

UNTERSUCHUNG VON SCHICHT-, BLASEN- UND WOLKENKAVITATION UND DER DAMIT VERBUNDENEN EROSIONSPROBLEME

Dipl.-Ing. Hans-Jürgen Heinke
Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH

Kurzfassung

Das Ziel des Vorhabens besteht in der Weiterentwicklung der Versuchsmethodik für Erosionsuntersuchungen und der Entwicklung eines weichen Überzugs (Erosionslack) für Modellpropeller mit reproduzierbaren Eigenschaften. Versuche mit einem Kavitator und einem schräg angeströmten Propeller zeigten die Güte des Erosionslackes auf. Zur Überprüfung der Versuchsmethodik wurden systematische Erosionsversuche durchgeführt. Die Erosionsprognose wurde mit den Erosionserscheinungen am Großausführungspropeller verglichen. Ein Ausblick auf die weiteren Arbeiten im Vorhaben wird gegeben.

1. Einleitung

Die zerstörende Wirkung der Kavitation (Kavitationserosion) am Propeller wird schon seit mehr als 70 Jahre untersucht. Aufbauend auf der grundlegenden Arbeit von RAYLEIGH /1/ zum Zusammenfall einer Kavitationsblase in idealer Flüssigkeit, folgten eine Vielzahl von Arbeiten sowohl zum Werkstoffverhalten, zur Theorie der Kavitationserosion, als auch zur Entwicklung von experimentellen Methoden. Die Meinungen der Wissenschaftler zu den maßgeblichen Ursachen der Kavitationserosion gehen weit auseinander, weil gleichzeitig mechanische, elektrochemische und chemische Effekte wirken.

Drei Vorgänge können beim Zusammenfall der Kavitationsblase hohe Spannungen im Werkstoff hervorrufen:

- Die Staudruckwelle beim Einströmen des umgebenden Wassers in die implodierende Kavitationsblase,
- die Aussendung von Stoßwellen im Endstadium des Kollapses bei der Komprimierung der einfließenden Flüssigkeit und
- die stoßartige Belastung des Werkstoffes durch einen Mikrowasserstrahl mit hoher Geschwindigkeit (ca. 60 ... 200 m/s).

Untersuchungen von SHIMA et.al. /2/, KIMOTO /3/ und Analysen in den ITTC-Reports /4/, /5/ zeigen, daß sowohl Stoßwellen als auch Mikrojets örtlich hohe Drücke erzeugen und daß die Wechselwirkung der Kavitationsblasen beachtet werden muß. Sehr zahlreich sind die Versuche auf experimentellem Weg die Prozesse in der Werkstoffoberfläche bei der Kavitationserosion zu studieren. Die Berichte der ITTC /4/, /5/, /6/ geben einen guten Überblick. Die Untersuchungen zur Werkstoffschädigung lassen den Schluß zu, daß primär die beim Blasen-kollaps entstehenden Kräfte die Zerstörung bewirken. Alle Kavitationsarten können mehr oder weniger zu Erosionsschäden führen (KATO et.al. /7/). Die von EMMERSON /8/ für das Kavitations-Komitee der 13. ITTC durchgeführten Vergleiche von Kavitationserscheinungen in Modellversuchen und den später am Schiffspropeller aufgetretenen Schäden haben ergeben, daß die Erscheinungen der Blasen- und Wolkenkavitation am häufigsten zu Schädigung

führen. Untersuchungen an Tragflügeln haben gezeigt, daß die Erosionsschäden infolge der Blasen- und der am Ende der Kavitationsschicht entstehenden Wolkenkavitation am stärksten sind (VAN DER MEULENM et.al. /9/). Auf Grund der Kompliziertheit des Vorganges der Kavitationserosion sind die Kenntnisse zum Erosionsmechanismus bei weitem noch nicht vollständig, zumal die Propellerkavitation selbst ein komplizierter, instationärer, physikalischer Prozeß ist.

2. Ziele

Die Vermeidung von Propellerschäden durch Kavitationserosion bekommt für Werften und Reedereien wegen der größer werdenden Schiffsgeschwindigkeit wieder stärkere wirtschaftliche Bedeutung. Zur Zeit kann für Propeller nur das Experiment Aufschluß über eine Erosionsgefährdung geben.

Die Arbeiten der SVA Potsdam beinhalten hauptsächlich die Verifizierung und Weiterentwicklung der von GEORGIJEWSKAJA et.al. /10/ entwickelten Prognosemethode für die Erosion. Folgende Probleme und Aufgaben sollen gelöst werden:

- Entwicklung eines empfindlichen weichen Überzugs (Erosionslack)
Die derzeitige Versuchsmethode der SVA zur Vorhersage des Auftretens von Erosion, der Erosionsfläche und -intensität wurde auf der Basis des weichen Überzuges für kleine Schiffe ($\lambda = 3$ bis 5) entwickelt und am Raketa-Propeller überprüft. Durch die Entwicklung eines sehr empfindlichen Lackes sollen Parameter erreicht werden, die eine erfolgreiche Anwendung der Methode auf konventionelle Propeller ($\lambda = 10$ bis 30) erwarten lassen.
- Analyse der Erosionsschäden von Antriebsystemen
Die Versuchsmethode soll durch die Auswertung von Erosionsschäden an Propellern der Großausführung und den Vergleich mit der experimentellen Prognose überprüft werden.
- Prognose der Erosionsintensität
Der Einfluß von Versuchsparametern, wie Gasgehalt, Geschwindigkeit und Drehzahl auf die Prognoseergebnisse soll geklärt werden. Weiterhin sollen Hinweise für die Versuchsdurchführung erarbeitet werden.

