon vor mehr als 60 Jahren mit der grundlegenden Arbeit von *Rayleigh* [2] zum Zusammenfall einer leeren Kavitationsblase in idealer Flüssigkeit. Seit dieser Zeit folgte eine Vielzahl von Arbeiten auf diesem Gebiet sowohl bezüglich des Werkstoffverhaltens als auch der Verfeinerung der Theorie und der Entwicklung entsprechender experimenteller Methoden. Es sei an dieser Stelle nur auf die Arbeiten von *Knapp* [3], *Eisenberg* [4], *Plesset* [5, 6] und *Thiruvengadam* [7] verwiesen.

Auf Grund der Kompliziertheit des Vorganges der Kavitationserosion sind die Kenntnisse bei weitem noch nicht vollständig, zumal die Propellerkavitation selbst ein komplizierter physikalischer Vorgang ist. Zur Zeit kann nur das Experiment am konkreten Objekt genauen Aufschluß über eine Erosionsgefährdung geben.

Zur Verkürzung der Untersuchungszeiten in den Versuchsanlagen und zur genauen Lokalisierung gefährdeter Zonen werden von verschiedenen Einrichtungen sogenannte „soft surfaces“, d. h. weiche Oberflächen, eingesetzt, wobei sich das Spektrum dieser von Matrizentinte bis zu weichen Metallüberzügen (geglühtes Aluminium, Weichblei) erstreckt. Die bisher damit gesammelten Erfahrungen mündeten in die Empfehlungen der 14. und 15. ITTC [8, 9].

In der vorliegenden Arbeit wurde diese Verfahrensweise zu einer Methode weiterentwickelt. Grundlage dafür ist die Kenntnis der Grenzgeschwindigkeiten des Überzuges und der Propellerwerkstoffe sowie einer Kenngröße für die Werkstoffzerstörungsgeschwindigkeit. Unter Grenzgeschwindigkeit soll hier die Strömungsgeschwindigkeit verstanden werden, unterhalb der für die einzelnen Materialien trotz Kavitation keine Materialschädigung eintritt. Diese Kenngrößen wurden experimentell ermittelt, wobei von den beiden Einrichtungen verschiedene Versuchsanlagen eingesetzt wurden.

Mit diesen Werten kann dann bei Kenntnis des Maßstabes einfluss eine Aussage darüber getroffen werden, ob bei einem gegebenen Propeller und dem entsprechenden Betriebspunkt Erosion auftritt oder nicht und wenn ja, welche Fläche die Erosionszone einnimmt und nach welcher Zeit sie eine bestimmte mittlere Tiefe erreicht.

Die erarbeitete Methode wurde an einem Tragflügelbootpropeller überprüft.

## 2. Physikalische Grundlagen

Die Zerstörungen der Flügeloberfläche treten beim Arbeiten des kavitierenden Propellers in ungleichförmiger Zuströmung hinter dem Schiffskörper auf. Im ungleichförmigen Nachstrom bleiben die Kavitationshöhlräume bei einer Umdrehung des Propellers in ihrer Form und ihren Abmessungen nicht konstant. Unter bestimmten Bedingungen können diese Höhlräume implodieren, was von starken hydrodynamischen Schlägen auf die Flügeloberfläche begleitet wird. Unter Wirkung dieser Schläge erfolgt eine elastische und plastische Deformation des Propellerwerkstoffes und im weiteren Verlauf Zerstörung an den Stellen der stärksten Kavitationswirkungen.

In der vorliegenden Arbeit soll dieser Vorgang jedoch nicht in einzelnen betrachtet werden, da solch ein Herangehen nicht zu einer ingenieurmäßigen Methode führen würde.

### 2.1. Einfluß des Maßstabes

Es soll bei der Betrachtung der Kavitation von folgendem Modell ausgegangen werden: Auf einem Flügelement des Propellers, der im ungleichförmigen Nachstrom arbeitet, existiert ein Kavitationshohlraum bei einem bestimmten Grad der Kavitationsentwicklung ( $\sigma_v = \text{const.}$ ,  $S = \text{const.}$ ) noch einige Zeit fort, obwohl die Bedingungen dafür vom physikalischen Standpunkt nicht mehr vorhanden sind (Kavitationshysterese). Es kommt deshalb zum Kollaps des gesamten Kavitationshohlraumes, der zu intensiver Erosionsschädigung führen kann. Es wird angenommen, daß die Kinematik des Kollapses eines Kavitationshohlraumes bei konstanter Kavitations- und Strouhalzahl (die Strouhalzahl entspricht dem reziproken Wert des Fortschrittsgrades  $J$ ) nicht vom Maßstab abhängt, da infolge der großen Abmessungen des Hohlraumes der Einfluß der Oberflächenspannung und der Zähigkeit vernachlässigbar ist. Die Flüssigkeitsmasse, die auf die Körperoberfläche

beim Zusammenfall des Hohlraums einwirkt, ist proportional ihrem Volumen, welches seinerseits (im Fall unterschiedlichen Maßstabes) proportional der dritten Potenz der charakteristischen Abmessung (Länge des Erosionsherdes, Propellerdurchmesser  $D$ ) ist. Die Energie, mit der die der Kavitationswirkung zugewandte Oberfläche beaufschlagt wird, ist proportional  $m/2 w^2$ , wobei  $w$  die mittlere Auftreffgeschwindigkeit der Flüssigkeitsmasse auf die Oberfläche ist. Bei Beachtung der kinematischen Ähnlichkeit der Erscheinung des Zusammenfalls des Kavitationshohlraumes am Modell und an der Großausführung muß das Verhältnis der mittleren Auftreffgeschwindigkeiten des Wassers auf die Körperoberfläche am Ort des Blasenkolllaps dem Verhältnis der konstanten Geschwindigkeiten, z. B. der Fortschrittsgeschwindigkeiten, entsprechen.

Deshalb ist die Energie, die auf die gesamte Oberfläche wirkt, proportional  $\sim D^3 V^2$  und auf die Oberfläche bezogen  $\sim D V^2$ , wobei  $V$  die Strömungsgeschwindigkeit ist.

Um auf dem aus ein und demselben Werkstoff gefertigten Modell- und Großpropeller gleiche Kavitationserscheinungen zu haben, die gleichen Energien pro Flächeneinheit entsprechen, ist es notwendig, die Bedingung:

$$D_N V_N^2 = D_M V_M^2 \quad (1)$$

zu beachten (Energie pro Fläche  $(m/2V^2)/A$ ;  $m \sim D^3$ ;  $A \sim D^2 \rightarrow (m/2)/A = D/2$ ).

Die Geschwindigkeit, bei der es in diesem Fall erforderlich ist, die Untersuchung durchzuführen, wird

$$V_M = V_N \sqrt{D_N/D_M} \quad (2)$$

was bedeutend größer als die Geschwindigkeit der Großausführung ist und praktisch bei der Durchführung von Versuchen mit Modellpropellern im Kavitationstunnel nicht gewährleistet werden kann. Deshalb ist es für die Versuchsdurchführung notwendig, solche Materialien einzusetzen, die eine wesentlich geringere Erosionsfestigkeit besitzen als der Werkstoff, aus dem der Großpropeller gefertigt ist, oder man kann auf die Flügeloberfläche einen speziellen Erosionslacküberzug aufbringen. In diesem Fall wird die Geschwindigkeit, bei der die Versuche durchgeführt werden müssen

$$V_M = \frac{V_N \sqrt{D_N/D_M}}{K} \quad (3)$$

wobei  $K$  ein Koeffizient ist, der die relative Erosionsfestigkeit der Materialien des Großpropellers und des Modells bzw. des Lacküberzuges berücksichtigt.

## 2.2. Ermittlung der Materialabtragungsgeschwindigkeit

Bei kleinen Geschwindigkeiten, wenn pro Flächeneinheit eine Energie vorhanden ist, die kleiner als ein bestimmter Wert ist, erfolgt keine Erosion, sondern nur elastische Deformation des Materials. Mit sich vergrößernder Geschwindigkeit wächst die Energie an, und es kommt der Augenblick der Zerstörung einiger Teile der Oberfläche. Die Geschwindigkeit unterhalb der keine Erosionszerstörung bei gegebener Kavitation ( $\sigma_v, S$ ) und beliebig langer Einwirkungszeit erfolgt, wird allgemein als Grenzzgeschwindigkeit  $V_{Gr}$  bezeichnet. Bei dieser Geschwindigkeit ist die spezifische Energie, die durch den zusammenfallenden Hohlraum auf die Oberfläche übertragen wird, proportional  $m/2 V_{Gr}^2$  und nennt sich Grenzenergie. Die Größe der Grenzenergie wird eindeutig durch die physikalisch-mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs bestimmt. Deshalb hängt das Verhältnis der Werte der Grenzzgeschwindigkeiten verschiedener Werkstoffe nicht von den Bedingungen des durchgeführten Experimentes ab. Somit ist der Koeffizient  $K$  im Ausdruck (3) durch dieses Verhältnis eindeutig bestimmt.

