

Propellererregte Druckschwankungen an Frachtschiffen mit großen langsamlaufenden Propellern

Mitteilung aus dem Direktorat für Forschung und Erzeugnisentwicklung des VEB Kombinat Schiffbau

Dipl.-Ing. Dietrich Schmitt

1. Einleitung

In einer komplexen Arbeit, an der die RGW-Länder UdSSR, VRB, SRR und DDR beteiligt waren, wurde der Einsatz großer langsamlaufender Propeller für Fracht- und Fischereischiffe unter Beachtung verschiedenster hydrodynamischer Aspekte untersucht.

Wie bei vielen ähnlichen Untersuchungen wurde auch hier nachgewiesen, daß durch den Einsatz großer Propeller erhebliche Treibstoffeinsparungen erzielt werden können, wobei die Einsparungen belastungsabhängig sind [1].

Neben diesen positiven Effekten treten jedoch auch einige negative Erscheinungen auf.

An erster Stelle sind neben den größeren instationären Propellerkräften und -momenten die größeren propellererregten Druckschwankungen an der Außenhaut zu nennen. Im Rahmen der wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit wurden drei Objekte untersucht:

Tanker mit 6 Varianten,
Multiflexschiff mit 2 Varianten,
Fischereischiff mit 3 Varianten.

Da das Fischereischiff eine Propellerdüse besitzt, sind propellererregte Druckschwankungen von untergeordneter Bedeutung. Dieses Objekt wird daher hier nicht behandelt. Bei dem Einsatz von Propellern mit größerem Durchmesser müssen kleinere Propellerfreischläge in Kauf genommen werden. Infolgedessen sind größere propellererregte Druckschwankungen zu erwarten. Andererseits sind die großen Propeller niedriger belastet und drehen langsamer, so daß die Kavitationsneigung kleiner wird und möglicherweise die Kavitationserregten Druckschwankungen nicht in dem Maße wie bei gewöhnlichen Propellern wirksam werden.

Schiffe mit großen Propellern besitzen oft eine Schürze, die den Propeller nach oben hin tunnelförmig umschließt. Sie sollen das Austreten des Propellers im Seegang und

Tabell 1. Schiffs- und Propellerdaten

Variante	Tanker						Multiflex	
	I	II	III	IV	V	VI	I	II
L_{WL} [m]	235						126	
∇ [m ³]	74492						17200	
C_B	.82						.74	
P_D [kW]	12250						4200	
D_p [m]	8,9		8,2		7,4	6,5	6,1	4,7
A_E / A_0	0,43		0,49		0,58	0,713	0,418	0,58
P/D	.81		.79		.78	.658	1,078	.73
$\Delta R_z / D$ [%]	10	2,7	10	2,7	14,5	23,5	2,7	41
V_s [kn]	15,9 / 17,5		16,1 / 18,0		15,9 / 17,7	15,5 / 17,1	15,0 / 16,9	14,9 / 16,8
n [U/min]	64		74		88	103	77/76	127
Tauchtiefe Propellerwelle [m]	7,83 / 4,60		8,29 / 5,06				6,10 / 2,85	6,57 / 3,32
$C_T \frac{T_p}{\rho/2 v_a^2 \pi \frac{D^2}{4}}$	1,88 / 1,67		2,22 / 2,11		3,29 / 3,36	6,66 / 6,66	.91 / .74	1,47 / 1,35
η_0	.575 / .59		.55 / .56		.50 / .49	.41 / .38	.674 / .700	.613 / .624

Erklärung:



bei Ballastfahrt und das Luftansaugen verhindern. Bei diesen Schiffen wird daher die Druckverteilung über die Außenhaut in der Umgebung des Propellers anders sein als bei konventionellen Hinterschiffsformen. Durch Integration der Drücke über die Schiffsoberfläche werden die Schwankungen der Oberflächenkräfte berechnet und gegenübergestellt.

Im wesentlichen basieren die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse auf Berechnungen. Das Berechnungsverfahren ist jedoch für die Anwendung auf Schiffe mit großen Propellern und kleinen Freischlägen noch ungenügend überprüft und birgt daher gewisse Unsicherheiten.

Durch Modellversuche mit einigen Objekten sollten die Berechnungsergebnisse untermauert werden. In der Schlepprinne der SVA wurden Modellversuche mit nicht-kavitierenden Propellern untersucht. In der Versuchsanstalt RHSL-ICEPRONAV GALATJI (SRR) wurden von den gleichen Objekten Dummymodelle im Kavitations-tank untersucht [2], [3]. Auch diese Ergebnisse werden zur Beurteilung der Berechnungsergebnisse hier noch einmal herangezogen.

2. Untersuchungsobjekte

Es wurde eine Tankerfamilie, bestehend aus sechs Varianten, und eine Multiflexfamilie mit zwei Varianten untersucht. Die wichtigsten Daten der Schiffe und der zugehörigen Propeller sind in Tabelle I aufgeführt.

Die Varianten I und II der Tankerfamilie besitzen einen Propeller mit dem Durchmesser $D_p = 8,9$ m und einen Schraubenbrunnen mit einer Schürze oberhalb des Propellers. Sie unterscheiden sich durch den vertikalen Freischlag des Propellers. Damit der Propeller nicht unter dem Schiffsboden hinausschlägt, mußte bei diesen Varianten die Propellerwelle höher als bei den anderen Varianten mit kleinerem Propellerdurchmesser angeordnet werden.

Die Varianten III und IV besitzen den Propellerdurchmesser $D_p = 8,2$ m. Auch diese Varianten besitzen eine Schürze, wobei sich wiederum der vertikale Freischlag unterscheidet. Die Varianten V und VI besitzen den gleichen konventionellen Schiffskörper ohne Schürze. Sie unterscheiden sich nur durch den Propellerdurchmesser (Var. V: $D_p = 7,4$ m; Var. VI: $D_p = 6,5$ m).

Die Bilder 1 und 2 zeigen die Spantenrisse und Seitenansichten der Hinterschiffe der Tankerfamilie, die Vorschiffe sind identisch.

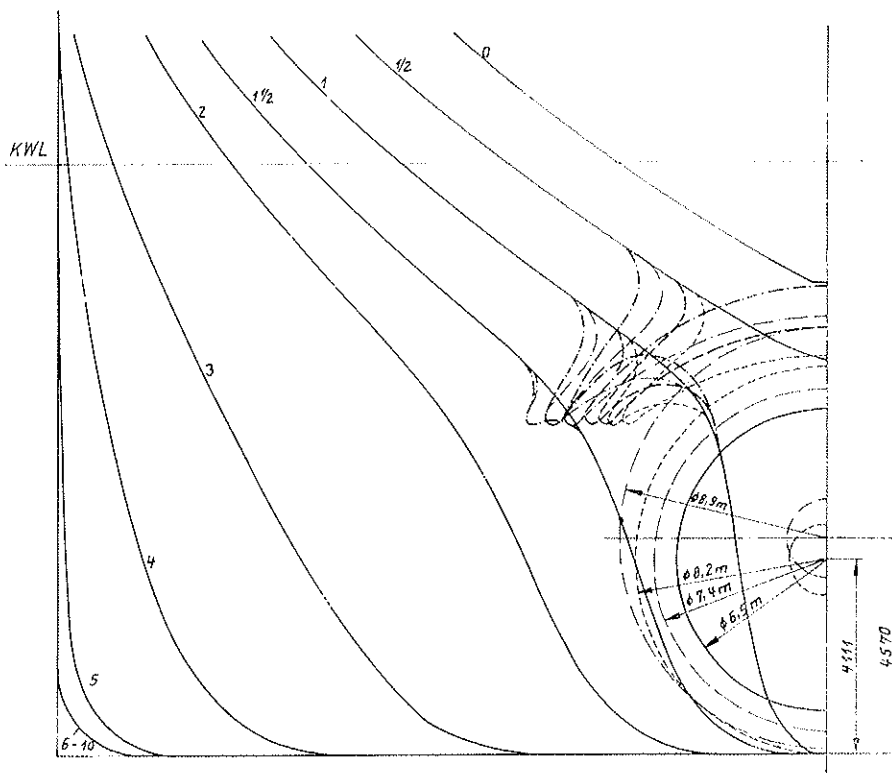
Die Variante I des Multiflexschiffes besitzt einen Propeller mit $D_p = 6,1$ m und eine Schürze. Die Variante II weist eine konventionelle Schiffsform ohne Schürze auf. Der Propellerdurchmesser beträgt $D_p = 4,7$ m. Auch beim Multiflexschiff mußte bei der Variante I die Propellerwelle nach oben verschoben werden. Auf den Bildern 3 und 4 sind die Spantenrisse und Seitenansichten der Multiflexschiffe dargestellt.