3. Entwicklung eines Erosionslackes

Erosionsschäden können beim Arbeiten des kavitierenden Propellers bei inhomogener Zuströmung auftreten. Die Kavitationsblasen ändern ihre Form und Größe beim Flügelumlauf und können auf der Flügeloberfläche oder in ihrer Nähe implodieren. Die dabei auftretenden Kräfte bewirken eine elastische und plastische Deformation des Werkstoffes und führen bei sehr starken Kavitationswirkungen zu örtlichen Zerstörungen.

Aus Energiebetrachtungen läßt sich ableiten, daß für Erosionsversuche die Bedingung $D_P * V_P^2 = D_M * V_M^2$ einzuhalten ist. Die Geschwindigkeit bei denen die Erosionsversuche durchzuführen sind, ergibt sich dann zu $V_M = V_P * \sqrt{D_P / D_M}$. Diese Geschwindigkeit kann praktisch bei Modellversuchen im Kavitationstunnel nicht erreicht werden. Deshalb müssen bei den Versuchen Materialien mit einer deutlich geringeren Erosionsfestigkeit als die des Propellerwerkstoffes eingesetzt werden. Eine Möglichkeit ist die Aufbringung eines speziellen Erosionslackes auf die Flügeloberfläche. Dadurch kann die notwendige Versuchsge-

schwindigkeit vermindert werden $V_M = V_P * \sqrt{D_P / D_M} / k$. Der Koeffizient k berücksichtigt die relative Erosionsfestigkeit des Erosionslackes und des Großausführungspropellers.

In Zusammenarbeit mit der iLF Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft Lacke und Farben mbH wurde ein Speziallack entwickelt, der erosive Kavitationserscheinungen durch Haftungsverlust auf den Flügeln von Modellpropellern anzeigt. Die entwickelten Lackproben wurden im Kavitationstunnel hinsichtlich ihrer Eignung für Erosionsversuche untersucht. Dazu wurde der Lack auf eine Materialprobe aufgebracht und gezielt einer erosiven Kavitation ausgesetzt. Der Versuchsaufbau ist im Bild 1 dargestellt.