Unter Berücksichtigung des dargelegten, ist die Energie  $E_{Zerst}$ , die eine erosive Schädigung der Körperoberfläche

beim einmaligen Kollaps eines Kavitationshohlraumes hervorruft, proportional

$$E_{Zerst} \sim \left( \frac{m}{2} V^2 - \frac{m_1}{2} V_{Gr}^2 \right) \quad (4)$$

oder auf eine Zeiteinheit bezogen

$$E_{Zerst} \sim m n V_{Gr}^2 \left( \frac{V^2}{V_{Gr}^2} - 1 \right) \quad (5)$$

wobei  $n$  die Anzahl der Kollapse pro Zeiteinheit ist, d. h. beim Propeller ist sie proportional der Wellendrehzahl.

Die experimentellen Untersuchungen der erosiven Zerstörung verschiedener Werkstoffe zeigten, daß die Intensität des Erosionsvorganges, die durch die Geschwindigkeit der Materialzerstörung  $dv/dt$  charakterisiert wird, sich für Metalle umgekehrt proportional zur Deformationsenergie  $S_e$  verhält [10]. Darunter wird die Energie verstanden, die für die Zerstörung einer Volumeneinheit Material erforderlich ist. Unter Berücksichtigung des Maßstabeinflusses entsprechend Punkt 2.1 ist aber die Energie nicht proportional dem Volumen zerstörten Materials sondern der Fläche, d. h. die erforderliche Energie zur Zerstörung einer Volumeneinheit wird sich mit vergrößerndem Maßstab proportional dem Maßstab verkleinern. Das Verhältnis zwischen dem Volumen und der Fläche ist gleich dem Maßstab bzw. einer charakteristischen Länge. Folglich ist bei einer Zerstörungsgeschwindigkeit  $dv/dt$  des Erosionsherdes mit der Fläche  $A_{er}$  die Größe der Energie, die für die Zerstörung des Materials pro Zeiteinheit verausgabt wird, proportional  $\sim S_e dv/dt (1/\sqrt{A_{er}})$ , wobei für die charakteristische Länge, unter Berücksichtigung der Proportionalität des Verhältnisses der Flächen der Erosionsherde mit dem Quadrat des Maßstabes, die Größe  $\sqrt{A_{er}}$  eingeführt wurde.

Andererseits ist, wie oben schon dargelegt, die Energie, die die erosive Schädigung der Körperoberfläche beim Kollaps des Kavitationshohlraumes pro Zeiteinheit hervorruft, proportional  $\sim m \cdot n V_{Gr}^2 (V^2/V_{Gr}^2 - 1)$ . Daraus folgt:

$$\frac{S_e}{\sqrt{A_{er}}} \cdot \frac{dv}{dt} \sim m n V_{Gr}^2 \left( \frac{V^2}{V_{Gr}^2} - 1 \right) \quad (6)$$

Die Masse  $m$  wird durch die Abmessungen des Kavitationshohlraumes bestimmt. Offensichtlich stehen die Abmessungen des Hohlraumes in direkter Beziehung zu den Abmessungen der Erosionszone.

Die spezifische Energie pro Flächeneinheit bei verschiedenen Versuchsständen aber bei ein und demselben Material ist bei den Grenzzgeschwindigkeiten gleich, d. h.

$$\frac{m_1 V_{Gr1}^2}{A_1} = \frac{m_2 V_{Gr2}^2}{A_2} = \frac{m V_{Gr}^2}{A} = \text{const.} \quad (7)$$

Der Ausdruck (6) nimmt in diesem Fall folgendes Aussehen an:

$$S_e \frac{dv}{dt} \sim A_{er}^{3/2} n \left( \frac{V^2}{V_{Gr}^2} - 1 \right) \quad (8)$$

oder

$$\frac{S_e}{A_{er}^{3/2} n} \frac{dv}{dt} = K_0 \left( \frac{V^2}{V_{Gr}^2} - 1 \right) = K_1 = f \left( \frac{V}{V_{Gr}} \right) \quad (9)$$

wobei die Proportionalitätskonstante  $K_1$  nicht von der Konstruktion des Propellers oder der Art der Umströmung abhängt. Der Einfluß der Strömungsparameter wird eindeutig durch die Grenzzgeschwindigkeit bestimmt, die bei der Untersuchung eines der Großausführung ähnlichen Modells mit Lacküberzug ermittelt werden muß.

Den Proportionalitätsfaktor des Ausdruckes (9) kann man prinzipiell auf versuchstechnischem Wege im Laboratorium ermitteln. Dazu muß man jedoch die Bedingung (1) einhalten, um gleiche Wirkungen der Kavitation an Modell

und Großpropeller zu erhalten. Da jedoch selbst mit erosionsempfindlicheren Propellerwerkstoffen diese Bedingung in normalen Versuchsanlagen nicht eingehalten werden kann, muß der Proportionalitätsfaktor  $K_1$  an Proben unterschiedlicher Propellermaterialien auf einem speziellen Versuchsstand ermittelt werden.

Der Ausdruck (9) gestattet es, wenn die Grenzgeschwindigkeit des Modells bekannt ist und die Fläche der Erosionszone auf die Großausführung umgerechnet wurde, die Geschwindigkeit der Zerstörung  $dv/dt$  zu bestimmen.

Bei dieser Betrachtung wurde davon ausgegangen, daß  $dv/dt$  in der stationären Phase des Erosionsvorganges bestimmt wird. Da bei Propellern  $dv/dt$  über den zeitlichen Verlauf des Erosionsvorganges keine Konstante ist, kann der berechnete Wert nur Aufschluß über die zu erwartende Einsatzdauer geben. Die wirkliche Einsatzdauer ist dann nur auf der Grundlage der Besichtigung des Großpropellers zu ermitteln, da festgestellt wurde, daß sich die maximale Tiefe des Erosionsherdes z. B. beim Raketa-Propeller einem Grenzwert nähert [11].

### 3. Experimentelle Untersuchungen

Die im vorhergehenden Kapitel dargelegten Zusammenhänge gestatten es, eine Methode zur Vorhersage des Auftretens von Erosion und der Stärke ihrer Intensität an Großpropellern auf der Grundlage von Modellversuchen abzuleiten. Bei der Herleitung dieser Ausdrücke wurde eine Reihe von Annahmen getroffen, deren Richtigkeit durch das Experiment noch nachgewiesen werden muß. Außerdem ist es für die praktische Anwendung notwendig, Kenntnis über die vergleichbare Erosionsbeständigkeit von Propellerwerkstoffen und des Lacküberzuges sowie über die Proportionalitätskonstante  $K_1$  zu besitzen. Mit dem Ziel der Gewinnung dieser Daten wurden systematische experimentelle Untersuchungen in den Versuchsanlagen beider Einrichtungen durchgeführt.

Gegenwärtig kommen bei der Untersuchung der Kavitationserosion Versuchseinrichtungen mit verschiedenen Wirkungsprinzipien zum Einsatz. Große Verbreitung haben Magnetostruktionsschwinger und Rotationsstände gefunden, aber es werden auch Untersuchungen in hydrodynamischen Versuchsständen und Kavitationstunneln durchgeführt [12]. In der Mehrzahl der Einrichtungen wird die Intensität der Kavitationswirkung durch Änderung des Charakters der Umströmung der Probe bzw. des Kavitationsblasenerzeugers reguliert. Daneben ist es jedoch notwendig, die Möglichkeit der Untersuchung bei konstanten kinematischen Bedingungen der Umströmung aber verschiedenen Intensitäten zu besitzen.

Ähnliche Untersuchungen kann man in Kavitationstunneln insbesondere an Modellpropellern durchführen. Nur sind solche Untersuchungen kompliziert, arbeitsaufwendig und können nur in einzelnen Fällen durchgeführt werden.