3. Berechnungen

3.1. Propellerkavitation

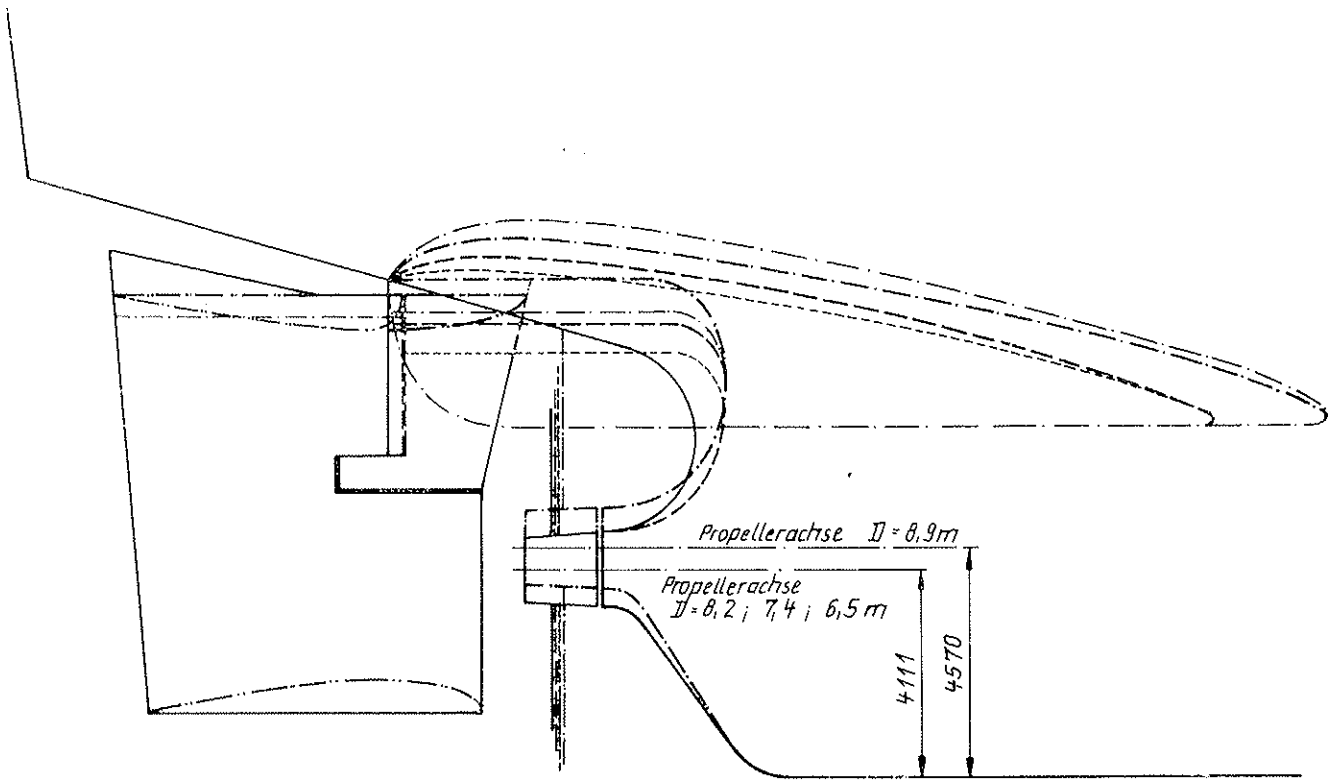
Die Propellerkavitation, die Druckschwankungen und die aus den Druckschwankungen resultierenden Oberflächenkräfte wurden mit dem von Det norske Veritas entwickelten Programm NV 570 W für den voll beladenen und den unbeladenen Zustand berechnet. Die Ausgangsdaten für die Berechnungen (Geschwindigkeit, Drehzahl, Tauchtiefe der Propellerwelle) sind in Tabelle I aufgeführt. Natürlich wurden für die Berechnungen der unterschiedlichen Behandlungsfälle auch die jeweiligen Nachstromverteilungen verwendet, die sich z. T. erheblich unterscheiden. Die Nachstromverteilungen wurden im Krylov-Institut aufgemessen [4].

Für die Kavitationsentwicklung am Propellerflügel ist die Nachstromverteilung im Bereich der Flügelspitze maß-



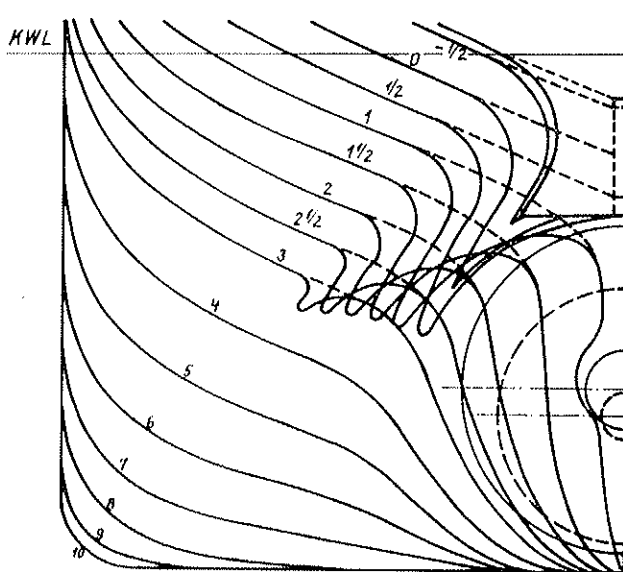
Variante	D_p [m]	$\Delta R_x / D$
I	8,9	0,100
II	"	0,027
III	8,2	0,100
IV	"	0,027
V	7,4	0,145
VI	6,5	0,235

Bild 1. Tanker; Hinterschiffsspanten



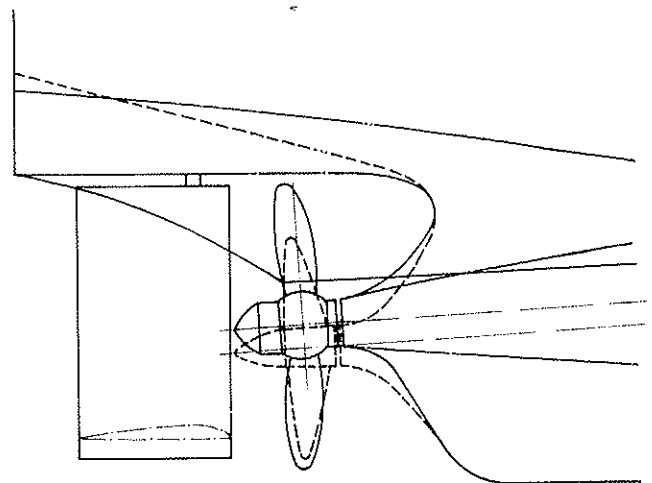
Variante	D_p [m]	$\Delta R_z / D$
I	8,9	0,100
II	"	0,027
III	8,2	0,100
IV	"	0,027
V	7,4	0,145
VI	6,5	0,235

Bild 2. Tanker; Seitenansicht des Hinterschiffs



Variante	D_p [m]	$\Delta R_z / D$
I	6,1	0,027
II	4,7	0,410

Bild 3. Multiflexschiff; Hinterschiffsspanten



Variante	D_p [m]	$\Delta R_z / D$
I	6,1	0,027
II	4,7	0,410

Bild 4. Multiflexschiff; Seitenansicht des Hinterschiffs

Bild 5 bis 9. Verteilungen des axialen Nachstroms der Tanker im Bereich der Flügel-spitze

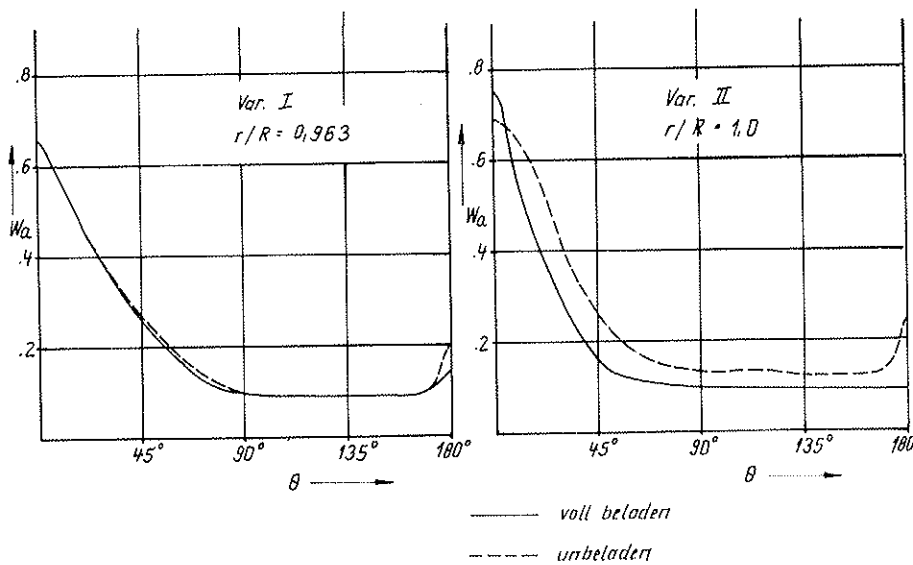
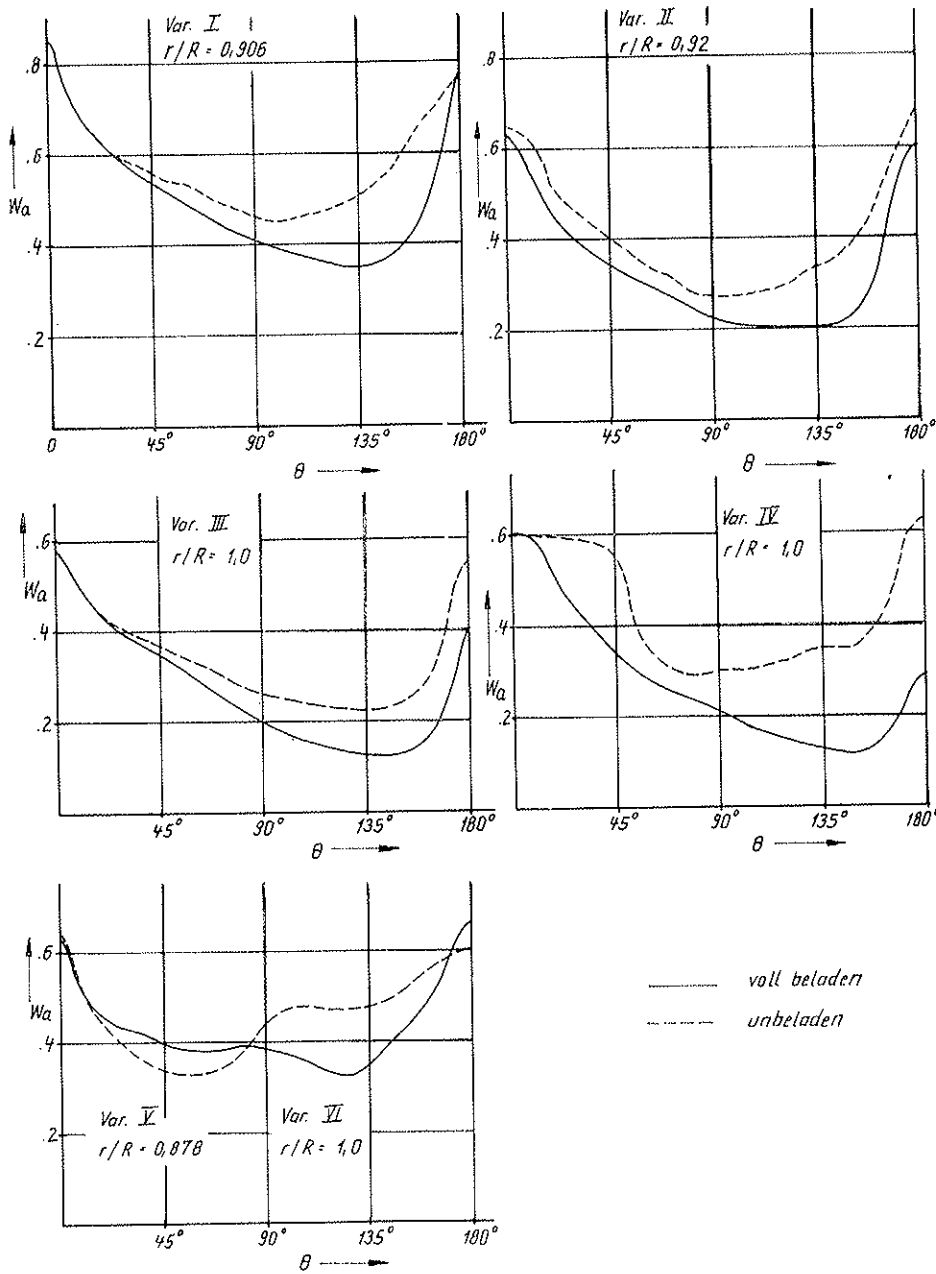