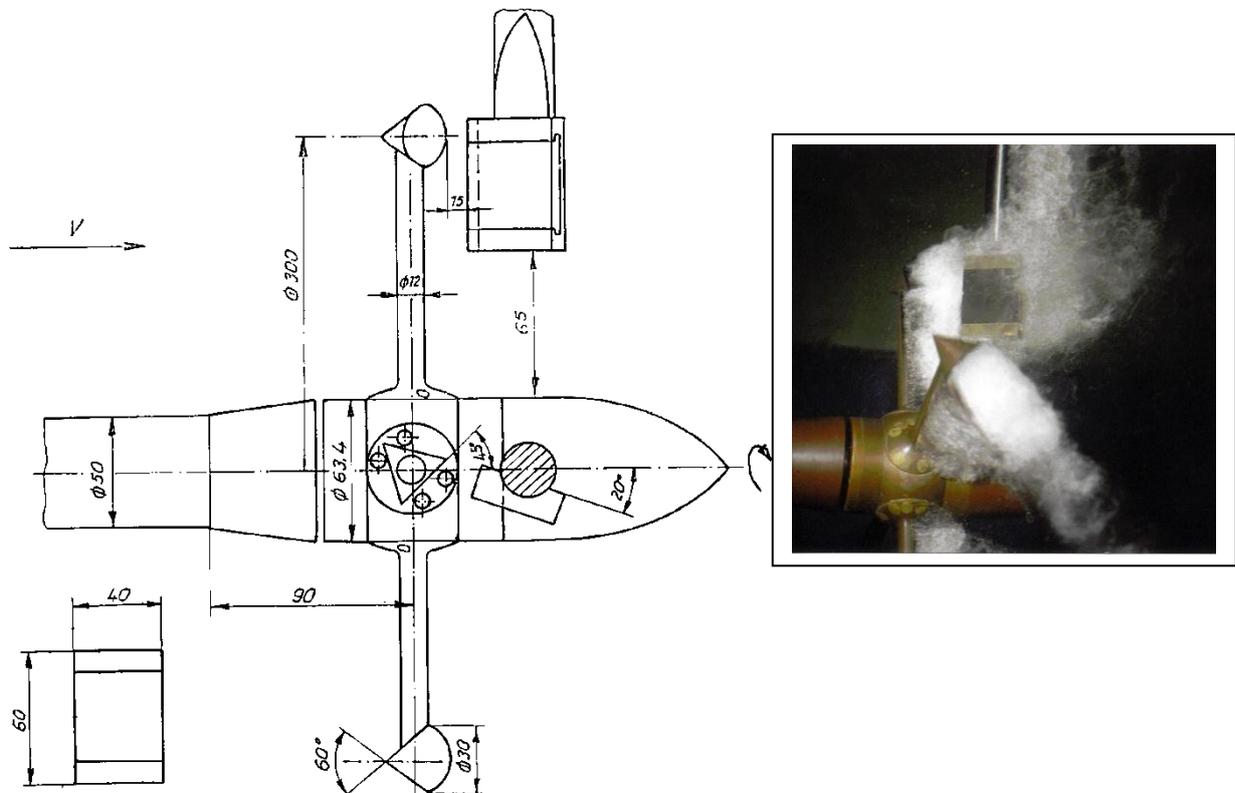


Bild 1: Versuchseinrichtung zur Untersuchung des Erosionslackes

Der Kavitationsblasenerzeuger (Kavitor) besteht aus einer Nabe mit vier Stäben, an denen Kegel angebracht sind. Am Kegel entsteht Kavitation, die unter bestimmten Arbeitsbedingungen zum Auftreten von Erosionszerstörungen am Probenkörper führt. Der Probenkörper besteht aus dem gleichen Material wie der Modellpropeller und ist mit dem Erosionslack beschichtet. Die Lackproben wurden jeweils 15 min der pulsierenden Kavitation ausgesetzt. Die Parameter Fortschrittsgrad $J = 1,0$ und Kavitationszahl $\sigma_V = 1,0$ wurden bei den Versuchen konstant gehalten, um für weitergehende Betrachtungen die Untersuchungen mit Propellermaterialien im Krylov-Institut und in der SVA Potsdam /10/ nutzen zu können.

Der Erosionslack soll örtlich durch erosive Kavitation abgetragen werden. Weiterhin muß bei gleichen Versuchsbedingungen die Zeit bis zum Beginn der Lackabtragung und die Größe der Erosionsfläche ähnlich sein. Das Bild 2 zeigt die Lackabtragungen an drei Probenkörpern, ermittelt bei gleichen Versuchsparametern.

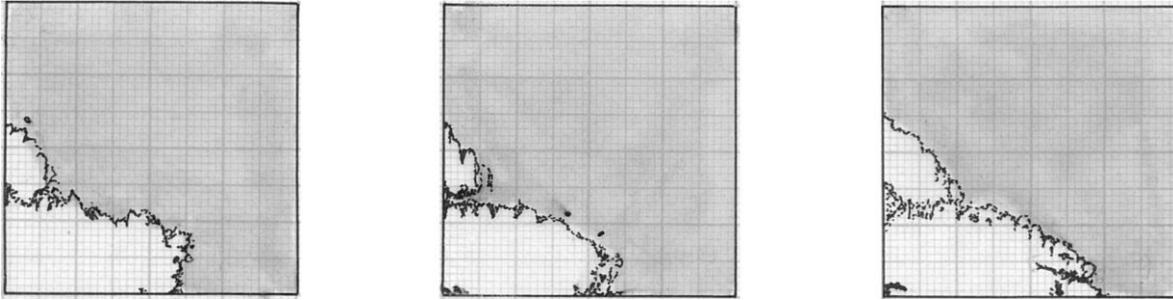


Bild 2: Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit der Lackabtragungen
 ($J = 1,0$; $\sigma_V = 1,0$; $V = 6,0$ m/s; $n = 7,63$ s⁻¹; Versuchszeit 15 min)

Bei kleinen Geschwindigkeiten, wenn pro Flächeneinheit eine Energie vorhanden ist, die kleiner ist als eine vom Werkstoff abhängige Größe, erfolgt keine Erosion sondern nur eine elastische Deformation des Materials. Die Geschwindigkeit, unterhalb der für eine gegebene Kavitation (J , σ_V) keine Erosion eintritt, wird als Grenzgeschwindigkeit bezeichnet. Sie wird für den Erosionslack durch die Variation der Anströmgeschwindigkeit und der Drehzahl bei J und $\sigma_V = \text{konstant}$ ermittelt. Das Bild 3 zeigt die Vergrößerung der Erosionsfläche mit der Erhöhung der Parameter V und n . Die Auswertung dieser Versuche ergibt für den untersuchten Erosionslack eine Grenzgeschwindigkeit $V_{GR} = 4,1$ m/s. Diese Grenzgeschwindigkeit ist ausreichend für qualitative Erosionsuntersuchungen (Bestimmung der Erosionsgefährdung und des Erosionsortes). Für Versuche zur Prognose der Erosionsintensität muß die Grenzgeschwindigkeit auf Werte um $V_{GR} = 1$ bis $1,5$ vermindert werden, um im Kavitationstunnel Betriebsparameter zu erreichen, die den energetischen Ähnlichkeitsbetrachtungen genügen /10/.

