

Unkorrigierter Vorabdruck für den STG-Sprechttag "Propeller und Kavitation" in Hamburg am 28. Juni 1990. Nur als Diskussionsgrundlage zu verwenden. Auszugsweise Veröffentlichung nur nach Rücksprache mit der STG-Gesellschaft und frühestens nach Beendigung des Sprechtages gestattet.

Propelleruntersuchungen im Kavitationstunnel der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam

Dipl.-Ing. W. Selke, Dipl.-Ing. H.-J. Heinke
Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH

Propeller Testin in the Cavitation Tunnel of the Ship Model Basin Potsdam

Summary. The test facility cavitation tunnel of the Ship Model Basin Potsdam is briefly pointed out. Extensive tests have been carried out with propeller models of the ship SYDNEY EXPRESS. The influence of diameter, revolution, wake simulation and gas content of the water on cavitation behaviour, propeller induced pressure fluctuations and noises are explained.

1 Einleitung

Die SVA Potsdam hat 1971 den Kavitationstunnel, Typ K 15 A der Fa. K & R in Betrieb genommen. Er ist mit 2 Meßstrecken \varnothing 600 und \varnothing 850 ausgestattet. Die meßtechnische Grundausrüstung der Lieferfirma wurde durch Kauf und Eigenbau versuchstechnischer Ausrüstungen erweitert, so daß über die üblichen Propeller- und Kavitationsuntersuchungen hinaus folgende Versuche möglich sind:

- Messung der Flügelverstellmomente am Einzelflügel
- Messung der instationären Flügelbelastung
- Messung propellerinduzierter Druckschwankungen
- Messung der Strömungsgeschwindigkeiten mittels LDA
- Druckverteilungs- und Kraftmessungen an Düsen (mit und ohne Propeller), Rudern oder Profilen
- Untersuchungen zur Auslegung von Querstrahlruderpropellern
- Untersuchungen zur Auslegung von Z-Antriebspropellern.

Die Meßwertfassung erfolgt teils visuell/manuell, teils rechnergestützt; die Meßwertverarbeitung z. T. direkt an der Versuchsanlage auf einem BC, oder im Zen-

tralrechner K 1630. Die Versuchsergebnisse mit freien Propellern werden mittels Kanalkorrektur nach GLAUBERT auf unendlichen Wasserquerschnitt umgerechnet. Für Düsenpropellerversuche hat SCHROEDER /3/ ein Verfahren erarbeitet, das z. Z. auf Anwendbarkeit geprüft wird. Nachfolgend sollen einige ausgewählte Ergebnisse jüngerer Arbeiten vorgestellt werden.

2 Druckschwankungsmessungen mit den Modellen des SYDNEY-EXPRESS-Propellers

2.1 Vorbemerkungen

Die SVA Potsdam hat in Zusammenarbeit mit dem BSHC Varna die in der Literatur /1/, /2/ publizierten Untersuchungen am SYDNEY EXPRESS-Propeller nachvollzogen. Ziel war es, durch Variation der Parameter Propellerdurchmesser, Propellerdrehzahl, Gasgehalt und Nachstromfeldsimulation deren Einfluß auf die Kavitationserscheinungen und die Versuchsergebnisse zu ermitteln und Hinweise zu finden, welche Voraussetzungen notwendig sind, um den Großausführungswerten möglichst nahe zu kommen. Für die Versuche wurden zwei Modellpropeller in den Maßstäben $\lambda = 28$ ($D = 250$ mm) und $\lambda = 38$ ($D = 184,2$ mm) hergestellt.