Bild 10 und 11. Verteilungen des axialen Nachstroms der Multitexschiffe im Bereich der Flügel-spitze

Bild 12 bis 17. Radiale Ausdehnung der Saugseiten-Schichtkavitation der Tanker-varianten

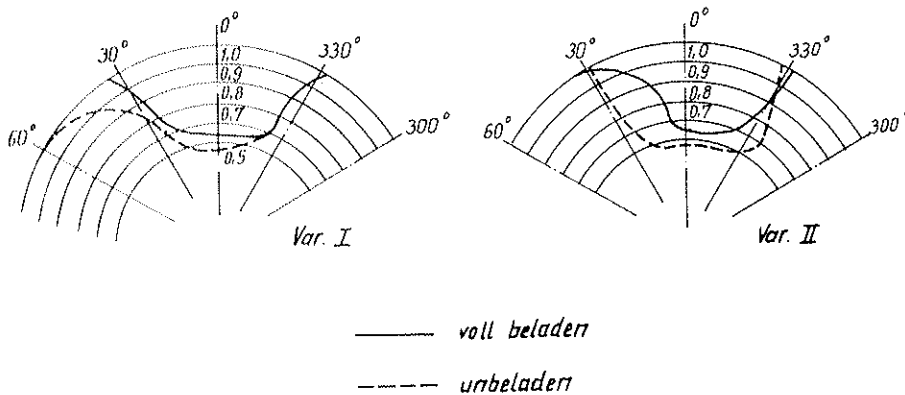
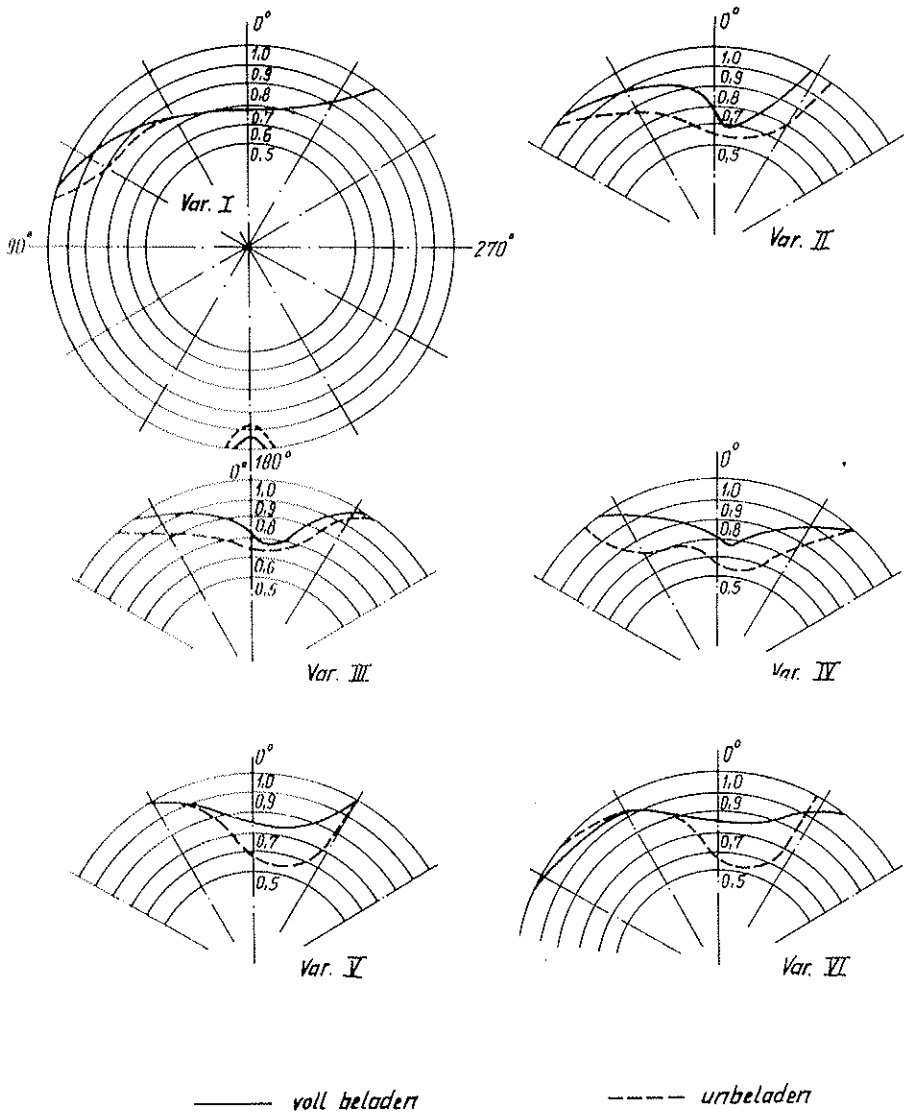


Bild 18 und 19. Radiale Ausdehnung der Saugseiten-Schichtkavitation der Multi-flex-schiffe

gehend. Die Bilder 5 bis 11 zeigen die Verteilungen des axialen Nachstroms auf einem Meßradius in der Nähe der Flügelspitze. Im allgemeinen nimmt die Ungleichförmigkeit des Nachstroms mit zunehmendem Abstand von der Propellerwelle zu. Das bedeutet, daß bei den Varianten mit größerem Propeller die Nachstromverteilungen im Flügelspitzenbereich ungleichförmiger sein müßten. Durch die Verwendung der Schürze tritt jedoch teilweise ein gewisser Glättungseffekt im Bereich der 12.00 Uhr-Position auf, so daß die Ungleichförmigkeit der Propellerzaströmung nur unwesentlich zunimmt.

Auf den Bildern 12 bis 19 ist die radiale Erstreckung der Schichtkavitation auf der Saugseite des Propellerflügels

in Abhängigkeit von der Flügelstellung dargestellt. Über den Ort der Kavitation bzw. die Erstreckung der Kavitation in Sehnenrichtung geben diese Bilder keine Auskunft. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten sind vornehmlich auf die Nachstromverteilungen zurückzuführen. Bestimmte Tendenzen über die Auswirkung der Propellervergrößerung auf den Winkelbereich, in dem Kavitation auftritt, sind nicht zu erkennen.

Die Bilder 20 bis 26 zeigen die Kavitationssschichtdicken an der Flügelspitze in Abhängigkeit von der Flügelstellung. Aus diesen Bildern ist die Kavitationsintensität und die Pulsation der Kavitation, die besondere Bedeutung für die Erregung von Druckschwankungen (insbesondere der