Deshalb wurden im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen spezielle Einrichtungen für den mittleren und großen Kavitationstunnel der UdSSR und den Kavitationstunnel der DDR projektiert und gefertigt, mit denen bei kinematisch ähnlichen Bedingungen ( $\sigma_v = \text{const.}$ ,  $S = \text{const.}$ ) die Intensität der Kavitationswirkung in weiten Grenzen durch Änderung der Frequenz des Kollaps und der Geschwindigkeit der Zuströmung verändert werden kann.

#### 3.1. Versuchseinrichtungen der UdSSR zur Untersuchung des Erosionsprozesses

Die zwei Einrichtungen für die beiden Kavitationstunnel wurden entsprechend dem Maßstab der Abmessungen der beiden Meßstrecken, 1 : 1,77, gefertigt. Sie bestehen aus folgenden Hauptbauteilen:

- Kavitationsblasenerzeuger, im weiteren als Kavitator bezeichnet;
- Stromliniengrundkörper, an dem der Kavitator und die Proben befestigt werden;

- herausziehbare Platte mit einer Einrichtung für ihre Verschiebung;
- Grundplatte, die als Befestigung der Versuchseinrichtung am Kavitationstunnel dient;
- Getriebe als Verbindung zwischen Elektromotor und Kavitator.

Eine Gesamtansicht ist dem Bild 1 zu entnehmen.

Der sich drehende Kavitator erscheint periodisch in der Strömung und hinter ihm bildet sich ein Kavitationshohlraum. Unter bestimmten Arbeitsbedingungen der Einrichtung kollabiert der Hohlraum nach dem Verschwinden des Kavitators. Dabei tritt ein hoher Druck auf, der zum Auftreten von Erosionszerstörungen führen kann.

Aus der Betrachtung von Bildern einer Zeitlupenaufnahme (4000 B/s), die die Entwicklung der Kavitationsblase hinter dem pulsierenden Kavitator darstellen, der auftaucht und verschwindet (Bild 2), ist zu ersehen, daß außer dem Primärkollaps weiter stromabwärts ein Sekundärkollaps mit geringerer Intensität auftritt. Es zeigt sich hier ein Schwingungsvorgang der Kavitationsblase, der auf der Grundlage von theoretischen Betrachtungen schon seit längerem bekannt ist [16].

Der konstruktive Aufbau der Einrichtung gestattet es, die Proben einfach und schnell ohne Ablassen des Wassers aus der Meßstrecke auszuwechseln und sie auch in verschiedenen Entfernungen vom Kavitator, in Abhängigkeit vom Ort des Blasen-kollaps, zu positionieren. Die Form des Kavitators wurde in Vorversuchen unter Berücksichtigung einer hohen Erosionsintensität ausgewählt.

#### 3.2. Versuchseinrichtung der DDR zur Untersuchung des Erosionsprozesses

Die Untersuchungen wurden in der kleinen Meßstrecke ( $\square$  600 mm) des Kavitationstunnels mit zwei Kavitatoren im Maßstab 1 : 2 durchgeführt. Der prinzipielle Aufbau ist dem Bild 3 zu entnehmen.

Die Kavitatoren bestehen aus einer Nabe mit vier Stäben, auf denen jeweils ein Kegel als Kavitationsblasenerzeuger befestigt ist. Der Steigungswinkel, gemessen an der Kegelsbasis, betrug  $45^\circ$ . Die Proben, die der Kavitationswirkung ausgesetzt werden, sind in einer speziellen Halterung eingesetzt. Diese als Aufnahmekassette bezeichnete Halterung wird mittels eines durch die Meßstreckenwand geführten Stabes in die richtige Lage zum Kavitator gebracht.

In die Aufnahmekassette wurden Proben mit einer Fläche von  $40 \times 40 \text{ mm}^2$  bzw.  $20 \times 20 \text{ mm}^2$  als Träger für die Lackuntersuchungen eingesetzt. Der Ort der Erosionszone wurde dann für die Positionierung der Materialproben verwendet, die ein Gewicht von  $\approx 3 \text{ g}$  bzw.  $\approx 1 \text{ g}$  aufwiesen. Es wurde deshalb so klein gehalten, um günstige Relationen zwischen Eigenmasse und dem zu erwartenden Materialabtrag zu erhalten. Die Form des Kavitators und die Pro-

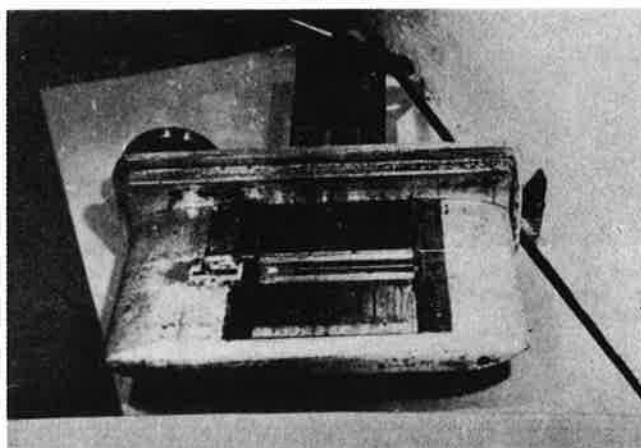


Bild 1. Versuchseinrichtung der UdSSR für den mittleren Kavitationstunnel

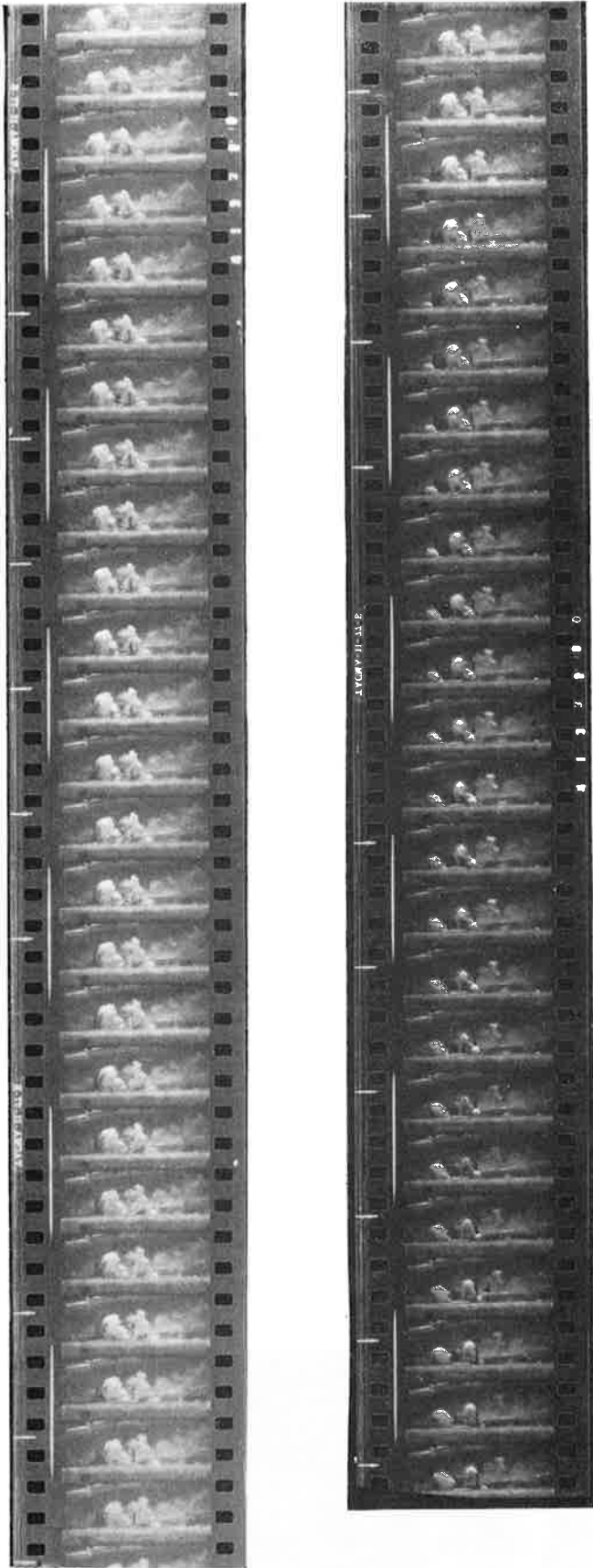
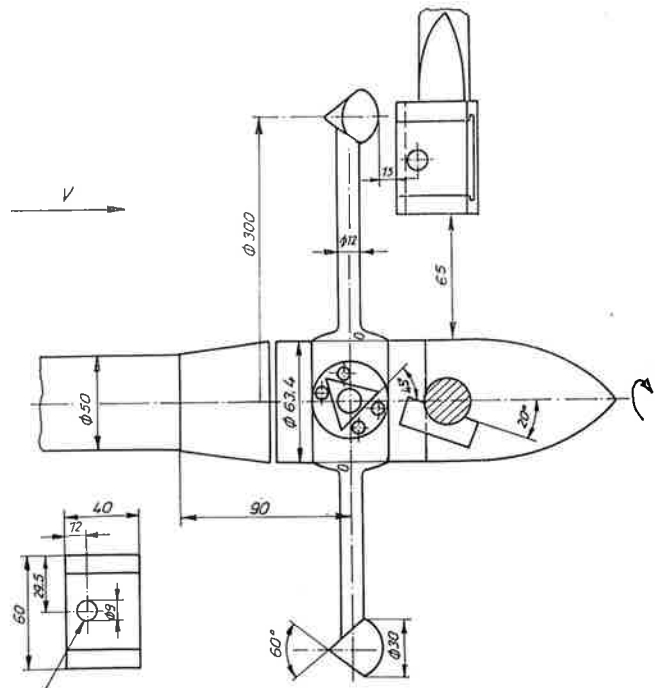