2.2 Versuchsumfang

Die vereinbarten Untersuchungen fanden im Nachstromfeld statt, dessen axiale und tangentielle Geschwindigkeitsverteilung nach Modellmessungen des CTO Gdansk bis zu einem Radienverhältnis $r/R = 1,0$ vorgegeben war. Eine Umrechnung auf die Großausführung wurde in der SVA Potsdam

Tabelle 1. Kavitationstunnel der SVA Potsdam Typ K 15 A (K & R, Hamburg)

Technische Daten Meßstr.-Querschnitte	Meßtechnische Grund- ausstattung	Spezielle meßtechnische Erweiterungen	Allgem. meßtechn. Erweiterungen
\square 600 $v_{\max} = 12 \text{ m/s}$ \square 850 Impellerantrieb 100 kW, 360 min^{-1} $D_I = 1078 \text{ mm}$ venturimetr. Geschwindigkeitsmessg. Hg-Manometer E 08 H ₂ O-Manometer E 14 elektr. Druckdiff.- dosen Vakuumpumpe $p_{\min} = -650 \text{ mmHg}^+$ Kompressor $p_{\max} = 900 \text{ mmHg}^+$	Dynamometer J 25 $T = 300 \text{ kp}$ $Q = 15 \text{ kpm}$ $n = 60 \text{ s}^{-1}$	Meßeinrichtung für Flü- gelverstellmomente und instation. Flügelkräfte Versuchseinrichtung für Querstrahlruder für \square 600 u. \square 850 u.	2D-LDA TE 2 (Vorwärtsstreu- verfahren Schallmeßplatz B & K (TOF 16 Hz ... 200 kHz)
	Dynamometer H 36 $T = 200 \text{ kp}$ $Q = 10 \text{ kpm}$ $n = 50 \text{ s}^{-1}$ Wellenneig. $+15^\circ \dots$ -10°	3-K-Waage H 36-IV objektbezogene Wellen- böcke	Druckschwankungs- meßplatz (Tran- sientenspeicher 4K-simult.) Rechnergestützte Meßwertfassung (8 bit Verarbei- tungsbreite)
	6-K-Waage R 37 $X = Y_1 = Y_2 = 50 \text{ kp}$ $Z_1 = Z_2 = Z_3 = 80 \text{ kp}$	Meßeinrichtg. Druckver- teilung an Düsen oder Profilen (21 Bohrungen) Z-Antriebsattrappe	3-Loch-Kugel-Son- den Rechen $D = 450 \text{ mm}$ (9 Sonden)
	Nachstromkassette Prandtl-Sonde (0 ... 300 mm ver- stellbar) Prandtl-Rohr-Rechen $D = 552 \text{ mm}$ $D = 782 \text{ mm}$ (14 Sonden)	IMTC-Standardkavitator Kavitator für Erosions- untersuchungen	5-Loch-Schräg- rohr-Sonde $r = 60 \dots 160 \text{ mm}$ verstellbar

nicht vorgenommen. In der Meßstrecke \square 600 wurde das axiale Nachstromfeld für beide Propellerdurchmesser mittels Sieben simuliert. Den Schiffsboden ersetzte eine 5 mm dicke Messingplatte, in die 4 Drucksensoren (QDE 2) eingeschraubt wurden. Die Höhenverstellbarkeit der Platte gewährleistete eine maßstabgetreue Anpassung des Propellerfreischlages. In der Meßstrecke \square 850 wurde das räumliche Nachstromfeld mittels eines Dummymodells ($\lambda = 38$) aus glasfaserverstärktem Polyesterharz simuliert. Die Modelllänge wurde so bestimmt, daß sich zur Großausführung eine maßstabgerechte Grenzschichtdicke ergab. Bedingt durch die geometrischen Abmessungen der Meßstrecke und des Dynamometers H 36 für den Propellerantrieb konnte die Heckform nur bis zum K-Spt. 2 maßstabgetreu verwirklicht werden. Ab dort mußte die Schiffsbreite gestaucht werden. Trotz dieser Maßnahme ergab sich ein Versperrungsfaktor für den Meßstreckenquerschnitt von 26 %, lag also über diesbezüglichen Empfehlungen (15 %). Um die vorgegebene Geschwindigkeitsverteilung zu realisieren, mußten am Dummymodell zusätzlich Siebe angebracht werden. Für die Druckschwankungsmessungen wurden