Bild 20 bis 21. Kavitationsschichtdicken an der Flügelspitze der Tankvarianten

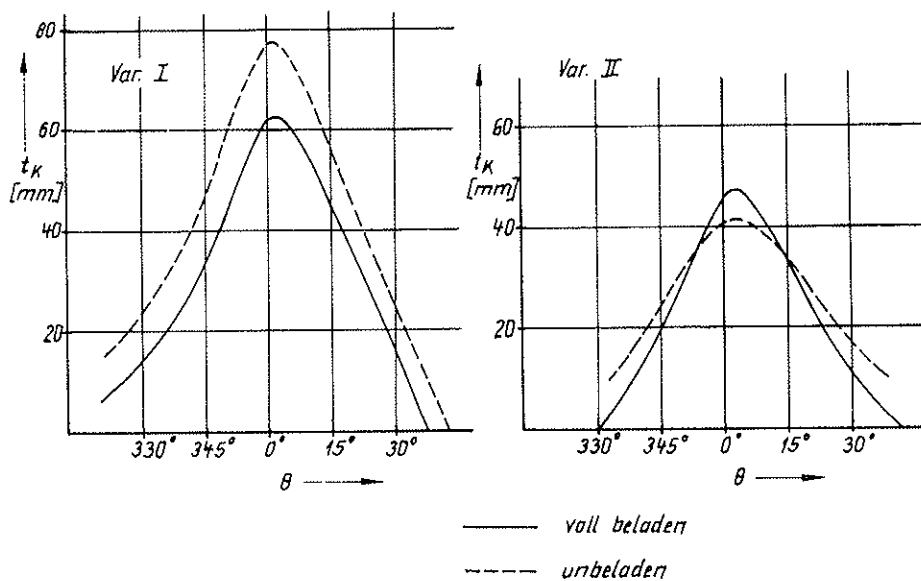
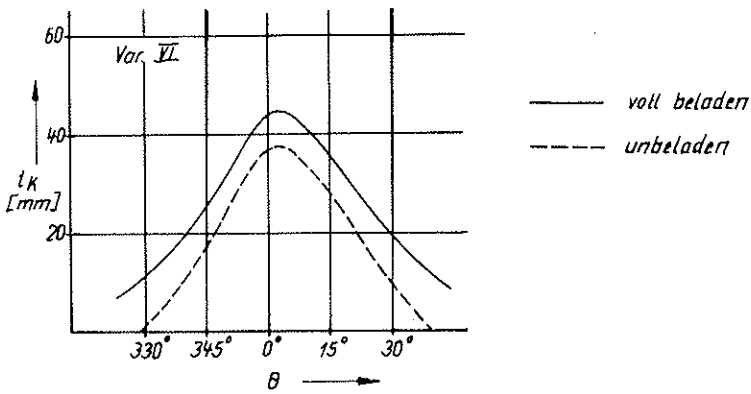
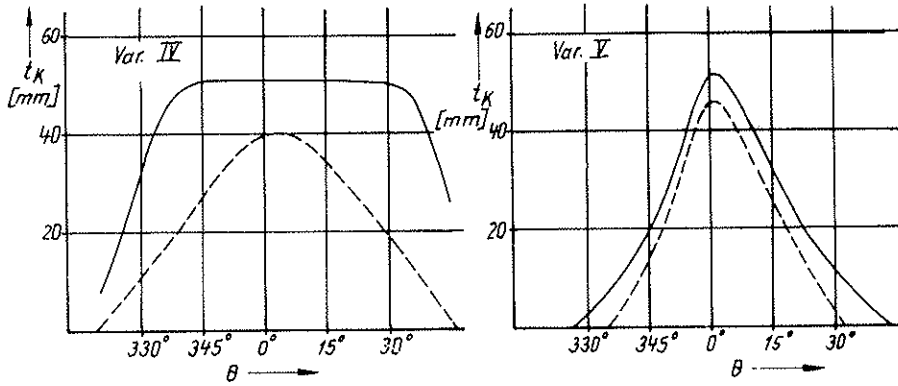
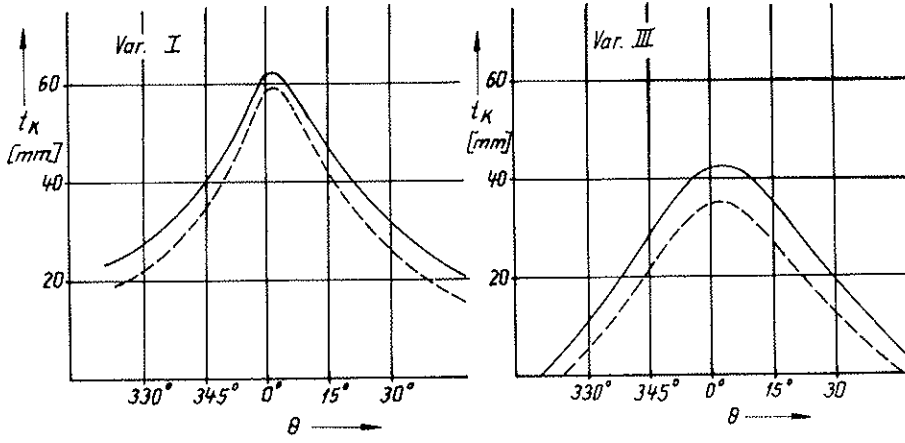


Bild 25 und 26. Kavitationsschichtdicken an der Flügelspitze der Multiflexschiffe

Tabelle 2. Umfangsgeschwindigkeiten und Kavitationszahlen der Propeller für den beladenen Zustand

	Tanker				Multiflexschiff	
D_p [m]	8,9	8,2	7,4	6,5	6,1	4,7
U [m/s]	29,8	31,8	34,1	35,1	24,6	31,3
σ_n	3,19	2,94	2,60	2,50	4,44	2,93

höheren Ordnungen der Druckschwankungen) besitzt, zu erkennen. Hier zeigt sich die Tendenz, daß mit zunehmendem Propellerdurchmesser die Kavitationsschichtdicken größer werden. Da der Winkelbereich, in dem die Kavitation auftritt, vom Durchmesser des Propellers unabhängig ist, wird auch die Pulsation mit wachsendem Durchmesser größer.

Mit zunehmendem Durchmesser nehmen die Drehzahlen stark ab, so daß die Umfangsgeschwindigkeiten kleiner und die Kavitationszahlen

$$\sigma_n = \frac{P_{\text{Dreh}} - P_D + H - 0,7 \cdot R}{\rho/2 \cdot n^2 \cdot D^2}$$

größer werden. In der Tabelle 2 sind die Umfangsgeschwindigkeiten und die Kavitationszahlen für den voll beladenen Zustand aufgeführt.

Die Propeller wurden für gleiche Kavitationssicherheit entworfen. Bei der Festlegung des Propellerflächenverhältnisses wird üblicherweise nur der mittlere Nachstrom bzw. die effektive Nachstromziffer berücksichtigt. Die Nachstromgleichförmigkeit wird vernachlässigt. Daher weisen die größeren Propeller die kleineren Flächenverhältnisse auf, vgl. Tabelle 1, und die positiven Auswirkungen der Verkleinerung der Propellerbelastung und der Reduzierung der Drehzahl auf die Kavitation kommen nicht zum Tragen. Im Gegenteil nehmen die Kavitations-schichtdicken mit größer werdendem Durchmesser zu, und es hat den Anschein, als sollte man bei der Festlegung des Flächenverhältnisses der Propeller mit vergrößertem Durchmesser die geringfügige Verschlechterung der Propellerzuströmung berücksichtigen. Da die Rechnungen jedoch für keine der Varianten Druckseitenkavitation oder Blasen kavitation auswies, scheint keine Gefährdung bezüglich einer Kavitationserosion vorzuliegen.

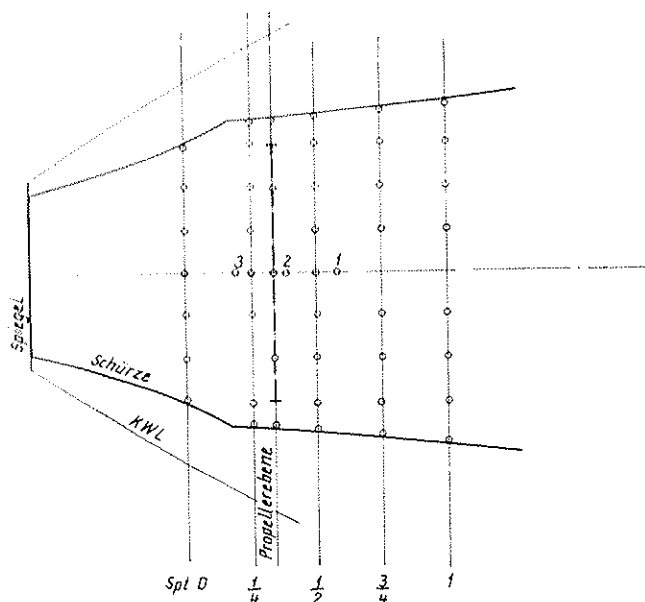


Bild 27. Verteilung der Punkte auf der Schiffsoberfläche für die Druckschwankungsberechnungen für das Multiflexschiff, Variante I

3.2. Propellererregte Druckschwankungen

Zur Berechnung der Druckschwankungen wurden die einzelnen Anteile

- aus der Verdrängungswirkung des Flügels
- aus der Zirkulation um den Flügel
- aus der Kavitation

getrennt berechnet und anschließend unter Beachtung ihrer jeweiligen Phasenlage addiert.

Um durch Integration der Drücke auch die Oberflächenkraftschwankungen zu berechnen, wurden die Drücke an ca. 50 Punkten der Schiffsoberfläche in der Umgebung des Propellers berechnet. Bild 27 vermittelt am Beispiel des Multiflexschiffes, Variante I eine Vorstellung von der Verteilung der Punkte. Sie sind auf den Spanten 0 — 0,25 — 0,5 — 0,75 — 1,0 und in der Propellerebene im Bereich der Schürze angeordnet. Die Punkte 1, 2, 3 kennzeichnen die Positionen, an denen die Druckmeßdosen im Experiment angeordnet waren.

In [5] sind die Druckschwankungsamplituden und Phasenwinkel der 1. und 2. Ordnung für alle Punkte aufgeführt. Direkt über dem Propeller wurden die größten Druckschwankungen berechnet. Auf den Bildern 28 bis 30 sind die Druckschwankungen der 1. Ordnung für diese Position dargestellt. Es werden sowohl die vom nicht-kavitierenden Propeller und die durch die Kavitation induzierten Druckschwankungsanteile einzeln als auch die hieraus resultierenden gesamten Druckschwankungen gezeigt.

Die Größenordnung der Druckschwankungen der 2. Ordnung ist aus der Tabelle 3 ersichtlich. Hier ist auch der Anteil der Druckschwankungen, der aus der Kavitation resultiert, in % der gesamten Druckschwankungen aufgeführt.

An der Tankerfamilie ist die Abhängigkeit des kavitationsinduzierten Anteils der Druckschwankungen vom Propellerdurchmesser gut abzulesen. Während bei dem kleinsten Propellerdurchmesser $D = 6,5$ m der kavitierende Druckschwankungsanteil ca. 50% für die 1. Ordnung und ca. 85% für die 2. Ordnung beträgt, beträgt der kavitierende Druckschwankungsanteil bei dem verhältnismäßig großen Propellerdurchmesser $D = 8,2$ m nur 20 bis 25% für die 1. Ordnung und 25 bis 35% für die 2. Ordnung. Diese Tendenz wird durch die Ergebnisse mit dem Multiflexschiff bestätigt.

Bei den Varianten I und II mit $D = 8,9$ m mußte die Propellerwelle angehoben werden. Dadurch verringerte sich einerseits die Tauchtiefe, was sich auf die Kavitationszahl auswirkt, und andererseits wird die Propellerzuströmung etwas ungleichförmiger. Insbesondere erhöht sich der Nachstromgradient im Bereich $\theta = 0^\circ \dots 30^\circ$. Obgleich die Verschlechterung der Zuströmung nicht auffällig ist, werden die aus der Kavitation resultierenden Anteile der Druckschwankungen bei den Varianten I und II wieder größer.