Bild 2. Zeitlupenaufnahme der Kavitationsblasenentwicklung beim Kavitator der UdSSR (4000 Bilder/s;  $V = 0,5 \text{ m/s}$ ;  $\sigma_V = 1,0$ ;  $S = 1,0$ ); Darstellung eines Zyklusses

benanordnung sind in Auswertung von Voruntersuchungen [17] festgelegt worden. Aus Bild 4 ist die sich ausbildende Kavitationserscheinung ersichtlich.



Lage der Metallprobe

Bild 3. Skizze des großen Kavitators für den Kavitationstunnel der DDR

### 3.3. Bestimmung der Grenzggeschwindigkeiten

Die Grenzggeschwindigkeit charakterisiert die Intensität der Kavitationswirkung. Sie ermöglicht damit auch die Beurteilung der relativen Erosionsbeständigkeit eines Lackanstriches, da in diesem Fall die allgemeingültigen Kriterien für Werkstoffe (Deformationsenergie, Streckgrenze, Gewichtsverlust) nicht anwendbar sind.

Zur Bestimmung der Grenzggeschwindigkeiten für einen Lackanstrich der Werkstoffe, die für die Fertigung der Schiffspropeller und deren Modelle in Frage kommen, wurden systematische Versuche mit den Proben an den oben beschriebenen Anlagen durchgeführt. Dabei wurden zwei Wege beschritten.

Einmal wurde bei vorgegebener Anströmgeschwindigkeit in bestimmten Zeitintervallen eine visuelle Kontrolle der Lackoberfläche vorgenommen; dabei wurde auch die Fläche des beschädigten Lackanstrichs bestimmt. Auf dieser Grundlage wurde eine Kurve der Abhängigkeit der zerstörten Fläche von der Zeit aufgetragen. Durch Extrapolation dieser Kurve auf  $A_{er} = 0$  wurde dann der Zeitpunkt für den Zerstörungsbeginn bestimmt. Zum anderen kann bei geringerer Erosionsintensität der Erosionsbeginn visuell ermittelt werden, indem der Zeitpunkt festgehalten wurde, bei dem der erste Lackpartikel sich ablöste. Der Zerstörungsbeginn für die Metalle wurde in analoger Weise bestimmt, wobei anstelle von  $A_{er}$  der Gewichtsverlust infolge Erosion registriert wurde.

Auf Grund der größeren Erosionsintensität der sowjetischen Anlagen konnte hier nur der erste Weg beschritten werden, während in der Anlage der DDR beide Wege beschritten wurden, um auch den Vergleich zwischen beiden Verfahren zu haben. Da der Erosionsvorgang in seinem zeitlichen Ablauf sich in vier Perioden unterteilt [7], ist die visuelle Methode als die genauere anzusehen.

Bei vier verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten wurden jeweils drei Proben aus dem gleichen Material untersucht, um die Abhängigkeit der Inkubationsperiodendauer von der Anströmgeschwindigkeit festzustellen. Die Asymptoten an diese Kurven für eine Periodendauer  $t_B \rightarrow \infty$  ergeben die jeweiligen Grenzggeschwindigkeiten. Diese Methode weist jedoch einen großen Fehler auf. Um einen genaueren Wert der Grenzggeschwindigkeit zu erhalten, wurden die Versuchsergebnisse als  $1/t_B + a = f(V)$  auf einfach logarithmischem Papier aufgetragen. Die Konstante  $a$  wird

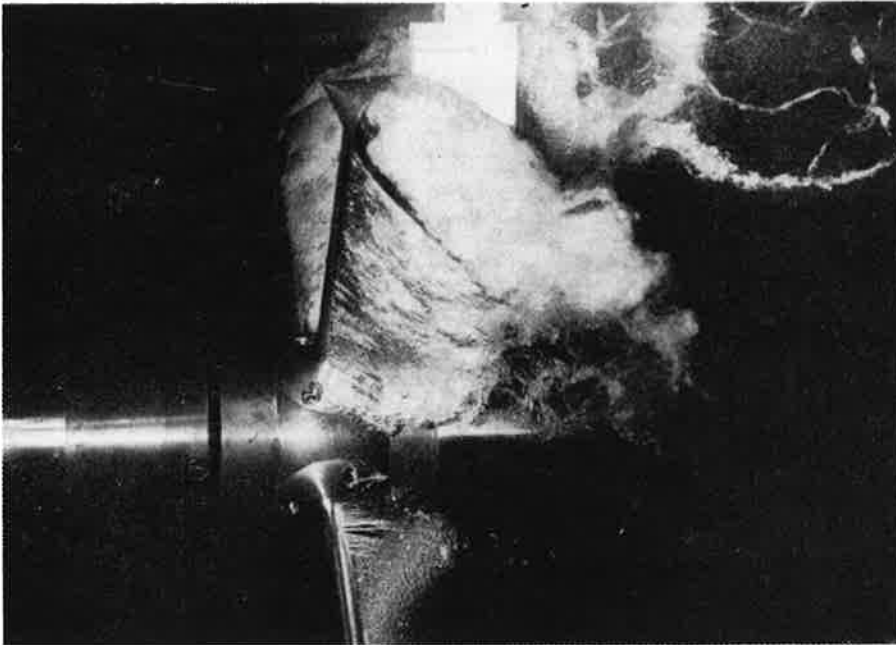


Bild 1. Großer Kavitator im Kavitationstunnel ( $J = 1,0, \sigma_v = 1,0$ )

dann so gewählt, daß sich eine fast lineare Abhängigkeit ergibt. Der Schnittpunkt dieser „Geraden“ mit der Funktion  $y = f(x) = a$  ergibt die Grenzgeschwindigkeit  $V_{Gr}$ .

Die Untersuchungen zur Bestimmung der Grenzgeschwindigkeiten von Seiten der UdSSR erfolgten in einem Geschwindigkeitsbereich  $3 \leq V \leq 10$  m/s bei den Kavitationszahlen  $\sigma_v = 1,0$  und  $1,36$  sowie konstanter Strouhalzahl. Auf Grund des großen Unterschiedes der Grenzgeschwindigkeiten zwischen Lack und den Propellerwerkstoffen wurde für Lack und Weißmetall (UdSSR) die Stelle des Sekundärkollapses zur Bestimmung von  $V_{Gr}$  verwendet. Im Anschluß daran wurden Versuche mit den Proben aus Weißmetall (UdSSR), Silumin, Messing ЛМцЖ 55-3-1, Bronze АЖН 9-4-4 und aus der Legierung „Newa 70“ unter Verwendung der Stelle des Primärkollapses durchgeführt. Die Ergebnisse sind in dem Bild 5 aufgetragen und in der Tafel 1 zusammengefaßt worden. Die Untersuchungen zeigten weiterhin, daß die Grenzgeschwindigkeit im großen Kavitationstunnel näherungsweise um die Wurzel aus dem Maßstab kleiner ist.