4 Drucksensoren an den in Tab. 2 dargelegten Positionen (identisch mit der Großausführung) angeordnet. Tab. 3 gibt einen Überblick über die untersuchten Fahrtzustände. Die Versuchsparameter und der Versuchsumfang sind Tab. 4 zu entnehmen. Der Gasgehalt wurde mit einem Sauerstoffmeßgerät gemessen und das Sättigungsverhältnis als Wert für den Gesamtgasgehalt angenommen.

Tabelle 2. Anordnung der Drucksensoren

Maßstelle	SYDNEY EXPRESS		
	X	Y	Z
P 1	1150	1255	5880
P 3	0	815	5600
P 4	0	-815	5600
P 6	-525	-1255	(5600)

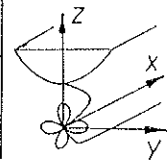


Tabelle 3. Fahrtzustände SYDNEY EXPRESS

Fahrtregime	13	14	15	16
V_S /kn/	18,6	19,5	21,3	22,3
N_S /min ⁻¹ /	89,5	93,2	100,6	105,1
P_D /MW/	10,4	12,2	15,7	17,1
T_A /m/	9,73	9,73	9,73	9,73
T_F /m/	9,63	9,63	9,63	9,63
J /-/	0,685	0,690	0,698	0,700
$G_{m0,8R}$ /-/	0,255	0,235	0,202	0,185
K_T	0,184	0,181	0,173	0,173

Tabelle 4. Versuchsparameter

Nachstromfeld	Prop. Ø mm	relativ. Gasgeh.	Prop.-Drehz.	Fahrtregime	
Ø 600 Sieb 2	184,2 P1231	0,42	20, 22	16	
			25, 30		
			25		15
Ø 600 Sieb	250 P0271	0,40	15, 18	16	
			22, 25		
			22		15
Ø 850 DM02/13	184,2 P1231	0,22	20...30	16	
			25		15, 14
			25		13
			20...30		o.Kav.
			25		$K_T = .173$
			25		$K_T = .173$
	184,2 P0271A P1231	0,35... 0,40	21...30	16	
			25		15, 14
			18...30		13
	184,2	ca. 0,70	22, 25	16	
			30		14, 13
			25		o.Kav.
184,2 P1231	0,54	25	15, 14		
		25		13	
		25		$K_T = .173$	

2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Unter dem Gesichtspunkt, die HSVA-Messungen bzgl. der Kavitationsbeobachtungen und der Druckschwankungsbeiwerte an der Großausführung /1/ als Gütekriterium zu betrachten, läßt sich folgendes zusammenfassend sagen:

Propellerdurchmesser

Der Propellerdurchmesser wirkte sich prinzipiell nur auf die Nachstromsimulation aus, da die festen Vorgabewerte, wie Siebabstand zur Propellerebene und Stevenrohrdurchmesser für den kleinen Propellerdurchmesser recht ungünstig waren. Eine befriedigende Übereinstimmung der Nachstromverteilung wurde hier praktisch nur auf den äußeren Radien erreicht. Ein Propellerdurchmesser von etwa 240 ... 250 mm wird daher für Untersuchungen im siebsimulierten Nachstrom für notwendig erachtet.

Propellerdrehzahl

Die aus den Druckschwankungsamplituden berechneten dimensionslosen Druckschwankungsbeiwerte zeigten sowohl im siebsimulierten Nachstrom als auch am Dummymodell drehzahlabhängige Beiwerte, jedoch beim Vergleich beider Messungen untereinander keine einheitliche Tendenz. Die Abweichungen werden daher nicht auf einen echten Drehzahl- (Reynoldszahl-)Einfluß, sondern auf Resonanzschwingungen an der Druckaufnehmerplatte bzw. dem Dummymodell (ca. 4 mm Wandstärke) zurückgeführt. Sie führen zu dem Schluß, daß eine ausreichende Steifigkeit der die Drucksensoren aufnehmenden Konstruktion eine entscheidende Voraussetzung für qualitativ hochwertige Messungen bildet.