Im Vergleich zu anderen Untersuchungen (z. B. [6]), bei denen die durch die Kavitation induzierten Druckschwankungen ein Vielfaches der Druckschwankungen ohne Kavitation betragen, sind bei den vorliegenden Untersuchungen die kavitationsinduzierten Druckschwankungen verhältnismäßig klein. Die Vergrößerung des Propellerdurchmessers und die damit verbundene Redu-

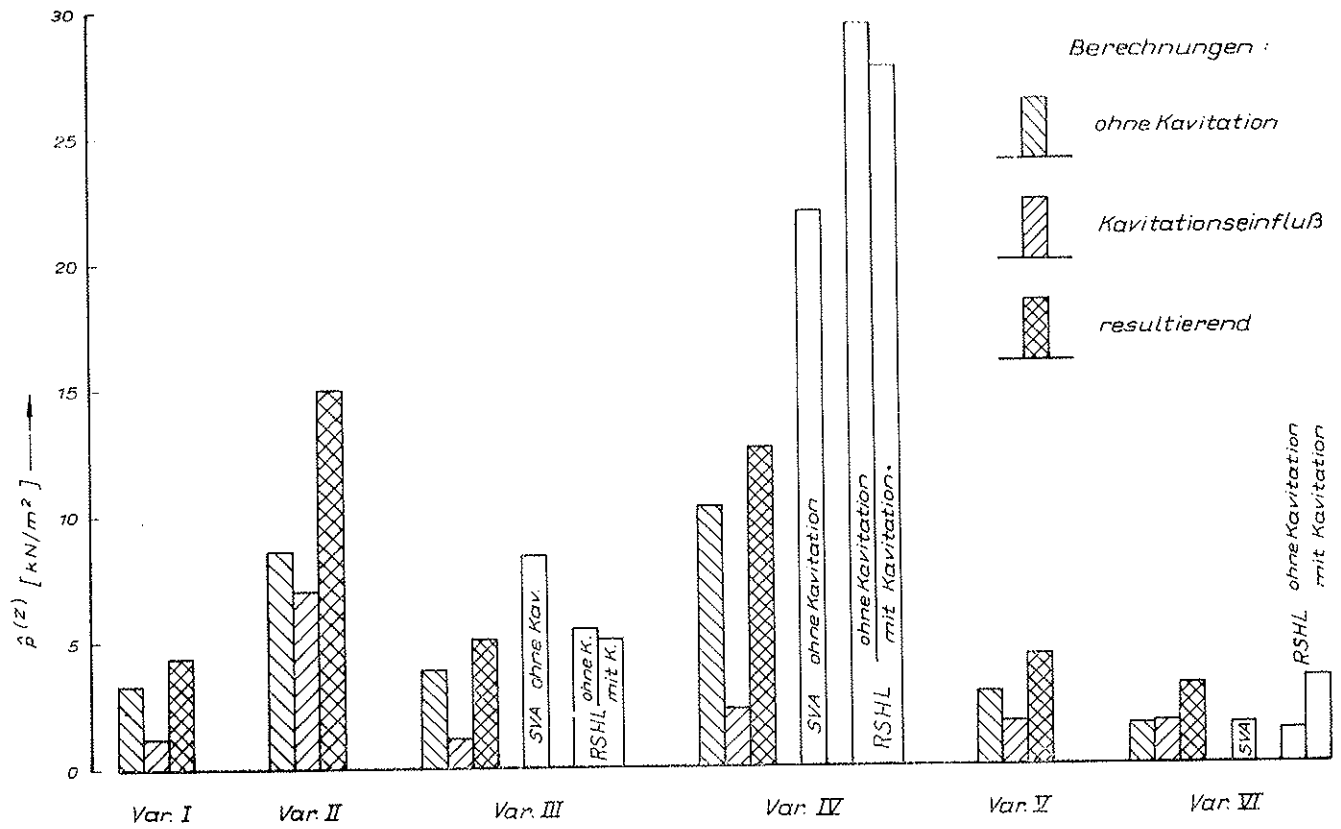


Bild 28. Druckschwankungen der ersten Ordnung über dem Propeller, Tankvarianten, voll beladen

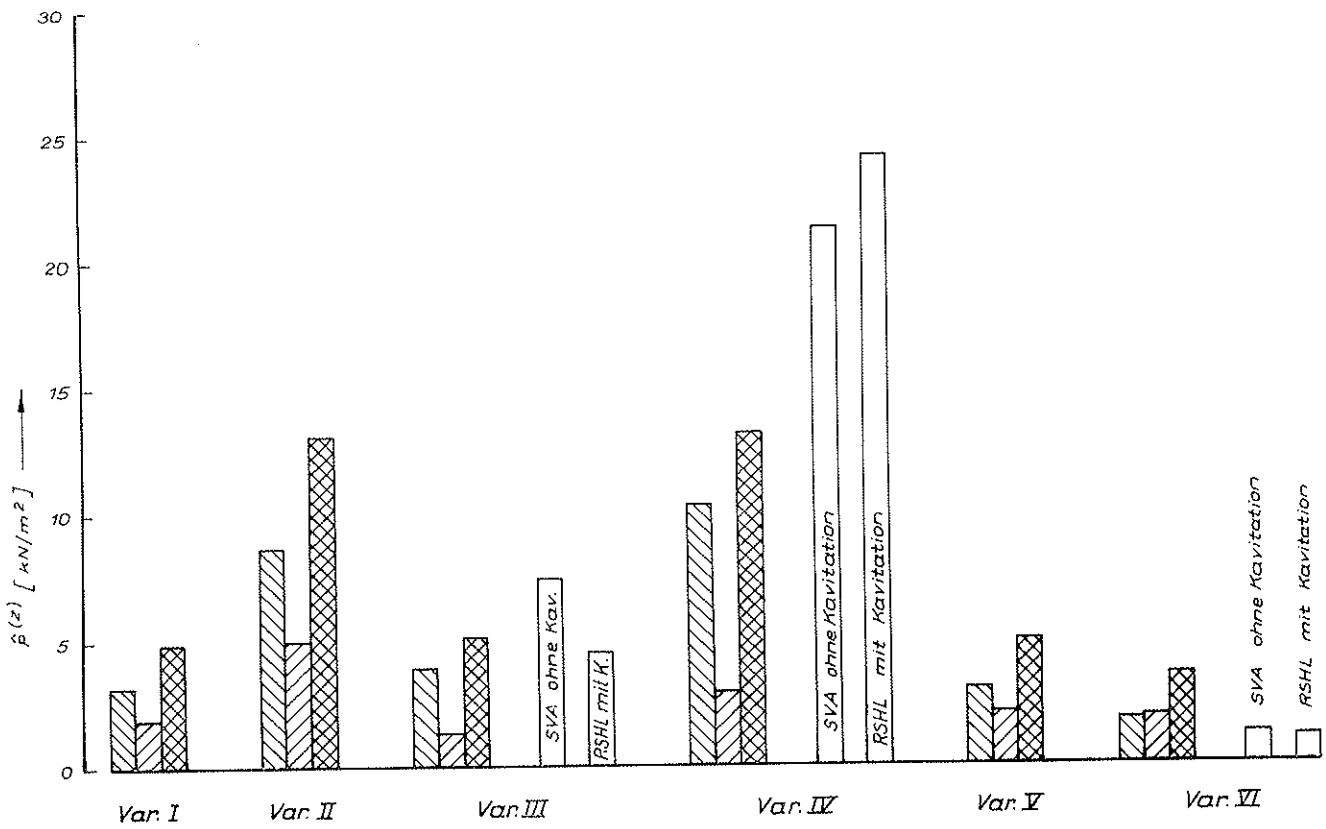


Bild 29. Druckschwankungen der ersten Ordnung über dem Propeller, Tankvarianten, unbeladen

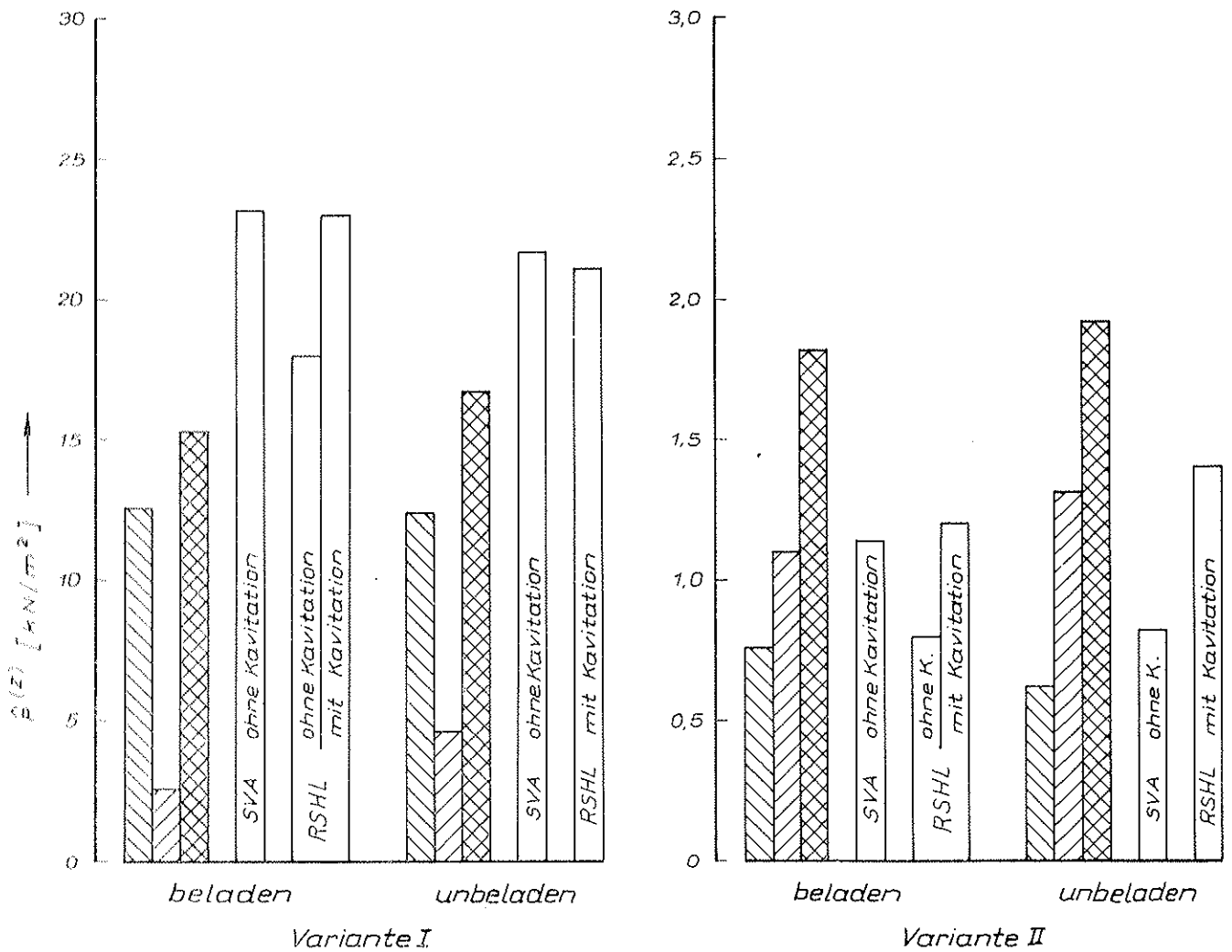


Bild 36. Druckschwankungen der ersten Ordnung über dem Propeller, Multiflexvarianten