Bei den Untersuchungen im Kavitationstunnel der DDR erfolgten die Experimente in einem Geschwindigkeitsbereich von  $3,9 \leq V \leq 8$  m/s bei der Kavitationszahl  $\sigma_v = 1,0$  und bei der Strouhalzahl  $S = 1,0$  mit beiden Kavitatoren für den Lack mit einschichtigem und zweischichtigem Aufbau sowie für Weißmetall (DDR) SnSb8Bi2. Auf

Tafel 1. Verhältnis der Grenzgeschwindigkeiten der Propellerwerkstoffe zu Lack; mittlerer Kavitationstunnel,  $\sigma_v = 1,3; S = 0,8$  (UdSSR)

Material	$V_{Gr}$ m/s	K
Lack	1,5	1
Weißmetall	4,1	2,8
Silumin	4,4	3,0
Messing ЛМцЖ 55-3-1	5,8	4,0
Bronze АЖН 9-4-4	6,2	4,3
„Newa 70“	7,2	5,0

Tafel 2. Verhältnis der Grenzgeschwindigkeiten der Propellerwerkstoffe zu Lack (DDR)

Material	großer Kavitator				kleiner Kavitator	
	$\sigma_v = 1,0$		$\sigma_v = 1,25$		$\sigma_v = 1,0$	
	$V_{Gr}$ m/s	K	$V_{Gr}$ ms	K	$V_{Gr}$ m/s	K
Lack	2,4	1	3,0	1	3,25	1
Weißmetall SnSb8Bi2	4,0	1,67	5,2	1,73	5,25	1,62
Messing G-CuZn37AlFeMn3	5,75	2,40	—	—	—	—

Grund der geringeren Intensität wurden die Messingproben G-CuZn37AlFeMn3 nur mit dem großen Kavitator untersucht. Bei der Kavitationszahl  $\sigma_v = 1,25$  wurden mit dem großen Kavitator die Grenzgeschwindigkeiten für Lack und Weißmetall bestimmt. Die Ergebnisse sind im Bild 6 aufgetragen und in Tafel 2 zusammengefaßt worden. Diese Ergebnisse bestätigen, daß das Verhältnis der Grenzgeschwindigkeiten nicht von der Versuchsanlage und den Versuchsbedingungen abhängt. Das Verhältnis zwischen Lack und Metallen unterscheidet sich zwar von den Ergebnissen der sowjetischen Seite, jedoch stimmt das Verhältnis der Grenzgeschwindigkeiten zwischen Weißmetall und Messing recht gut überein. Offensichtlich sind diese Unterschiede mit den verschiedenen Methoden der Bestimmung der Grenzgeschwindigkeiten verbunden. Zwischen Einschicht- und Zweischichtlackierung traten Differenzen auf, die jedoch innerhalb der Genauigkeit der Bestimmung der Grenzgeschwindigkeit liegen.

Bezüglich des Maßstabefflusses ergibt sich ein Wert von  $1,35$ , der recht nahe dem Wert aus der Wurzel des geometrischen Maßstabes kommt ( $1,414$ ). Außer den Fehlermöglichkeiten bei der Ermittlung des Erosionsbeginns und der Grenzgeschwindigkeiten ergibt sich auch noch ein Einflußfaktor aus der Verletzung des Ähnlichkeitsgesetzes, da die Untersuchungen mit den beiden Kavitatoren in der gleichen Meßstrecke erfolgten.

### 3.4. Bestimmung der Intensität der erosiven Zerstörungen

Um den Zusammenhang zwischen der Zerstörungsgeschwindigkeit des Materials und der Kavitationseinwirkung zu ermitteln, wurden mittels der speziellen Versuchsanlagen systematische Versuche mit Proben in den beiden Kavitationstunneln der UdSSR durchgeführt. Die Proben aus Weißmetall, Silumin und Bronze АЖН 9-4-4 wurden einem Dauerversuch unterzogen, wobei sie periodisch abgewogen und die Abhängigkeit der Erosionsgeschwindigkeit und des Gesamtgewichtsverlustes von der Versuchsdauer ermittelt wurde. Die Zerstörungsintensität wird dabei durch die Erosionsgeschwindigkeit während der stationären Periode der Erosionszerstörung charakterisiert. In Bild 7 sind zwei Proben aus Bronze АЖН 9-4-4, die im mittleren und großen Kavitationstunnel untersucht wurden, abgebildet.

Die Untersuchungen erfolgten bei unterschiedlichen Zustromgeschwindigkeiten im Bereich  $5,5 \leq V \leq 8$  m/s bei konstanten Strouhal- und Kavitationszahlen.

Die Analyse der Versuchsergebnisse erfolgte auf der Grundlage der im Kapitel 2 dargelegten Ausführungen. In diesem Zusammenhang wurden die Ergebnisse in der Form des

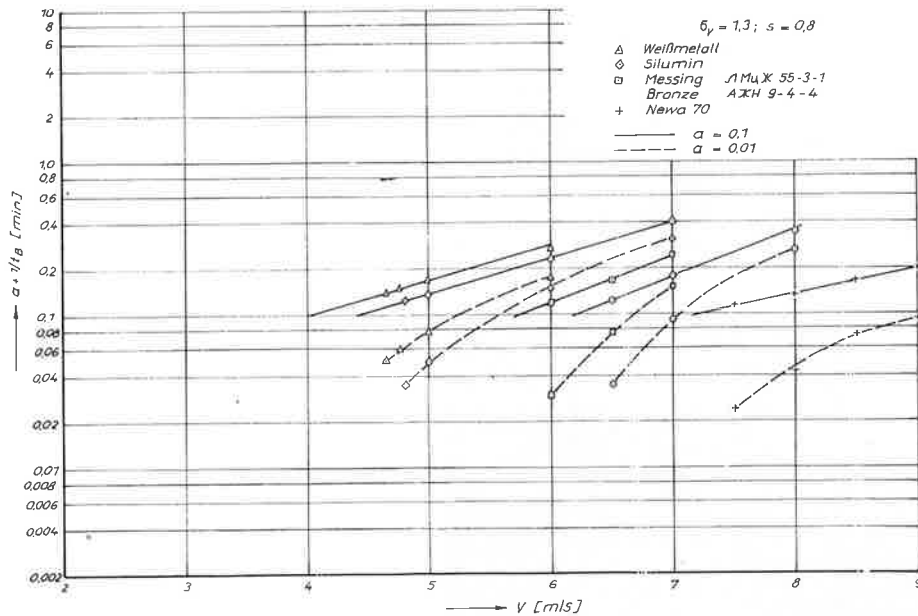


Bild 5. Bestimmung der Grenzschnelligkeiten für die verschiedenen Propellerwerkstoffe; mittlerer Kavitationstunnel (UdSSR)

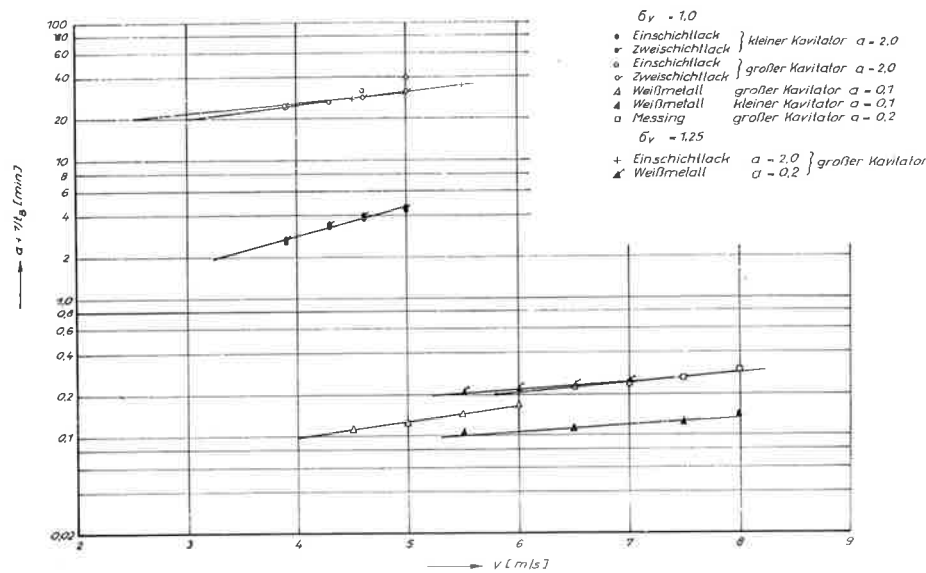


Bild 6. Bestimmung der Grenzschnelligkeiten für verschiedene Propellerwerkstoffe und für Lack (DDR)

Ausdruckes (9) in Bild 8 dargestellt. Der eingezeichnete Funktionsverlauf entspricht einer Mittelwertkurve dieser Funktion. Damit läßt sich für ein beliebiges Geschwindigkeitsverhältnis der Wert  $K_1$  bestimmen. Aus der Streuung der Meßpunkte läßt sich allerdings ersehen, daß damit der Materialverlust nur näherungsweise berechnet werden kann. Speziell bei größeren Geschwindigkeitsverhältnissen  $V/V_{Gr}$  ist der Verlauf nur ungenügend durch Meßpunkte belegt, wobei dieser Bereich nur von Sonderkonstruktionen erreicht werden dürfte.