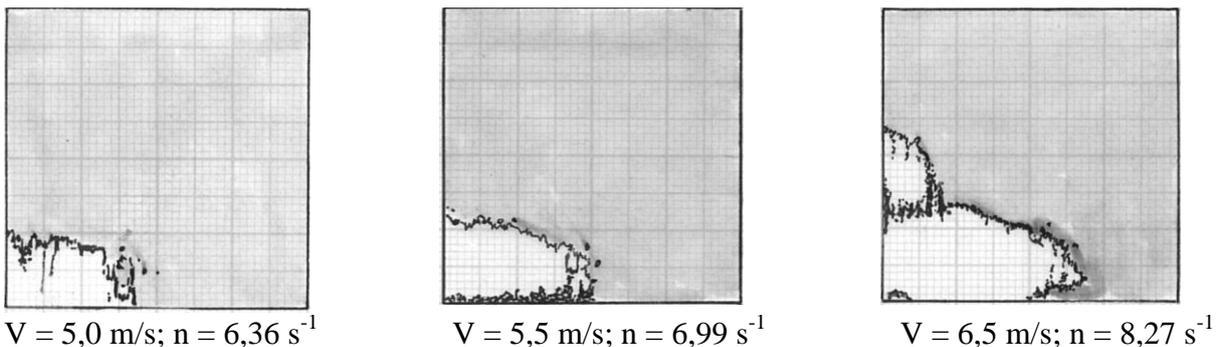


Bild 3: Einfluß der Versuchsparameter auf die Erosionsfläche
 $J = 1,0$ und $\sigma_V = 1,0 = \text{konstant}$

4. Erosionsversuche mit einem schräg angeströmten Propeller

Die Propeller schneller Schiffe sind infolge des Fahrttrimmwinkels und der Neigung der Wellenanlage intermittierenden Kavitationserscheinungen ausgesetzt, die insbesondere im Wurzelbereich häufig zu Erosionsschäden führen.

Für die Versuche wurde ein Propeller ($D_M = 0,25$ m, $P/D = 1,049$, $A_E/A_0 = 1,13$, $Z = 3$) ausgewählt, bei dem in der Großausführung Erosionserscheinungen registriert wurden. Der Propeller wurde mit dem Dynamometer H36 mit einer Wellenneigung von 13° angetrieben. Vor dem Propeller wurde ein Wellenbock angeordnet.

Die Kavitations- und Erosionsversuche wurden bei unterschiedlichen Betriebspunkten durchgeführt. Die Versuche zeigten, daß eine örtliche Lackabtragung erfolgt, wenn auf dem Propellerblatt Wolkenkavitation auftritt oder die Schichtkavitation gischtartig zerfällt. Es wurde weiterhin deutlich, daß die größte Erosionsgefährdung auf der Saugseite im Wurzelbereich und auf der Druckseite im Bereich der Druckausgleichsbohrungen besteht.

Im Bild 4 sind für einen Betriebspunkt ($J = 0,80$; $\sigma_v = 0,90$; $\varphi = 13^\circ$) die Kavitationserscheinungen für zwei Umlaufwinkel skizziert. Im Radienbereich $r/R = 0,30$ tritt Wolkenkavitation auf, die auf Grund der Schräganströmung stark pulsiert.