Tabelle 3. Maximale Druckschwankungen [kN/m²]

Schiffstyp	Tanker						Multiflex	
	I	II	III	IV	V	VI	I	II
<i>maximale Druckschwankungen [kN/m²] nichtkavitierender + kavitierender Anteil</i>								
$\hat{p}(z)$								
beladen	4,4	15,0	5,1	12,6	4,6	3,3	15,3	1,8
unbeladen	4,9	13,1	5,2	13,2	4,9	3,5	16,7	1,9
$\hat{p}(zz)$								
beladen	2,8	15,4	2,5	9,7	2,8	1,2	10,2	1,3
unbeladen	3,8	10,7	2,8	10,2	3,2	1,9	12,6	0,9
<i>kavitierender Anteil [%]</i>								
$\hat{p}(z)$								
beladen	28	46	23	19	37	51	17	61
unbeladen	39	38	26	22	40	53	27	68
$\hat{p}(zz)$								
beladen	51	60	35	22	72	83	32	88
unbeladen	64	41	43	28	76	88	46	96

Bild 31. Einfluß des Propellerfreischlags auf die maximalen Druckschwankungen für die Tankervarianten I bis VI

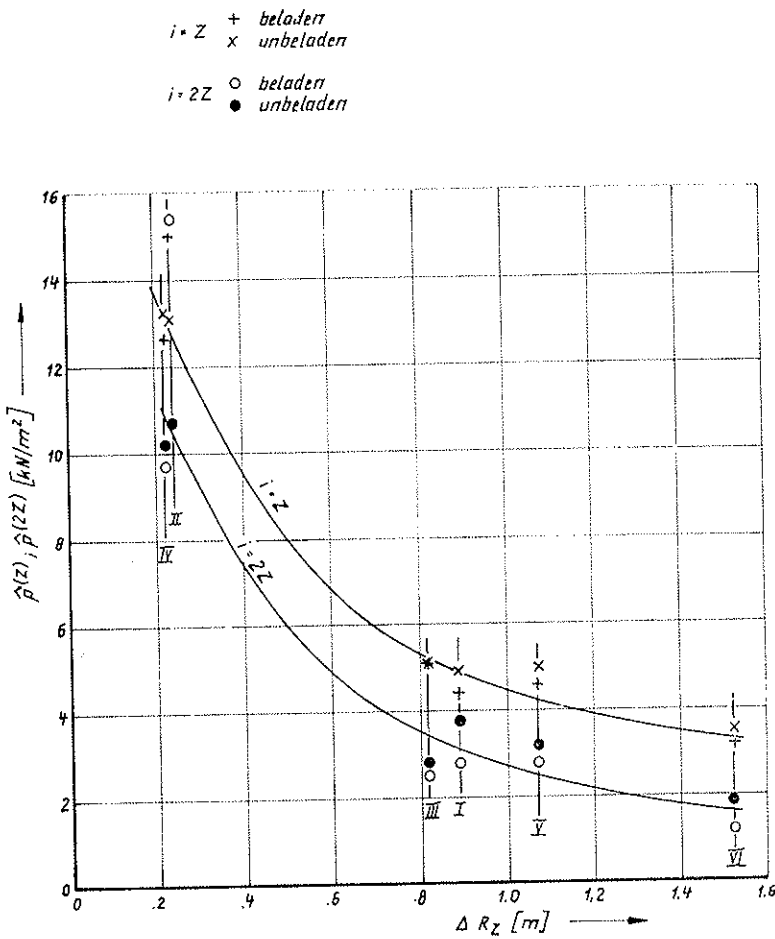


Tabelle 4. Oberflächenkraftschwankungen [kN]

Schiffstyp	Tanker						Multiflex	
	I	II	III	IV	V	VI	I	II
$F_x(z)$								
beladen	0,1	2,1	0,4	0,5	23,9	24,4	0	6,4
unbeladen	0,5	1,8	0,5	0,8	30,3	29,8	0	6,5
$F_x(2z)$								
beladen	0,8	2,5	0,3	1,1	20,7	11,8	0	5,2
unbeladen	1,5	0,7	0,5	0,4	27,7	21,7	0	3,4
$F_y(z)$								
beladen	10,2	20,9	14,0	28,9	18,8	12,6	7,1	3,2
unbeladen	10,5	32,5	13,7	20,7	18,9	11,7	7,9	3,1
$F_y(2z)$								
beladen	5,9	20,2	3,9	2,5	5,4	2,5	3,3	0,9
unbeladen	12,4	7,8	5,7	3,0	5,6	4,7	4,8	1,1
$F_z(z)$								
beladen	32,2	173,0	35,7	30,1	95,0	94,0	31,7	43,7
unbeladen	68,7	130,4	47,0	63,4	118,5	113,9	51,7	45,2
$F_z(2z)$								
beladen	45,6	153,2	20,1	60,7	77,9	43,9	33,7	34,7
unbeladen	86,4	39,3	29,8	22,1	103,7	80,5	58,6	22,5

zierung der Drehzahl wirkt sich zwar günstig auf die Druckschwankungserregung infolge Kavitation aus. Jedoch ist die Durchmesservergrößerung mit einer Verkleinerung der Freischläge verbunden, und dieser Effekt ist entscheidend.

Auf dem Bild 31 ist der Einfluß des Propellerfreischlags auf die maximalen Druckschwankungen für die Tankervarianten dargestellt. Für beide Ordnungen zeigen sich übereinstimmende Tendenzen. Bei vertikalen Freischlägen $\Delta R_z \geq 0,8$ m betragen die Druckschwankungen $\hat{p}^{(2)}$ und $\hat{p}^{(2z)}$ weniger als 5 kN/m^2 . Mit größer werdendem Freischlag werden sie nur noch langsam kleiner. Für die extrem kleinen Freischläge $\Delta R_z = 0,2 \dots 0,25$ m ergeben sich Druckschwankungsamplituden $\hat{p}^{(2)}$, $\hat{p}^{(2z)} = 10 \dots 15 \text{ kN/m}^2$. Die Ergebnisse für die beiden Multiflexvarianten erhärten diese Tendenzen.

Für übliche Frachtschiffe wird als kritischer Wert $\hat{p}_{\text{krit}} = 7 \text{ kN/m}^2$ für beide Ordnungen angegeben. Daher könnte bei den Varianten II und IV des Tankers bzw. Variante I des Multiflexschiffes mit einer Schwingungserregung durch Druckschwankungen gerechnet werden.

Zur Prognose der Schiffschwingungen sollten jedoch nicht nur die maximalen Druckschwankungen herangezogen werden, sondern die Oberflächenkraftschwankungen, die durch Integration der Druckschwankungen über die Außenhaut im Propellerbereich berechnet werden. Aus Tabelle 4 erkennt man, daß auch bei den Varianten mit extrem kleinen Freischlägen die Oberflächenkraftschwankungen nicht größer sind als bei den anderen Varianten. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, daß die sehr großen Druckschwankungen nur auf kleine Bereiche der Außenhaut wirken, bzw. an unterschiedlichen Orten verschiedene Phasenlagen haben.

Bild 32 zeigt für zwei Varianten die Verteilung der Druckschwankungen der 1. Ordnung und ihre Phasenlage in der Propellerenebene an der Außenhaut. Während sich bei der konventionellen Schiffform die Phasenlagen der Druckschwankungen entlang eines Spantes wenig ändern, ändern sich die Phasenlagen der Drücke am Tunnel von einem Ort zum anderen sehr schnell. (Phasenlagenunterschiede $\Delta\phi \approx 180^\circ$ bedeuten, daß die Drücke entgegengesetzt wirken und sich bei der Integration kompensieren.)

4. Experimentelle Untersuchungen

Die Modellversuche dienten nur dem Zweck, die Tendenzen, die sich aus den systematischen Berechnungen ergaben, zu kontrollieren und abzuzeichnen. Dabei wurden nicht an allen Untersuchungsobjekten Druckschwankungen gemessen.

Mit dem RSIII wurde abgestimmt, die Tankervarianten III, IV und VI, die beiden Multiflexvarianten und die Variante II des Fischereischiffs für die Experimente zu verwenden. Über das letztgenannte Objekt wird nicht berichtet, da es eine Propellerdüse besitzt und die experimentell bestimmten Druckschwankungen an der Außenhaut entsprechend klein und uninteressant sind. Berechnungen konnten für die Fischereischiffe mit Düsen nicht durchgeführt werden.

Bei den Modellversuchen in der Schlepprinne der SVA waren drei Druckmessdosen hintereinander etwa in der Mittelschiffsbene vor der Propellerenebene, in der Propellerenebene und dahinter angeordnet (vgl. Bild 27, Punkte 1, 2, 3). Bei den Varianten mit konventioneller Schiffform, d. h. mit einem Knick in der Gillungslinie, waren die Druckdosen dicht neben der Gillungslinie auf BB angeordnet. Die Koordinaten der Druckdosen sind in der Tabelle 5 für die Großausführung dargestellt. Der Koordinatenursprung ist durch die Propellerwelle bzw. Propellerenebene bestimmt.

Bei den Messungen mit Dummymodellen im Kavitationstunnel des RSIII wurden die Druckmessdosen an den gleichen Positionen und zusätzlich zwei Druckdosen SUB und BB in der Propellerenebene angeordnet.