Gasgehalt

Der Gasgehalt erwies sich als ein entscheidender Einflußfaktor. Geringer Gasgehalt ergab auch eine geringere Kavitationsausdehnung und vermutlich auch eine geringere Schichtdicke (Abb. 1). In den Druckschwankungsbeiwerten führte daher ein höherer Gasgehalt auch zu höheren Druckschwankungsbeiwerten. Abb. 2 ist zu entnehmen, daß ein echter Qualitätssprung bei der Erhöhung von $\alpha/\alpha_s = 0,22$ auf $0,35 \dots 0,40$ auftrat, eine weitere Gasgehaltserhöhung über $\alpha/\alpha_s = 0,50$ hinaus dagegen schon wieder gewisse Abschwächungen brachte.

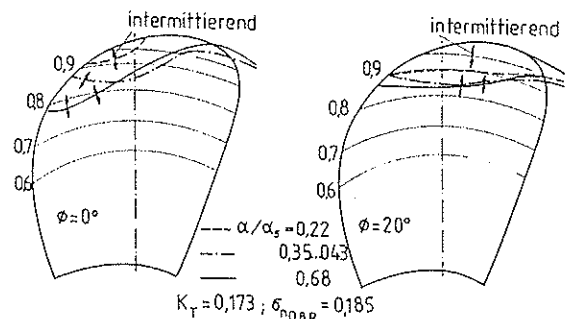


Abb. 1. Kavitationserscheinungen in Abhängigkeit vom relativen Gasgehalt α/α_s

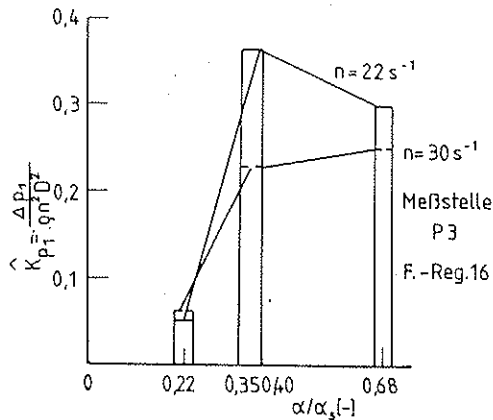


Abb. 2. Einfluß des relativen Gasgehaltes auf die Druckschwankungsbeiwerte

Für die Versuchsdurchführung im Kavitationstunnel bedeutet das, daß prinzipiell keine speziellen Be- oder Entgasungsmaßnahmen notwendig sind, da normalerweise der Gasgehalt etwa bei $\alpha/\alpha_s = 0,40 \dots 0,45$ liegt. Weitere gezielte Untersuchungen an anderen Objekten sollen diese Beobachtungen untermauern.

Nachstromfeld

Die Messungen haben gezeigt, daß in einem axial durch ein Sieb simulierten Nachstrom die Druckschwankungsbeiwerte etwa nur 50 % ... 65 % der Größe der Großausführung erreichen. Ergebnisse des BSHC Varna, das diesbezüglich weiterreichende Untersuchungen führte, u. a. das von der HSVA aufgemessene und auch das auf die Großausführung umgerechnete Nachstromfeld simulierte, bestätigen diese Aussage. Erst die durch ein Dummymodell, bzw. ein Schiffsmodell allgemein, realisierte räumliche Propelleranströmung liefert Druckschwankungsamplituden, die denen der Großausführung nahekommen. Ursache ist offensichtlich die mit der räumlichen Anströmung verknüpfte Kavitationsausbildung am Propeller. Sie ist hinter dem Dummymodell flächenmäßig größer, damit vermutlich auch dicker, was besonders auf die abwärtsschlagende Seite des Propellers zutrifft (Abb. 3).