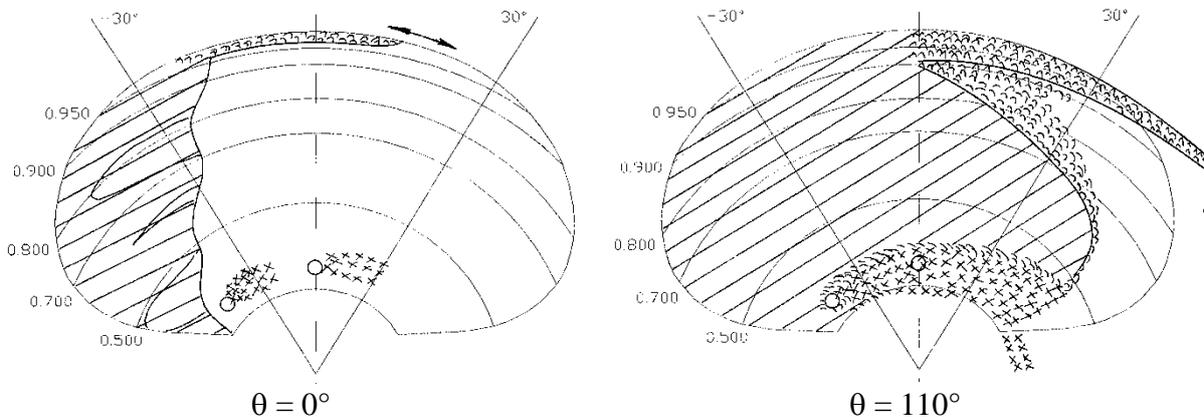


Bild 4: Kavitationserscheinungen auf der Saugseite im Modellversuch

Es ist bekannt, daß der Gasgehalt des Wassers Einfluß auf die Intensität und Ausdehnung der Kavitationserosion hat. Untersuchungen zeigen eine maximale Erosionsrate im Bereich von $\alpha/\alpha_s \approx 30\%$ (KNAPP et.al. /11/). Mit der Vergrößerung des Gasgehalts verringert sich die Erosionsrate. Beim höheren Gasgehalt erfolgt während des Blasenwachstums eine verstärkte Diffusion von Gasanteilen ins Blaseninnere. Ein hoher Gasgehalt im Inneren einer implodierenden Blase setzt die Implosionsgeschwindigkeit und damit die erosive Wirkung der Kavitation herab.

Zur Untersuchung des Einflusses der Versuchsparameter Drehzahl und Geschwindigkeit sowie des Gasgehaltes wurden systematische Versuche für einen vorgegebenen Betriebspunkt mit

$J = 0,80$; $\sigma_v = 0,90$ bei einer Wellenneigung von 13° durchgeführt. Im Bild 5 sind die Lackabtragungen beim Gasgehalt $\alpha/\alpha_s = 35\%$ und im Bild 6 bei $\alpha/\alpha_s = 65\%$ dargestellt.

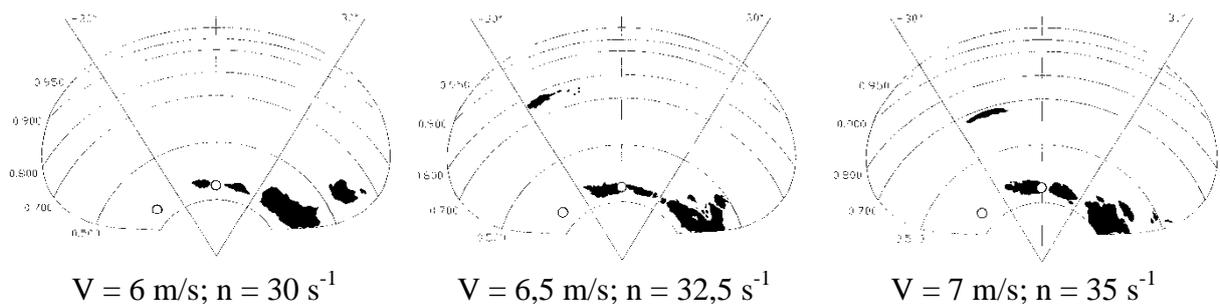


Bild 5: Variation der Versuchsparameter beim Gasgehalt $\alpha/\alpha_s = 35\%$

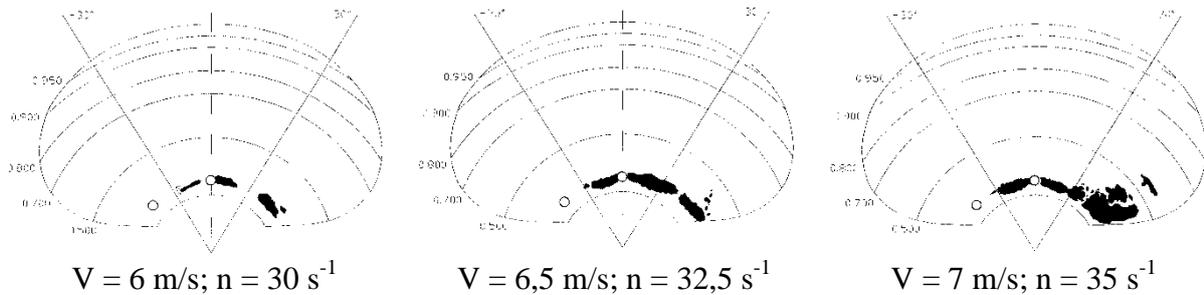


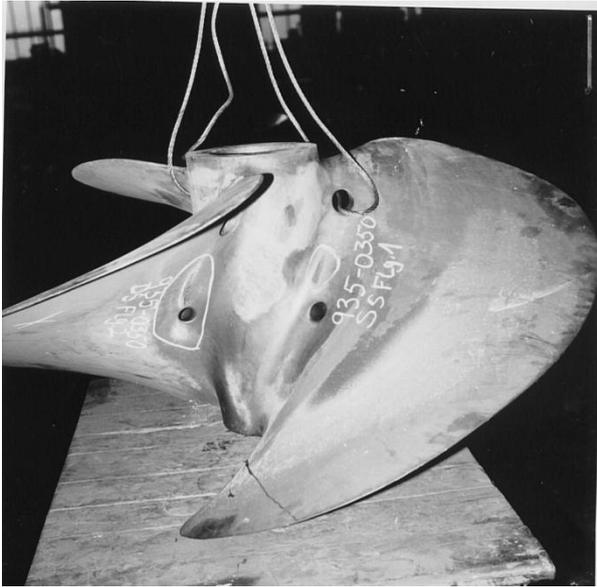
Bild 6: Variation der Versuchsparameter beim Gasgehalt $\alpha/\alpha_S = 65\%$