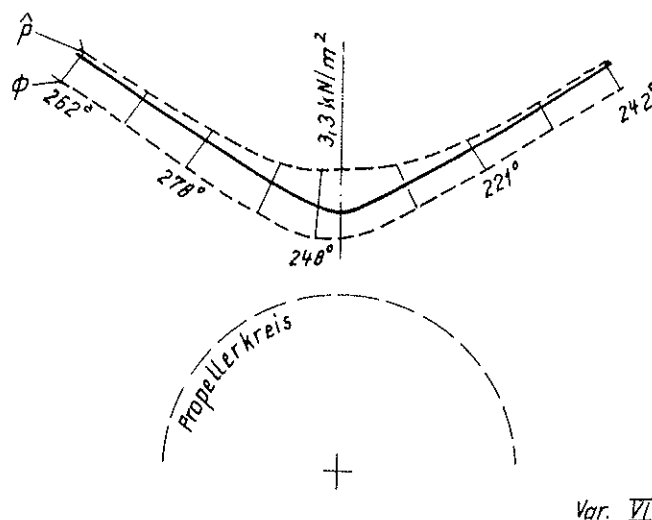
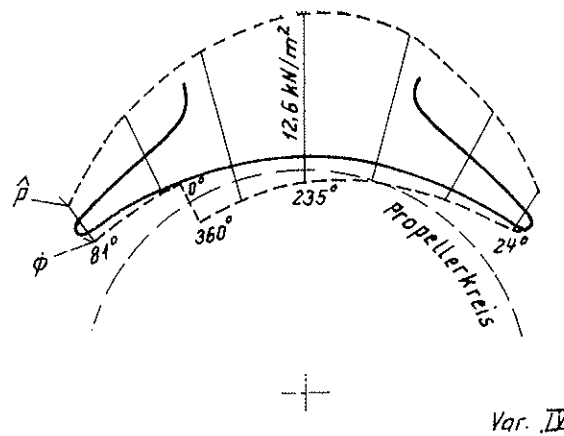


Bild 32. Verteilung der Druckschwankungen und Phasenlagen in der Propellerenebene für zwei Tankervarianten

	Tanker			Multiflexschiff	
	Var. III	Var. IV	Var. VI	Var. I	Var. II
x	1625	1625	1625	1222	1175
y	0	0	650	0	-470
z	4908	4325	4485	3149	4018
x	0	0	0	0	0
y	0	0	650	0	-470
z	4908	4322	4972	3149	4300
x	-1625	-1625	-1625	-1222	-1175
y	0	0	650	0	-470
z	4908	4322	5330	3149	4582

Definition der Koordinaten

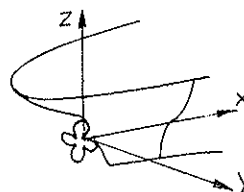


Tabelle 5. Anordnung der Druckmessdosen

Tabell 6. Vergleich gemessener und berechneter Druckschwankungen

Typ	Druckdose	1			2			3		
		Schlepp- rinne	Kavit.- tunnel [2]	Berech- nung	Schlepp- rinne	Kavit.- tunnel [2]	Berech- nung	Schlepp- rinne	Kavit.- tunnel [2]	Berech- nung
	Variante	Druckschwankungen der ersten Ordnung $\hat{p}^{(z)}$ [kN/m ²]								
Tanker	Var. III beladen	4,0	2,8	4,3	8,4	5,1	5,1	3,4	2,0	0,2
	unbeladen	3,7	2,5	4,4	7,4	4,5	5,2	4,2	2,0	0,3
	Var. IV beladen	6,3	5,2	7,1	22,0	27,7	12,6	4,4	2,6	0,7
	unbeladen	6,1	4,8	7,4	21,3	24,2	13,2	3,7	2,7	0,5
	Var. VI beladen	1,7	1,2	3,0	1,6	3,4	3,3	0,6	2,6	1,2
	unbeladen	1,6	1,0	3,3	1,2	1,0	3,5	-	0,6	1,3
Multiflex	Var. I beladen	14,7	5,4	5,9	23,2	23,0	15,3	4,7	3,0	2,1
	unbeladen	13,8	6,1	6,6	21,7	21,1	16,7	4,3	4,3	1,4
	Var. II beladen	1,1	1,3	2,2	1,1	1,2	1,8	0,5	0,6	1,1
	unbeladen	0,7	0,5	2,1	0,8	1,4	1,9	0,4	0,8	1,3
		Druckschwankungen der zweiten Ordnung $\hat{p}^{(2z)}$ [kN/m ²]								
Tanker	Var. III beladen		0,7	0,9	< 0,4	1,6	2,5		0,5	0,2
	unbeladen		0,8	1,1	< 0,7	2,0	2,8		0,8	0,7
	Var. IV beladen		1,6	0,6	< 2,0	19,6	9,7		1,6	0,5
	unbeladen		2,4	1,5	< 2,1	21,6	10,0		3,0	0,6
	Var. VI beladen		0,2	0,3	-	0,8	1,2		0,3	0,6
	unbeladen		0,1	1,5	< 0,1	0,3	1,9		0,1	1,1
Multiflex	Var. I beladen		0,4	1,6	< 5,5	17,3	10,2		0,9	0,9
	unbeladen		0,1	2,5	< 4,4	11,2	12,6		0,5	1,9
	Var. II beladen		0,6	1,3	< 0,1	0,4	1,3		0,2	1,0
	unbeladen		0,6	0,8	< 0,1	0,7	0,9		0,5	0,7

Alle Messungen wurden für den voll beladenen und den unbeladenen Zustand durchgeführt.

In der Schlepprinne der SVA konnte naturgemäß nur der Anteil der Druckschwankungen gemessen werden, den der nicht kavitierende Propeller erzeugt. Propellerkavitation kann nicht erzeugt werden. Durch unterschiedliche Reibungszüge bzw. zusätzliche Trossenzüge wurde ein größerer Belastungsbereich des Propellers untersucht als er im normalen Fahrtbetrieb eines Schiffes auftritt. Dabei zeigte sich keine eindeutige Abhängigkeit der dimensionslosen Druckbeiwerte

$$K_p \sim \frac{P}{\rho \cdot n^2 D^2}$$

von der Schubbelastung. Deshalb werden diese Ergebnisse nicht mitgeteilt. Eine stärkere Abhängigkeit von der Schubbelastung wurde wegen der fehlenden Kavitation auch nicht erwartet.

In RSHL wurden die Druckimpulse, die der kavitierende Propeller induziert, gemessen. Da bei diesen Versuchen für den voll beladenen Zustand die Kavitationszahlen in einem größeren Bereich variiert worden sind, kann hier jedoch auch auf die Druckschwankungen eines nicht kavitierenden Propellers extrapoliert werden.

Die Ergebnisse der Messungen mit allen Drucklosen sind ausführlich in [3], [5] dargestellt. In der Tabelle 6 sind die Mittelwerte von vielen Messungen der beiden Versuchsmitteln mit den Druckmessdosen 1 bis 3 den Ergebnissen der Berechnungen für diese Positionen gegenübergestellt. Die größten Druckschwankungen wurden an der Position 2 senkrecht über dem Propeller gemessen. Die ersten Ordnungen dieser Druckschwankungen sind auf den Bildern 28 bis 30 neben den berechneten Druckschwankungen dargestellt.

Aus diesen Bildern bzw. aus Tabelle 6 sind gewisse Widersprüche zwischen Berechnung und Experiment abzulesen. Aber auch die Meßergebnisse der Schlepprinne und des Kavitationstunnels sind nicht widerspruchsfrei. Teilweise wurden in der Schlepprinne trotz fehlender Kavitation größere Druckschwankungen gemessen als im Kavitationstunnel. Hieraus ist auf eine unzureichende Versuchs- und Meßtechnik zu schließen, insbesondere dann, wenn die Drücke selbst verhältnismäßig klein sind. Insofern sind die Meßwerte mit einer gewissen Vorsicht zu bewerten.

Die Unterschiede zwischen berechneten und gemessenen Druckschwankungen lassen jedoch auch Zweifel an der Richtigkeit der Berechnungen aufkommen. Das betrifft besonders die Schiffe mit großem Propeller und hierbei besonders die Varianten mit extrem kleinen Freischlägen. Hier wurden deutlich größere Druckschwankungen gemessen als berechnet.

Die Varianten mit kleinem Propeller und konventioneller Schiffsform zeigen dagegen gute Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung.

Die bisherigen Aussagen betreffen die Druckschwankungen erster Ordnung. Auch über die Druckschwankungen zweiter Ordnung können Aussagen gemacht werden.

Das Berechnungsverfahren berechnet Druckschwankungen erster und zweiter Ordnung. In [5] sind diese Werte für alle 50 Punkte der Oberfläche aufgeführt. Tabelle 6 zeigt diese Werte für die drei Meßpositionen.

In dem RSHL wurden mit den gemessenen Druckschwankungen Frequenzanalysen durchgeführt. Aus [3] wurden einige Werte entnommen und ebenfalls in der Tabelle 6 aufgeführt.

Bei den Messungen in der SVA wurden die Signale der Druckmessdosen in Tiefpässen gefiltert. Die Grenzfrequenzen wurden derartig gewählt, daß bei einer Messung nur die erste Ordnung der Druckschwankungen $\hat{p}^{(2)}$ und bei einer weiteren Messung die Resultierende der ersten drei Ordnungen

$$\hat{p}^{(23)} = \hat{p}^{(2)} + \hat{p}^{(3)} + \hat{p}^{(32)}$$

gemessen wurden. Tabelle 7 zeigt die in der SVA gemessenen Resultierenden der ersten drei Ordnungen, bezogen auf die erste Ordnung. Aus diesen Werten kann ebenfalls auf die Größe der Druckschwankungen höherer Ordnung geschlossen werden. Die in der Tabelle 6 angegebenen Werte für die zweite Ordnung der Messungen in der Schlepprinne stellen die obere Grenze dar, da in diesem Wert auch die dritte Ordnung enthalten ist.

Wie zu erwarten war, sind bei nicht-kavitierenden Propellern die Druckschwankungen höherer Ordnung klein. Sie nehmen jedoch mit kleiner werdenden Freischlägen etwas zu.

Vergleicht man diese Werte mit den berechneten bzw. den im Kavitationstunnel gemessenen Druckschwankungen der zweiten Ordnung, so kann man dort wesentlich größere Werte feststellen. Aus Tabelle 3 ist ersichtlich, daß ein großer Teil der Druckschwankungen der zweiten Ordnung auf die Kavitation zurückzuführen ist. Bei den Schiffen mit konventioneller Form und kleinem Propeller resultieren über 80% der Druckschwankungen zweiter Ordnung aus der Kavitation, und nur weniger als 20% sind auf den nicht kavitierenden Propeller zurückzuführen. Bei den anderen Varianten sind die Verhältnisse nicht ganz so extrem. Deshalb können die in der Schlepprinne gemessenen Druckschwankungen zweiter Ordnung nicht zur Überprüfung der berechneten Werte herangezogen werden.