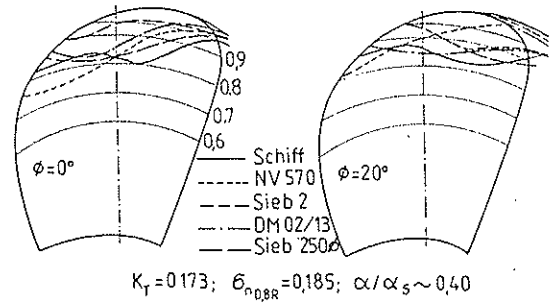


Abb. 3. Einfluß der Nachstromsimulation auf die Kavitationserscheinungen

Kavitationserscheinungen

Die Ergebnisse sind prinzipiell in den Darlegungen zum Einfluß von Gasgehalt und Nachstromfeldsimulation enthalten. Sie zeigen, daß die Kavitationsausdehnung im Modellversuch bei siebsimuliertem Nachstrom kleiner ist als am Schiff. Diese Beobachtungen decken sich mit Ergebnissen der HSVA an Propellern mit Normalskew /4/. Nach SVA-Erfahrungen sind die Komponenten hoher Gasgehalt und räumliche Nachstromsimulation für die Ausbildung schiffsgetreuer Nachstromerscheinungen dominierend.

Die Experimente wurden durch theoretische Berechnungen der Druckschwankungsbeiwerte nach NV 570 W (Det Norske Veritas), das auch die Kavitationsausdehnung berechnet, HOLDEN /5/ und HOTAJA /6/ (das von der SVA modifizierte Holden-Verfahren) ergänzt. Die Resultate sind in Abb. 3 und Abb. 4 mit eingetragen worden.

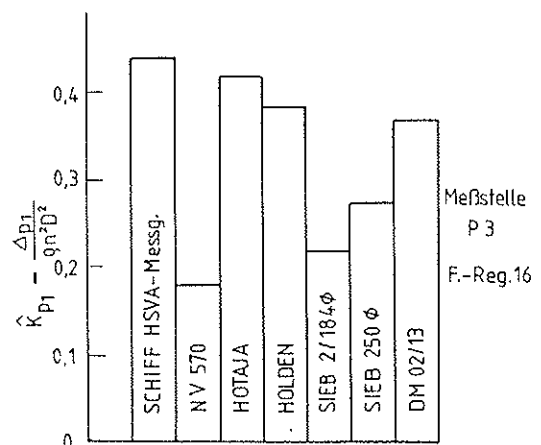


Abb. 4. Druckschwankungsbeiwerte nach Modellversuchen und Berechnungen

2.4 Nachbetrachtungen

Die Ursachen propellererregter Druckschwankungen sind in den instationären Kavitationserscheinungen zu suchen. Die Vielfalt der an der Erregung beteiligten Komponenten wie Amplituden und Phasenlagen einschließlich der Kavitationseinflüsse unterstreicht die Kompliziertheit der Vorgänge. Die Vorstellung, daß Kavitation immer dann einsetzt, wenn der Dampfdruck am Propeller erreicht wird, kann sicher künftig nicht als alleiniges Kriterium aufrechterhalten werden, da in der realen Flüssigkeit die Zerreißfestigkeit des Wassers maßgebend für den Kavitationseinsatz ist, die wiederum durch die im Wasser vorhandenen Keime bestimmt wird.

3 Schallpegelmessungen an Modellen des SYDNEY-EXPRESS-Propellers

3.1 Vorbemerkungen

Ebenfalls in Zusammenarbeit mit dem BSIC Varna wurden die durch die ITTC initiierten Schallpegelmessungen in homogener Anströmung /2/, /9/ nachvollzogen. Variiert wurden die Parameter Propellerdurchmesser, Propellerdrehzahl und Gasgehalt, um deren Einfluß auf die Versuchsergebnisse zu ermitteln.