Es zeigt sich, daß mit der Zunahme des Gasgehaltes die Größe der erodierten Fläche abnimmt. Beim Gasgehalt von $\alpha/\alpha_S = 35\%$ wird eine Erosionsgefährdung z. T. auch im Radienbereich $r/R = 0,70$ bis $0,85$ infolge von Wolkenkavitation beim Umlaufwinkel θ ca. 220° ausgewiesen. Insbesondere beim höheren Gasgehalt beeinflußt die Wahl der Versuchsparameter die Größe der Erosionsfläche.

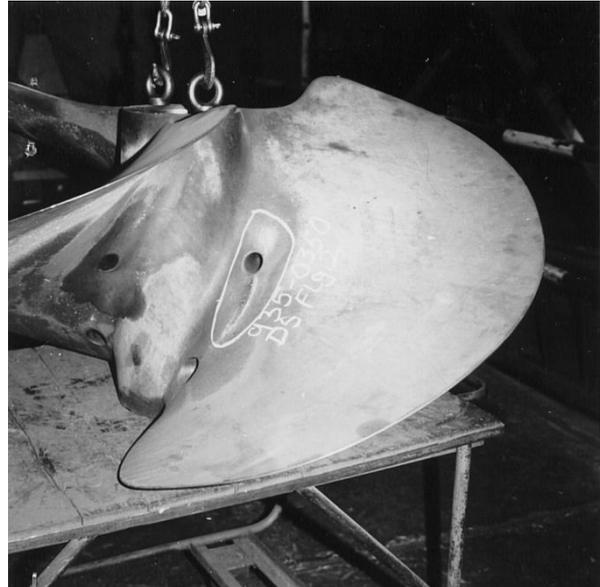
Unabhängig von den variierten Versuchsparametern wird eine Erosionsgefährdung im Wurzelbereich für die Saugseite des Propellers ausgewiesen. Der Propeller arbeitet im Großausführungsmaßstab im gesättigten Wasser (hoher Gasgehalt), so daß für eine Erosionsprognose der Gasgehalt im Kavitationstunnel nicht zu niedrig gewählt werden darf. Andererseits gibt ein Versuch bei niedrigem Gasgehalt einen guten Überblick hinsichtlich der Erosionsgefährdung (worse case Situation).

5. Korrelation der Versuchsergebnisse mit der Großausführung

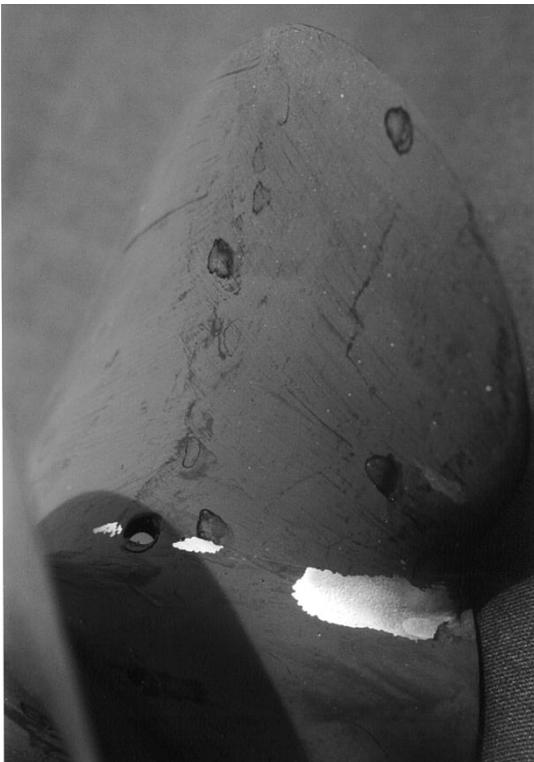
Besichtigungen des Großausführungspropellers zeigten auf der Saugseite im Wurzelbereich Erosionszonen zwischen den Druckausgleichsbohrungen und vor der Austrittskante. Auf der Druckseite wurde geringe Erosion zwischen den Druckausgleichsbohrungen festgestellt (Fotos Bild 7). Die Erosionsflächen und -tiefen am Großausführungspropeller sind gering. Der Vergleich mit den Modellversuchen zeigt, daß der Ort der Erosionsgefährdung relativ gut prognostiziert wird (Bilder 5, 6 und 8). Die Versuche bei geringen Gasgehalten und/oder hohen Anströmgeschwindigkeiten und Drehzahlen können zu einer Überbewertung der Erosionsgefährdung führen. Der Vergleich der experimentell ermittelten Erosionsgefährdung und der Erosionserscheinungen an Großausführungspropellern ist somit sehr wichtig, um die Versuchsmethodik zu validieren.