Die Flächen der Erosionszonen der Proben sind dabei entsprechend dem Maßstabgesetz proportional der 2. Potenz des Maßstabes. So betrug z. B. nach dem Dauerversuch im großen Kavitationstunnel mit einer Probe aus Silumin die erodierte Fläche  $A_{erGr} \approx 3,0 \text{ cm}^2$ ; unter analogen Verhältnissen im mittleren Kavitationstunnel ergab sich  $A_{erGr} \approx 1,0 \text{ cm}^2$ . Damit entspricht dieses Verhältnis von 3:1 ungefähr dem Quadrat des Maßstabes ( $1,77^2 = 3,13$ ).

Analoge Untersuchungen wurden im Kavitationstunnel der DDR im Zusammenhang mit der Bestimmung der Grenzschnelligkeiten durchgeführt. Dabei wurde die quadratische Abhängigkeit der Fläche vom Maßstab bestätigt. Beim Vergleich der Erosionsgeschwindigkeiten zeigen sich recht große Unterschiede und eine stärkere Streuung zu den Ergebnissen der UdSSR. Die Ursache liegt in der we-

sentlich geringeren Erosionsintensität, und damit wurde innerhalb der zur Verfügung stehenden Versuchszeit mit den Proben nicht die stationäre Phase erreicht.

#### 4. Methode zur Vorhersage der Kavitationserosion

##### 4.1. Berechnungsschema

Zuerst wird mit dem Modellpropeller mit Lacküberzug im Kavitationstunnel die Grenzschnelligkeit bestimmt. Dabei muß das Geschwindigkeitsfeld vor dem Propeller möglichst dem der Großausführung entsprechen. Dies geschieht in der Regel mittels Nachstromsieben bzw. durch den Einbau von Körpern in die Meßstrecke. Schräganströmung bei geneigten Wellen wird mittels spezieller Propellerdynamometer realisiert.

Zur Ermittlung der Grenzschnelligkeit wird zunächst die der Großausführung entsprechende Fortschrittschnelligkeit des Modellpropellers mit Lacküberzug berechnet.

$$V_M = V_N \frac{\sqrt{D_N/D_M}}{K} \quad (3)$$

Das Modell wird dann im Geschwindigkeitsbereich von der minimal möglichen Geschwindigkeit bis  $V_M$  untersucht,



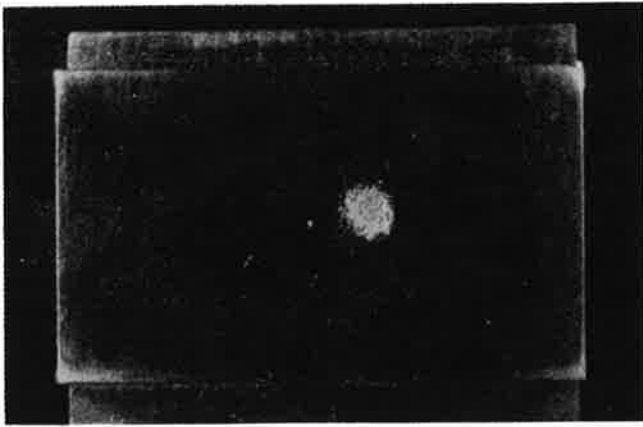


Bild 7. Zerstörte Materialproben aus Bronze AXH 9-4-4; mittlerer und großer Kavitationstunnel (UdSSR)

wobei  $J$  und  $\sigma_v$  dem zu untersuchenden Betriebspunkt des Schiffes entsprechen müssen. Die Bestimmung von  $V_{Gr}$  erfolgt entsprechend der bei den Proben beschriebenen Methoden. Wenn  $V_{Gr} \geq V_M$  ist, dann sind für die Großausführung keine Zerstörungen infolge Erosion zu erwarten. Wenn  $V_{Gr} \leq V_M$  ist, werden Erosionszerstörungen auftreten.

Um die Erosionsintensität am Großpropeller bestimmen zu können, ist es notwendig, die am Modellpropeller mittels Lacküberzug erhaltene Fläche der Erosionszone  $A_{erM}$ , die bei  $V_M$  ermittelt wurde, auf die Großausführung umzurechnen.

$$A_{erN} = A_{erM} \left( \frac{D_N}{D_M} \right)^2 \quad (10)$$

Dabei muß  $A_{erM}$  identisch mit der Grenzfläche sein, d. h. diese Fläche darf sich auch bei einer Versuchszeit  $t \rightarrow \infty$  nicht mehr verändern.

Als weitere Ausgangsgröße muß für das entsprechende Geschwindigkeitsverhältnis  $V/V_{Gr}$  aus Bild 8 der Wert von  $K_1$  ermittelt werden. Damit kann dann die Geschwindigkeit des Volumenverlustes mittels des Ausdrucks (9) berechnet werden.

Die mittlere Tiefe der Erosionszone berechnet sich dann entsprechend dem Ausdruck (11) zu

$$h_m \approx \left( \frac{dv}{dt} \cdot t \right) / A_{erN} \quad (11)$$

Aus Untersuchungen [13] ist bekannt, daß die maximale Tiefe der Erosionszone mit der 3. Potenz von der Versuchsdauer in der stationären Phase des Erosionsvorganges abhängt, so daß gilt  $h_{max} \approx \sqrt[3]{t}$ . Die maximale Tiefe wächst damit immer langsamer und nähert sich einem bestimmten Wert. Für die Berechnung des zeitlichen Verlaufs der maximalen Tiefe ergibt sich auf der Grundlage von  $h_m$  folgender Ausdruck

$$h_{max} \approx K_2 \sqrt[3]{h_m} \quad (12)$$

$K_2$  entspricht dabei dem Grenzwert, dem sich  $h_{max}$  nähert, und  $h_m$  wird mittels des Ausdruckes (11) berechnet.  $K_2$  ist immer mit der Dimension mm und  $h_m$  mit der Dimension cm einzusetzen.  $h_{max}$  ergibt sich dann in mm.

#### 4.2. Auswertung der Erosionszerstörungen am Propeller des Tragflügelbootes „Raketa“

Es ist von einer Vielzahl von Schiffspropellern bekannt, daß ihre Einsatzdauer infolge von Kavitationserosion begrenzt ist. Allerdings liegen bei wenigen nur die entsprechenden Angaben hinsichtlich des für die Zerstörung verantwortlichen Betriebszustandes und der Betriebsdauer vor.

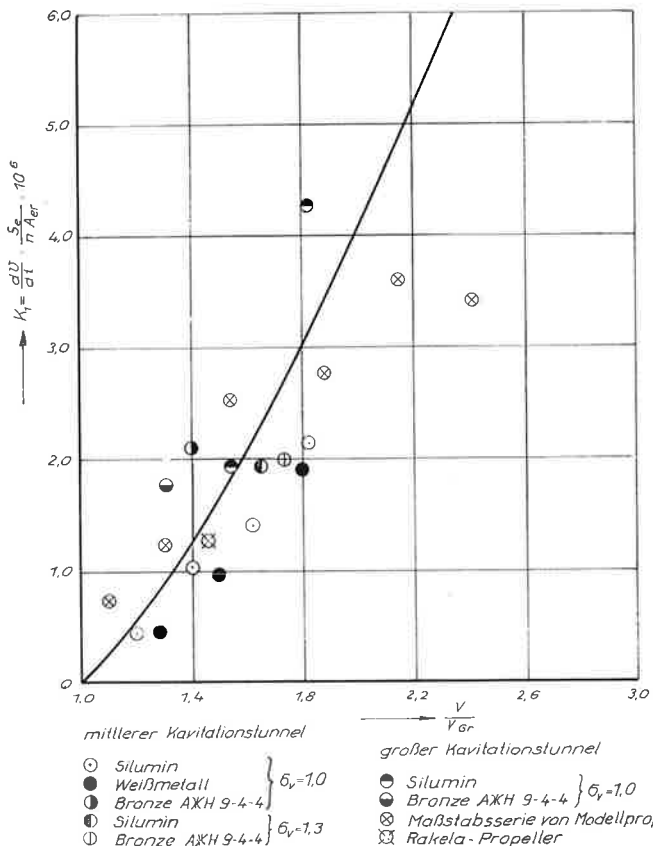


Bild 8. Proportionalitätskonstante  $K_1$  in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsverhältnis  $V/V_{Gr}$