In Anlehnung an die ITTC-Empfehlungen wurde als Basis für die Auswertung der Messungen zunächst eine Übertragungsfunktion Kavitationstunnel - Freifeldbedingungen bestimmt.

3.2 Versuchsumfang

Der Versuchsumfang entsprach dem Programm der ITTC /9/ für die homogene Anströmung (Tab. 5) und wurde durch die SVA durch Versuche mit dem 184,2 mm-Propeller im Dummymodell-Nachstrom erweitert, wobei Meßhydrofone im Dummy und im Wasserkasten 1 an der Scheibe der Meßstrecke angebracht wurden. Für die jeweilige Versuchsanordnung wurde die Übertragungsfunktion ermittelt und der Versuchsauswertung zugrunde gelegt.

Bei der Versuchsdurchführung wurde nach der Messung der für den Versuchsfall zu realisierenden Parameter für die gleichen

Randbedingungen, jedoch ohne Propeller, der Pegel der leeren Anlage aufgemessen und bei der Auswertung als Störpegel in Abzug gebracht.

Die Meßergebnisse wurden normiert auf 1 μ Pa Bezugsdruck, 1 Hz Bandbreite, 1 m Abstand des Hydrofons vom "Sender" und Freifeldbedingungen. Sie sind damit vergleichbar und stehen für weitere Berechnungen z. B. Übertragung auf die Großausführung, zur Verfügung.

Tabelle 5. Versuchsparameter Schallpegelmessungen

Fortschrittsgrad J /-/	0,6; 0,7; 0,9
Kavitationszahl σ_n /-/	0,185; 0,193; 0,202; 0,211
Propellerdrehzahl n /U/s/	25; 30 für \varnothing 250 mm 30; 35 für \varnothing 184 mm

3.3 Ergebnisse

Kalibrierung

Die Anwendung der Kalibrierfunktionen auf Messungen in beiden Meßstrecken mit dem SYDNEY-EXPRESS-Propeller ergab die prinzipielle Richtigkeit der Anwendbarkeit der Kalibrierfunktionen für die Messungen (Abb. 5).

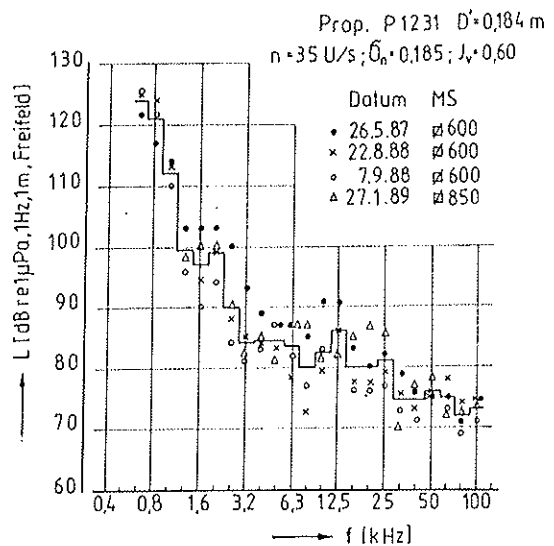


Abb. 5. Schalldruckpegel SYDNEY-EXPRESS-Modellpropeller

Propellerdurchmesser

Ein größerer Propellerdurchmesser führte bei gleicher Drehzahl zu einer Schall-druckpegelerhöhung im gesamten Frequenz-band. Die durchschnittliche Erhöhung kann durch die Formel

$$\Delta L(D) = 20 \log (D_1/D_2)^Z \text{ mit } Z = 3$$

angenähert bestimmt werden.