Saugseite



Druckseite

Bild 7: Großausführungspropeller

Saugseite



Druckseite

Bild 8: Erosionszonen im Modellversuch ($J = 0,80$; $\sigma_v = 0,90$; $\psi = 13^\circ$)

6. Kavitationsberechnungen

Für den Propeller wurden instationäre Berechnungen zur Ermittlung der Kavitation mit dem Programm UNCA 99 durchgeführt. Im Bild 9 sind für zwei Umlaufwinkel die berechneten Kavitationserscheinungen dargestellt.

Die Übereinstimmung der berechneten (Bild 9) und experimentell ermittelten Kavitationserscheinungen (Bild 4) ist relativ gut. Deutlich wird jedoch, daß die Berechnungen kaum Rückschlüsse auf die Erosionsgefährdung zulassen, weil die Wolkenkavitation nicht prognostiziert wird.

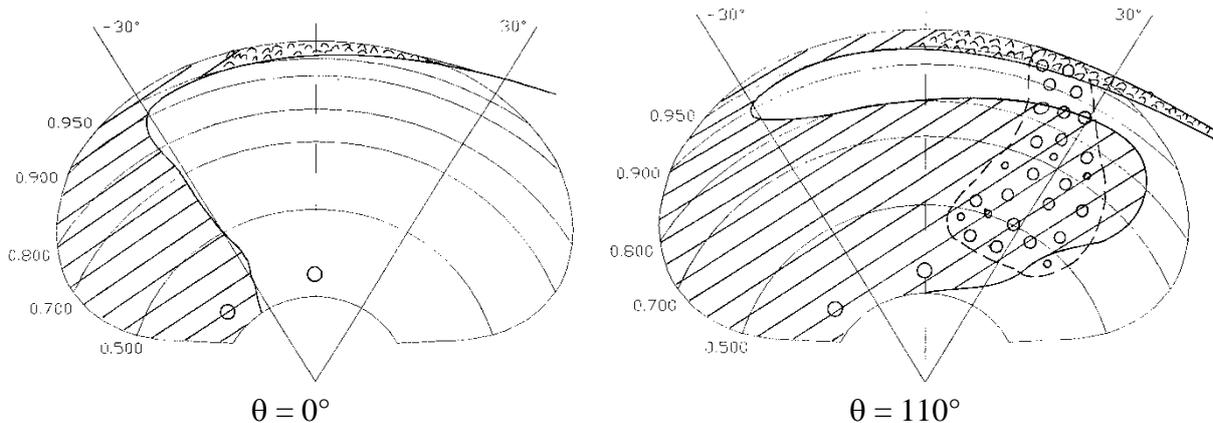


Bild 9: Berechnete Kavitationserscheinungen ($J = 0,80$; $\sigma_v = 0,90$; $\varphi = 13^\circ$)

7. Prognose der Erosionsintensität

Im Rahmen der weiteren Bearbeitung des Vorhabens sollen Untersuchungen zur Prognose der Erosionsintensität durchgeführt werden.

Die Vorgehensweise zur Prognose der Erosionsintensität kann vereinfacht wie folgt beschrieben werden:

- Bestimmung der Geschwindigkeit V_{GR} für den Lacküberzug, bei der keine Erosion bei gegebener Kavitation auftritt, mittels Kavitator
- Bestimmung V_{GR} für das Propellermaterial aus vorhandenen Messungen /10/
- Berechnung des Faktors k zur Berücksichtigung der relativen Erosionsfestigkeit des Materials des Prototyps und des weichen Überzugs
- Bestimmung V_{GR} für den Propeller mit Lacküberzug im Nachstromfeld
- Berechnung der theoretisch notwendigen Geschwindigkeit im Modellversuch V_M für den Erosionsversuch bei Einhaltung der energetischen Ähnlichkeit

$$V_M = \frac{V_S}{k} * \sqrt{\frac{D_S}{D_M}}$$

- Erosionsversuch mit dem Propeller bei der Geschwindigkeit V_M und den entsprechenden Parametern zur Realisierung des Betriebspunktes, beschrieben durch J und σ_V .
- Analyse der Versuchsergebnisse
 - wenn $V_{GR} \geq V_M$ dann werden keine Erosionsschäden eintreten
 - wenn $V_{GR} < V_M$ dann werden Erosionsschäden eintreten
- Berechnung der Erosionsfläche und mittleren Tiefe auf der Basis von Untersuchungen zu Materialkennwerten im Krylov Institut und in der SVA Potsdam (GEORGIEWSKAJA et.al /10/)
 - Ermittlung der Erosionsfläche $A_{ErosionM}$ aus dem Modellversuch
 - Umrechnung der Fläche auf die Großausführung

$$A_{ErosionS} = A_{ErosionM} * \left(\frac{D_S}{D_M} \right)^2$$

- Berechnung der Geschwindigkeit des Volumenverlustes

$$\frac{dV}{dt} = k_1 * A_{Erosion}^{3/2} * \frac{n}{S_e} \quad S_e - \text{Deformationsenergie}$$