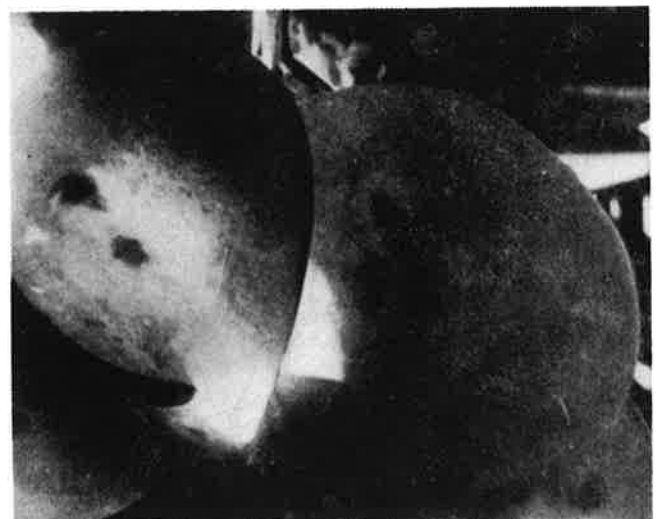


Bild 9. Propeller des Tragflügelbootes vom Typ „Raketa“; Lage der Erosionszonen

Bei Frachtschiffen und Tragflügelbooten ist ein Dauerbetrieb in einem bestimmten Betriebszustand kennzeichnend. Daher wurde für die Überprüfung der ausgearbeiteten Methode der Propeller alter Konstruktion (größere Krümmung der Druckseite gegenüber der neuen Konstruktion und damit ausgeprägte Druckseitenkavitation) ausgewählt.

Das Geschwindigkeitsfeld in der Propellerkreisebene wird hier durch die Schräganströmung infolge der Wellenneigung von  $\varphi = 12^\circ$  und dem vor dem Propeller angeordneten Wellenbock eindeutig bestimmt. Die Angaben über die Erosionszerstörung als Ergebnis eines Dauerbetriebes für den Großpropeller sind bekannt. Intensive Erosionszerstörungen wurden bei diesem Propeller in der Mitte der Druckseite festgestellt [14]. Die Besichtigung zeigte nach 400 Std. Betriebszeit eine maximale Tiefe der Erosionszone von  $h_{\max} = 5 \text{ mm}$ . Der Propeller aus Messing ЛМЦК 55-3-1 mit einem Durchmesser von  $D_N = 0,65 \text{ m}$  arbeitet dabei mit einer Drehzahl von  $n = 26,6 \text{ s}^{-1}$  und bringt das Schiff auf eine Geschwindigkeit von  $V_N = 65 \text{ km/h}$  ( $J = 1,04$ ,  $\sigma_V = 0,7$ ). Das Bild 9 zeigt die Ansicht der beschädigten Flügel.

Die Experimente mit dem Modellpropeller  $D_M = 0,2 \text{ m}$  mit Lacküberzug erfolgten im mittleren Kavitationstunnel der UdSSR und im Kavitationstunnel der DDR. Die entsprechenden Versuchsanordnungen sind den Bildern 10 und 11 zu entnehmen.

Der Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Angaben von Besichtigungen der Großausführungen bestätigte die Richtigkeit der Annahme, daß die Kavitation modelliert werden kann und die im Kavitationstunnel durchgeführten Versuche in diesem Falle zuverlässig sind (Bild 12).

Die Geschwindigkeit, bei der die Versuche im Kavitationstunnel durchzuführen sind, berechnet sich entsprechend dem Ausdruck (2) und unter Berücksichtigung des Faktors

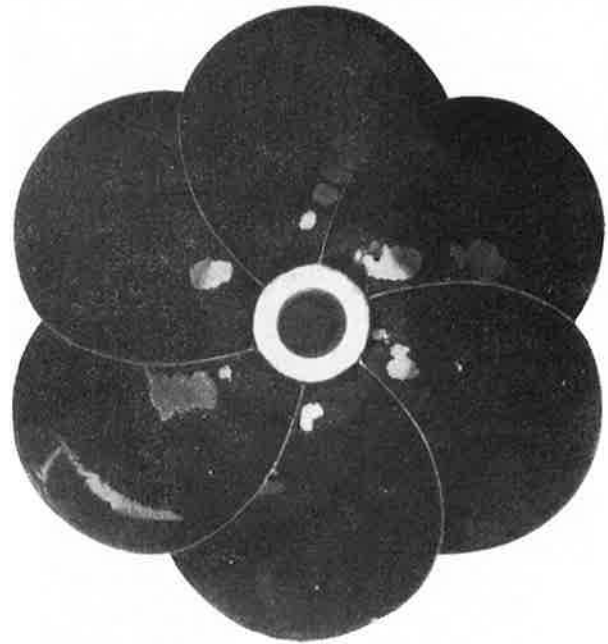


Bild 12. Ansicht des Modellpropellers mit Lacküberzug nach dem Versuch

$K = 4$  für Lack zu Messing zu  $V_M = 8,1 \text{ m/s}$ . Dabei stellt sich nach ausreichend langer Versuchsdauer eine Grenzfläche von  $A_{erGrM} \approx 2 \text{ cm}^2$  ein. Die Grenzfläche für den Großpropeller ergibt sich damit zu  $A_{erGrN} \approx 21 \text{ cm}^2$ .

Die Grenzggeschwindigkeit, die im Ergebnis systematischer

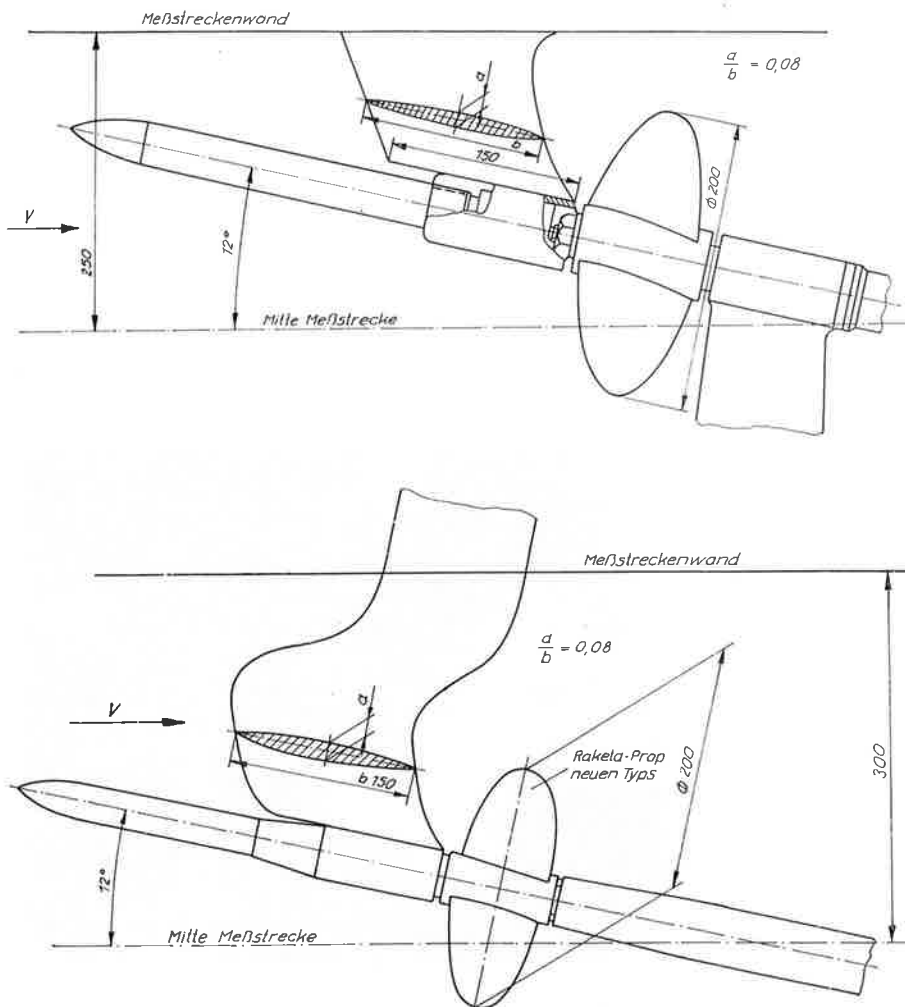


Bild 10. Skizze des Versuchsaufbaus mit dem „Raketa“-Propeller im mittleren Kavitationstunnel der UdSSR

Bild 11. Skizze des Versuchsaufbaus mit dem „Raketa“-Propeller im Kavitationstunnel der DDR



Untersuchungen bestimmt wurde, beträgt  $V_{GrM} = 5,62$  m/s für die Untersuchungen in der UdSSR und  $V_{GrM} = 5,45$  m/s in der DDR. Dieses Ergebnis, welches mit zwei verschiedenen Modellen ein und desselben Propellers erzielt wurde, ist als sehr gut zu bezeichnen.