Propellerdrehzahl

Die Erhöhung der Propellerdrehzahl führte zu einer Erhöhung der Schalldruckpegel im gesamten Frequenzband (Abb. 6). Die durchschnittliche Erhöhung kann durch die Formel

$$\Delta L(n) = 20 \log (n_1/n_2)^Z \text{ mit } Z = 3$$

näherungsweise berechnet werden.

Kavitationsart

Die untersuchten Parameter des Propellers erzeugten am Propeller die Kavitationsarten Spitzenwirbel-, Saugseiten- und Druckseitenkavitation. Aus Abb. 6 ist er-sichtlich, daß Druckseitenkavitation die höchsten Schalldruckpegel ergab.

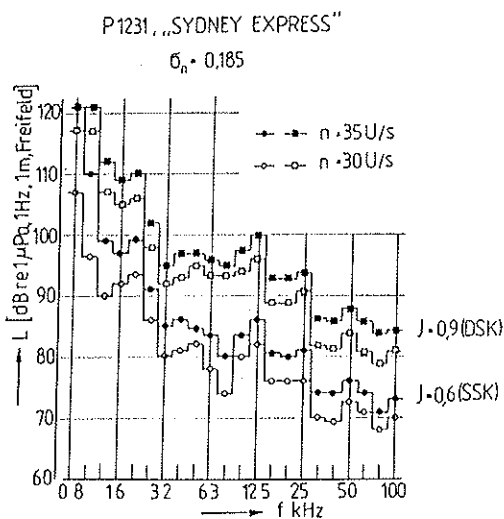


Abb. 6. Einfluß von Propellerdrehzahl und Kavitationsart auf die Schalldruckpegel des SYDNEY-EXPRESS-Modellpropellers

Gasgehalt

Der Gasgehalt des Tunnelwassers erwies sich als eine entscheidene Einflußgröße. Er beeinflusst die Kavitationsausbildung und das Kollapsverhalten der Kavitationsblasen /10/. Der Vergleich von Schallpe-gelspektren gemessen mit einem Hydrofon im Wasserkasten an der Scheibe der Meß-streckenwand zeigt, daß insbesondere im höherfrequenten Bereich geringere Schall-druckpegel bei einem hohen Gasgehalt er-mittelt werden (Abb. 7). Die Wahl des Gasgehaltes des Wassers für Schallpegel-messungen im Kavitationstunnel muß einen Kompromiß zwischen dem notwendigen Gas-gehalt des Wassers und der Beeinflussung der Schallabstrahlung und -übertragung im höherfrequenten Bereich darstellen. In der SVA werden Schallpegelmessungen bei einem Gasgehalt von $\alpha/\alpha_s = 0,3$ ange-strebt.

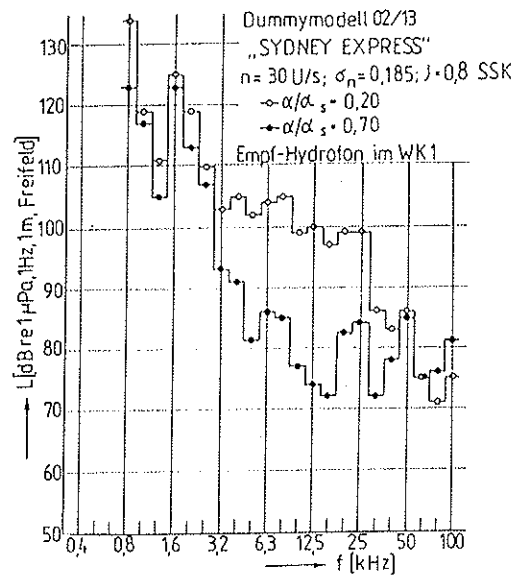


Abb. 7. Einfluß des relativen Gasgehaltes auf die Schalldruckpegel des SYDNEY-EXPRESS-Modellpropellers

Nachstromfeld

Die Untersuchung des Propellers im räum-lichen Nachstromfeld führte durch die Vergrößerung der Kavitationsausdehnung am Propellerflügel und das mit dem Durchgang

der Propellerflügel durch das Nachstromfeld bedingte Pulsieren der Kavitation zu einer Erhöhung der Schalldruckpegel im gesamten Frequenzband (Abb. 8).