- Berechnung der mittleren Tiefe der Erosionszone nach GEORGIEWSKAJA /12/

$$h_M \approx \left(\frac{dV}{dt} * t \right) / A_{Erosion}$$

Für den untersuchten Propeller im Betriebspunkt $J = 0,80$; $\sigma_V = 0,90$ wurde mit dem entwickelten Erosionslack eine Grenzgeschwindigkeit von $V_{GR} \leq 5$ m/s experimentell ermittelt. Die Geschwindigkeit V_M bei der unter Einhaltung der Ähnlichkeitsgesetze der Erosionsversuch durchzuführen ist, berechnet sich zu $V_M > 20$ m/s. Da $V_{GR} \ll V_M$ ergibt sich, daß am Großausführungspropeller Erosionserscheinungen auftreten wird, was durch die Besichtigung des Großausführungspropellers bestätigt wurde (siehe Abschnitt 5).

Bei der Bestimmung der Erosionsfläche und -tiefe muß der Einfluß der Versuchsparameter auf die Lackabtragungen berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 4). Hier laufen zur Zeit noch Untersuchungen, um die Korrelation zwischen Modell und Großausführung zu verbessern.

8. Schlußbemerkungen

Das Vorhaben wird noch bis August 2001 bearbeitet. Neben den Arbeiten zur Prognose der Erosionsintensität wird ein weiterer Schwerpunkt die Untersuchung der Erosionsgefährdung im Spitzenbereich des Flügels darstellen. Europäische Werften müssen sich in erster Linie durch den Bau qualitativ anspruchsvoller Schiffe, wie Passagierfähren, Kreuzfahrtschiffen und sehr schnellen Containerschiffen auf dem Schiffbaumarkt behaupten. Ein wesentliches Merkmal dieser Schiffe ist die Realisierung eines niedrigen Schwingungs- und Geräuschniveaus bei hohen Geschwindigkeiten. Dies kann nur durch eine deutliche Verringerung der am

Propeller auftretenden Kavitationserscheinungen erfolgen, was aber häufig wegen der dadurch oftmals instabil werdenden Kavitationserscheinungen zu einer Erosionsgefährdung dieser Propeller führt.

Die Kavitationserscheinungen und damit die Erosionsgefahr wird entscheidend von der Struktur des Nachstromfeldes beeinflusst. Durch die Nutzung von Dummymodellen zur Simulation eines der Großausführung ähnlichen dreidimensionalen Nachstromes sowie der Gewährleistung hoher Anströmgeschwindigkeiten und Drehzahlen trotz der Einbauten im Kavitationstunnel soll die Prognose der Erosionsgefährdung von modernen Propellern sichergestellt werden.

9. Literaturverzeichnis

- /1/ J. W. RAYEIGH,
On the Pressure Developed in a Liquid During the Collapse of a Special Cavity,
Philosophical Magazine, London 6 (1917) 34, S. 94-98
- /2/ A. SHIMA, K. TAKAYAMA, Y. TOMITA,
Mechanism of Impact Pressure Generation from Spark - Generated Bubble Collapse
near a Wall,
AIAA Journal, Bd. 21, No. 1, Jan. 1983, S. 55-59
- /3/ H. KIMOTO,
An Experimental Evaluation of the Effects of a Water Micro-Jet and a Shock Wave by
Local Pressure Sensor,
ASME Int. Symp. on Cavitation Research Facilities and Techniques, FED-Vo. 57, 1987
- /4/ Report of Cavitation Committee, 17. ITTC, Göteborg 1984
- /5/ Report of Cavitation Committee, 18. ITTC, Kobe 1987
- /6/ Report of Cavitation Committee, 19. ITTC, Madrid 1990
- /7/ H. KATO, T. MAEDA, A. MAGINO,
Mechanism and Scaling of Cavitation Erosion, S. 452-469
- /8/ A. EMMERSON,
Cavitation Erosion, Model-Ship Comparison, Appendix II,
Cavitation Committee, 13 ITTC, 1972
- /9/ J. H. J. VAN DER MEULEN, Y. NAKASHIMA,
A Study of the Relationship between Type of Cavitation, Erosion and Luminescence,
2nd Conference on Cavitation, IME, Edingburg 1983
- /10/ E. P. GEORGIJEWSKAJA, M. A. MAWLJUDOW, M. MEHMEL,
Entwicklung einer Methode zur Vorhersage der Kavitationserosion an Schiffspropel-
lern, Schiffbauforschung 3, 1981
- /11/ T. T. Knapp, J. W. Daily, F. G. Hammit, Cavitation,
New York, Mc Graw-Hill Book Company, 1970
- /12/ E. P. GEORGIJEWSKAJA,
Kavitonnaja erozya grebnuych vintow i metody bor'by s nej,
Leningrad, Sudostroenie, 1978, S. 76