Ein Vergleich der berechneten zweiten Ordnung ist jedoch mit den Meßergebnissen aus dem Kavitationstunnel des RSHL möglich. Ähnlich wie bei der ersten Ordnung zeigt sich auch bei der zweiten Ordnung, daß bei den Schiffen mit großem Propeller und extrem kleinen Freischlägen die gemessenen Druckschwankungen deutlich größer sind als die berechneten.

5. Schlußfolgerungen für den Entwurf von Schiffen mit großen langsamlaufenden Propellern

Durch die Modellversuchsergebnisse wurden Zweifel an der Richtigkeit der berechneten Druckschwankungen geweckt. Diese Zweifel betreffen insbesondere die Größenordnung der Druckschwankungen bei extrem kleinen Freischlägen. Die Kenntnis dieser Druckschwankungen ist jedoch für die Beurteilung der zu erwartenden Schwingungserregung von ausschlaggebender Bedeutung.

Andererseits sind wichtige Tendenzen der Berechnung durch die Experimente qualitativ bestätigt worden.

Da außerdem die Modellversuche nicht systematisch genug durchgeführt worden sind und die Ergebnisse ihrerseits auch gewisse Widersprüche aufweisen, sollen den Schluß-

	Tanker			Multiflexschiff	
	Var. III	Var. IV	Var. VI	Var. I	Var. II
beladen	1,05	1,09	—	1,2½	1,14
unbeladen	1,10	1,10	1,06	1,21	1,16

Tabelle 7. Resultierende Druckschwankungen der ersten drei Ordnungen, bezogen auf die erste Ordnung (Messung der SVA ohne Kavitation)

folgerungen die Berechnungsergebnisse zugrunde gelegt werden.

Die Größe des Propellerdurchmessers und die Drehzahl haben großen Einfluß auf die Kavitationserscheinungen am Propeller. Die Kavitation wiederum bestimmt im allgemeinen wesentlich die Größe der propellererregten Druckschwankungen.

Die Intensität und Instationarität der Kavitation wird durch die Ungleichförmigkeit der Propellerzuströmung, die Propellerbelastung und die Umfangsgeschwindigkeit bestimmt. Mit steigendem Propellerdurchmesser sinken Propellerbelastung und Umfangsgeschwindigkeit, was sich günstig auf die Kavitation auswirkt. Dagegen erhöht sich etwas die Ungleichförmigkeit der Propellerzuströmung. Bei allen untersuchten Objekten ist der Einfluß der Kavitation auf die Größe der Druckschwankungen nicht so gravierend wie bei einigen Beispielen aus der Literatur, z. B. [6]. Bei der günstigsten Tankervariante mit $D_p = 8,2$ m betragen die Druckschwankungsanteile, die aus der Kavitation resultieren, nur 20 bis 25% für die erste und 25 bis 35% für die zweite Ordnung.

Bei anderen Schiffen, bei denen der Kavitationseinfluß auf die Druckimpulserregung größer ist, kann sich möglicherweise eine Durchmesserergrößerung positiv auf die Druckschwankungen auswirken.

In den vorliegenden Fällen ist jedoch für die Größe der Druckschwankungen die Größe des Propellerdurchmessers nicht entscheidend, sondern die Größe des Propellerfreischlags.

Da aber der Propellerfreischlag nicht willkürlich gewählt werden kann, sondern Propellerdurchmesser abhängig ist (ein großer Propeller gestattet meist nur kleine Freischläge), zeigt sich doch eine gewisse Abhängigkeit der Druckimpulse vom Propellerdurchmesser. Allerdings zeigen die verschiedenen Ausführungsformen der Tankervarianten, daß es auch bei großem Propeller noch möglich ist, den Freischlag innerhalb bestimmter Grenzen zu variieren.

Bei extrem großen Propellerdurchmessern muß die Propellerwelle nach oben verschoben werden. Das erfordert eine größere Schürze, was u. a. mit einer Widerstandserhöhung verbunden ist, und durch die Propellerzuströmung ungleichförmiger, und durch die geringere Tauchtiefe verschlechtert sich die Kavitation zusätzlich. Daher wird mit einem bestimmten Propellerdurchmesser ein Optimum erreicht, und eine weitere Durchmesserergrößerung bringt Verschlechterungen. Auch wird bei extrem großen Propellerdurchmessern die Einhaltung eines Mindestfreischlags immer schwieriger.

Für die untersuchte Tankerfamilie kann eingeschätzt werden, daß die Variante am zweckmäßigsten ist, bei der die Propellerwelle noch nicht angehoben werden muß. Das ist bei den Tankervarianten mit $D_p = 8,2$ m der Fall.

Für gewöhnliche Frachtschiffe mit üblichen Propellerdurchmessern und Freischlägen wird für den Bereich über dem Propeller als kritische Druckschwankung der Wert $p_{krit} = 7 \text{ kN/m}^2$ angesehen. Unter der Annahme, daß die berechneten Werte einigermaßen richtig sind, kann aus Bild 31 als Mindestfreischlag der Wert

$$\Delta R_z/D = 0,06$$

abgelesen werden. Sollten die tatsächlichen Druckschwankungen bei Schiffen mit kleinen Freischlägen jedoch größer sein, so könnte ein etwas größerer Freischlag gewählt werden.

Für die verschiedenen Varianten wurden die Propeller für gleiche Kavitationssicherheit entworfen. Da in diese Rechnung die Zuströmungsgleichförmigkeit nicht eingeht, werden mit größer werdendem Propellerdurchmesser und kleiner werdender Drehzahl die Flächenverhältnisse kleiner. Das wirkt sich natürlich positiv auf den Propellerwirkungsgrad aus.

Es wurde aber auch gezeigt, daß mit zunehmendem Propellerdurchmesser die Propellerzuströmung (geringfügig)

ungleichförmiger wird. Dadurch pulsiert die Kavitation stärker, was sich negativ auf die Erregung von Druckimpulsen auswirkt. Sollte die Kavitation bei irgendwelchen Objekten eine größere Rolle spielen als bei der vorliegenden Tankerfamilie, so muß überprüft werden, wie sich eine eventuelle geringe Vergrößerung des Flächenverhältnisses auf die Erregung von Druckschwankungen auswirkt.

Außer der Vergrößerung des Flächenverhältnisses können weitere Parameter der Propellergeometrie verändert werden. Die bekanntesten Möglichkeiten zur Reduzierung der Druckschwankungen sind:

- Spitzenentlastung
- Skewpropeller
- Erhöhung der Flügelzahl.

Unter Berücksichtigung der Möglichkeiten, die ein optimaler Propellerentwurf birgt, sollte der oben genannte Mindestfreischlag in den meisten Fällen ausreichen.

Außerdem wurde nachgewiesen, daß zwar mit kleiner werdenden Freischlägen die örtlichen Druckschwankungen zunehmen, die Kraftschwankungen an einem großen Ausschnitt der Schiffsaußenhaut aber noch längst nicht zunehmen müssen. Das bedeutet, daß auch bei geringer Überschreitung der kritischen Druckschwankungen an einzelnen Stellen mit einer globalen Schwingungserregung des gesamten Hinterschiffes nicht zu rechnen ist.

6. Zusammenfassung

An einer Serie von sechs Tankern und zwei Multiflexschiffen wurde der Einfluß einer Durchmesserergrößerung auf Propellerkavitation und propellererregte Druckschwankungen untersucht. Dazu wurden für alle Varianten jeweils für zwei Beladungsfülle die Kavitation und die Druckschwankungen berechnet. Durch Modellversuche mit einigen dieser Schiffe wurden die Berechnungsergebnisse überprüft. Dazu wurden in der Schleppe der SVA Versuche mit nicht-kavitierenden Propellern durchgeführt, und im Kavitationstunnel des RSHL wurde durch Versuche mit Dünnmodellen der Einfluß der Kavitation untersucht.

Teilweise wurden die Berechnungsergebnisse durch die Experimente bestätigt. So wurden für die Schiffe mit großen Propellern und extrem kleinen Freischlägen direkt über dem Propeller bis zu doppelt so hohe Druckschwankungen gemessen wie berechnet. Bei den Schiffen mit größeren Freischlägen bestand dagegen bessere Übereinstimmung zwischen Berechnung und Experiment. Auch die wichtigsten Tendenzen wie Einfluß der Kavitation und Bedeutung des Freischlags wurden durch die Modellversuche bestätigt. So konnten trotz einiger Widersprüche aus den Ergebnissen der Untersuchungen wichtige Schlussfolgerungen für den Entwurf von Schiffen mit großen Propellern abgeleitet werden.

Für die Größe der propellererregten Druckschwankungen ist die Größe des Propellerfreischlags von entscheidender Bedeutung. Da gleichzeitig mit einer Durchmesserergrößerung im allgemeinen die Freischläge kleiner werden und außerdem oftmals die Propellerzuströmung im Flügelspitzenbereich ungleichförmiger wird, können die Druckschwankungen in eine gefährliche Größenordnung gelangen. Das bedeutet für den Schiffs- und Propellerentwurf, daß auf eine möglichst gleichmäßige Propellerzuströmung Wert gelegt werden sollte und daß die Wahl der Freischläge und die Festlegung der Propellergeometrie besonders sorgfältig erfolgen müssen.

7. Literatur

- [1] Ergebnisse systematischer Modelluntersuchungen über den Einfluß einer Vergrößerung des Propellerdurchmessers auf die Propulsion von Transportschiffen und nichtstationäre hydrodynamische Belastungen. Analyse der natürlichen Prüfungen der Schiffe mit langsamlaufenden Propellern. Bericht der UdSSR zu den Etappen 2 und 3 des Themas 11-5, Leningrad 1983.
- [2] Popovici, J.; Tebolic, S.; Scurtu, G.: Some experimental aspects on propeller-hull interaction. Proc. 111. Scientific and Methodological Seminar on Ship Hydrodynamics, Varna 23. - 29. 9. 1985, Vol. 2.

Fortsetzung auf S. 125 unten!