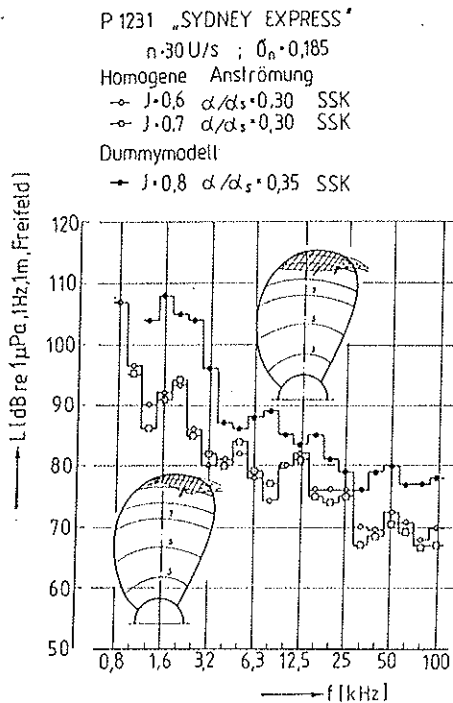


Abb. 8. Einfluß des Nachstromfeldes auf die Schalldruckpegel des SYDNEY-EXPRESS-Modellpropellers

Unter dem Aspekt einer Prognose der abgestrahlten Geräusche eines Propellers am Schiff auf der Basis von Modellversuchen scheint es also notwendig, möglichst naturgetreue Bedingungen für die Versuchsdurchführung zu schaffen. Es ergeben sich gleiche Schlußfolgerungen wie für die

Durchführung von Druckschwankungsmessungen. Die Anordnung eines Hydrofons unmittelbar am Dummymodell hat sich bewährt. Der Einfluß des Gasgehalts des Wassers (Absorption) und der Meßstreckenwände (Reflexionen) können dadurch vermindert werden.

Schrifttum

- 1 Keller, A P; Weitendorf, W A:
Determination of the free Aircontent and Velocity in Front of the SYDNEY-EXPRESS-Propeller in Connection with Pressure Fluctuation Measurements. 12. Symp. Naval Hydrodynamics, Nat. Acad. of Science, Washington 1978
- 2 Report of the Cavitation Committee 17. ITTC 1984; S. 248-254
- 3 Schroeder, G:
Ein Verfahren zur Korrektur eines Wandeinflusses auf Düsenpropellerversuche. SVA-BNR 1820, Potsdam 1990
- 4 Friesch, J; Weitendorf, E A:
Kavitationsbeobachtungen und Druckschwankungsmessungen bei Modellversuchen und in der Großausführung - Versuch einer Korrelation. 82. HV der STG, Hamburg 1987
- 5 Holden, K O u. a.
Early Design-Stage Approach to Reducing Hull Surface Forces Due to Propeller Cavitation. SNAME Trans. Vol. 88 (1980)
- 6 Schmidt, D:
Verfahren zur überschlägigen Berechnung der Druckschwankungen und der Vertikalkraftschwankungen - HOTAJA. SVA-BNR 1796, Potsdam 1989
- 7 Report of the Cavitation Committee 18. ITTC 1987; S. 209-210
- 8 Chang-Sup Lee:
Comparative Studies on propellerinduced Pressure Fluctuations. Korea-Institut of Machinery and Metal-Report PTL 10-87
- 9 Report of the Cavitation Committee 16. ITTC 1981; S. 447-452
- 10 Lovik, A; Vassenden, J:
Measurements of Noise from Cavitating Propellers. Specialist Meeting on Acoustic Cavitation, Dorset, Dec. 1977