Aus der Kenntnis des Geschwindigkeitsverhältnisses  $V_M/V_{GrM} \approx 1,45$  ergibt sich für die Konstante  $K_1 \approx 1,6 \cdot 10^{-5}$  N/cm<sup>2</sup> (Bild 8). Bei einer Deformationsenergie  $S_e = 9000$  N/cm<sup>2</sup> für den Propellerwerkstoff Messing LMnH 55-3-1 ergibt sich unter Berücksichtigung der obigen Größe die Abtragungsgeschwindigkeit  $dv/dt = 1,6 \cdot 10^{-2}$  cm<sup>3</sup>/h. Die mittlere Tiefe der Erosionszone und die maximale Tiefe berechnen sich entsprechend den Ausdrücken (11) und (12) zu  $h_m \approx 0,3$  cm und  $h_{max} \approx 0,5$  cm, wenn nach [15]  $K_2 = 8$  mm angesetzt wird, für eine Betriebszeit von 400 Std. Somit zeigt sich bei diesem Propeller eine gute Übereinstimmung zwischen Berechnung und den Ergebnissen der Besichtigung der Großausführung.

### 5. Zusammenfassung

Im Ergebnis von Untersuchungen in den Versuchsanlagen des ZWFI „Akademik A. N. Krylow“ wurden die Kriterien der Modellierung von Erosionserscheinungen, die bei starker, zeitlich veränderlicher Kavitation auftreten, erarbeitet. Diese Kriterien wurden durch die Resultate des experimentellen Studiums der Erosion an Materialproben verschiedener Werkstoffe mittels Einrichtungen verschiedenen Maßstabs und an Modellpropellern bestätigt.

Unter Ausnutzung dieser Kriterien wurde eine Methode der Vorhersage der Kavitationserosion an Schiffspropellern und ihrer Intensität auf der Grundlage von Modelluntersuchungen im Kavitationstunnel, in einem der Großausführung entsprechenden Nachstromfeld, abgeleitet. Bei dieser Methode wird ein Lacküberzug als „weiche Oberfläche“ eingesetzt.

Die Leistungsfähigkeit der Methode wurde für den Fall erodierter Propeller des Tragflügelbootes vom Typ „Raketa“ überprüft.

Die im Kavitationstunnel der DDR ermittelten Grenzgesehwindigkeiten für den Lacküberzug und eine Reihe von Propellerwerkstoffen sowie der Einfluß des Maßstabes auf diese bestätigten die von der UdSSR getroffene Annahme, daß das Verhältnis der Grenzgesehwindigkeiten verschiedener Materialien nicht von den Versuchsbedingungen abhängt.

Die Ergebnisse bezüglich des Maßstabeeinflusses auf die Grenzgesehwindigkeiten und die Abmessungen der Erosionszone, die in den Versuchseinrichtungen beider Länder erzielt wurden, stimmen auch überein. Im Zusammenhang mit der geringeren Erosionsintensität und des damit verbundenen geringen Materialverlustes der Proben bei den Untersuchungen in der DDR, passen diese Ergebnisse nur teilweise in die von der UdSSR abgeleitete universelle Abhängigkeit für die Erosionsgeschwindigkeit.

### 6. Bezeichnungen

a	Konstante für die Ermittlung der Grenzgesehwindigkeit
$A_{er}$	durch Erosion angegriffene Körperoberfläche
$A_{erGr}$	durch Erosion angegriffene Körperoberfläche bei gegen unendlich gehender Einsatzdauer
D	Durchmesser
$D_M$	Durchmesser des Modells

$D_N$	Durchmesser der Großausführung
$h_m$	mittlere Tiefe der erodierten Zone auf der Körperoberfläche
$h_{max}$	maximale Tiefe der erodierten Zone auf der Körperoberfläche
$J = V/(n \cdot D)$	Fortschrittsgrad
K	Verhältnis der Grenzgesehwindigkeit eines Werkstoffes zu der von Lack
$K_0; K_1$	Konstanten zur Ermittlung der Erosionsgeschwindigkeit
$K_2$	Konstante zur Bestimmung der maximalen Erosionstiefe $h_{max}$
n	Drehzahl
$p_0$	statischer Druck
$p_v$	Dampfdruck des Wassers
$S = (n \cdot D)/V$	Strouhalzahl
$S_e$	Deformationsenergie
t	Zeit
$t_B$	Zeitdauer zwischen Versuchsbeginn und Erosionsbeginn
V	Fortschrittsgeschwindigkeit
$V_{Gr}$	Grenzgesehwindigkeit für das jeweilige Material unterhalb der bei Einhaltung aller Parameter keine Materialschädigung eintritt
$V_M$	Fortschrittsgeschwindigkeit des Modells
$V_N$	Fortschrittsgeschwindigkeit der Großausführung
v	erodiertes Materialvolumen
w	mittlere Auftreffgeschwindigkeit des Flüssigkeitsvolumens auf die Körperoberfläche
$\rho$	Dichte des Wassers
$\sigma_v = (p_0 - p_v) \left( \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \right)$	auf die Fortschrittsgeschwindigkeit bezogene Kavitationszahl

### 7. Literatur

- [1] Ackl, A.: Zur Bestimmung des Kavitationsbeginns an ebenen Gitterprofilen in realen Strömungen. Dissertation Universität Rostock, Technische Fakultät 1967
- [2] Rayleigh, J. W.: On the Pressure Developed in a Liquid During the Collaps of a Spherical Cavity. Philosophical Magazine, London 6 (1917) 34, S. 94–98
- [3] Knapp, R. T., Daily, J. W., Hammit, F. G.: Cavitation. New York: Mc. Graw-Hill Book Company 1970.
- [4] Eisenberg, P., Preiser, S., Thiruvengadam, A.: On the Mechanism of Cavitation Damage and Methods of Protection. Transactions SNAME 73 (1965) S. 241–286
- [5] Plesset, M. S.: The Dynamics of Cavitation Bubbles. Journal of Applied Mechanics 16 (1949) 228–231
- [6] Plesset, M. S.: The Pulsation Method for Generating Cavitation Damage Transactions ASME, ser. D (1963) vol. 85, S. 360–364
- [7] Thiruvengadam, A.: Scaling Laws for Cavitation Erosion. Proc. of the Symposium on Unsteady Flow of Water, IUTAM, Leningrad, 1971, S.405–426
- [8] Emerson, A.: Cavitation Patterns and Erosion, Model – full scale Comparison. 14. ITTC 1975, Ottawa, Report of Cavitation Committee
- [9] –: Recommendations of the Cavitation Committee. 15. ITTC 1978, Den Haag, Report of Cavitation Committee
- [10] Thiruvengadam, A.: The Concept of Erosion Strength. Hydronautics, Incorporated Technical Report 233–9, December 1965, (siehe auch „Symposium on Erosion by Cavitation or Impingement“, ASTM Annual Meeting, Atlantic City, N. J., Juni 1966)
- [11] Georgievskaja, E. P.: Kavitacionnaja erozija grebnych vintov i metody bor'by s nej. Leningrad: „Sudostroenie“ 1978, S. 76
- [12] ebenda, S. 10–36
- [13] ebenda, S. 71
- [14] ebenda, S. 52
- [15] ebenda, S. 76
- [16] Trilling, L.: The Collapse and Rebound of a Gas Bubble. Journal of Applied Physics 23 (1952) S. 14–17
- [17] Selke, W., Mehmel, M.: Modellierung der Kavitationserosion an Propellern im Kavitationskanal. Seewirtschaft Berlin, 10 (1978) 4, S. 189–190