

Experimentelle und rechnerische Bestimmung der hydrodynamischen Belastungsschwankungen am Propeller eines Frachtschiffes mit großem Propeller

Dr.-Ing. A. Haimov, Dr.-Ing. G. Gerchev, Dipl.-Ing. Dietrich Schmidt

Mitteilung aus dem Bulgarian Ship Hydrodynamics Centre Varna und dem Direktorat für Forschung und Erzeugnisentwicklung des VEB Kombinat Schiffbau Rostock

1. Einführung

Zur experimentellen Bestimmung der hydrodynamischen Belastungsschwankungen am Propeller existieren zwei prinzipiell unterschiedliche Methoden:

- (a) Messung der instationären Kräfte und Momente des vollständigen Propellers, die in die Propellerwelle bzw. deren Lager eingeleitet werden,
- (b) Messung der Kräfte und Momente am Propellerflügel in einer instationären Propellermeßnabe. Die Belastungen des vollständigen Propellers werden hieraus berechnet.

Beide Meßmethoden haben spezifische Eigenheiten, die kurz angedeutet werden sollen.

An einem Propeller wirken Kräfte und Momente in jeweils drei Richtungen. Jede dieser sechs Komponenten kann von so einer Größenordnung sein, daß sie unzulässige Schwingungen an Propeller, Wellenleitung oder Hinterschiff erzeugen. Daher sollte das Meßsystem die Bestimmung aller sechs Komponenten der Propellerbelastungen ermöglichen.

Die Herstellung und Anwendung eines instationären 6-Komponenten-Propellerdynamometers bereitet jedoch erhebliche Schwierigkeiten. Diese betreffen sowohl die Realisierung einer ausreichend hohen Eigenfrequenz und die Vermeidung der gegenseitigen Beeinflussung der einzelnen Komponenten bei unterschiedlich kleiner Baugröße als auch die Gewinnung, Verarbeitung und Analyse der Meßsignale. Daher werden in vielen Versuchsanstalten Dynamometer verwendet, mit denen nur einige Komponenten bestimmt werden können.

Mit einem solchen Dynamometer werden genau die Größen gemessen, die die Schwingungen erzeugen. Die Filterwirkung durch die Flügelzahl des Propellers wird berücksichtigt.

Die instationäre Propellermeßnabe hat demgegenüber den Vorteil, daß alle Harmonischen der Kräfte und Momente am Propellerflügel bestimmt werden, ohne die Filterwirkung entsprechend der Flügelzahl wirksam werden zu lassen und daß die erforderliche obere Grenzfrequenz leichter erreicht werden kann.

Auch an dem Propellerflügel wirken sechs Belastungskomponenten. Von diesen spielen die radiale Kraftkomponente keine Rolle und das Torsionsmoment um die Flügelachse nur eine untergeordnete Rolle. Unter der Annahme, daß Schub und Tangentialkraft am Propellerflügel auf dem Radius $r/R = 0,7$ angreifen, können allein aus den beiden letztgenannten Komponenten alle sechs Komponenten der Belastungsschwankungen für den vollständigen Propeller berechnet werden. Selbstverständlich würde das Ergebnis genauer sein, wenn anstelle des Radius $r/R = 0,7$ der exakte Radius des Kraftangriffspunktes bestimmt werden würde.

Mit einer instationären Meßnabe mit einer gegebenen Flügelzahl kann auch das Verhalten eines Propellers mit anderer Flügelzahl abgeschätzt werden.

Aus den angedeuteten Eigenheiten beider Meßmethoden resultieren spezielle vorzugsweise Anwendungsgebiete. Das Propellerdynamometer ist besonders für die Untersuchung der Schwingungserregung durch den Propeller mit festgelegter Flügelzahl und Propellersteigung geeignet, da

genau die Größen gemessen werden, die die propellererregten Schwingungen erzeugen. Die Propellermodelle und entsprechend die Schiffmodelle können verhältnismäßig klein sein.

Das Anwendungsgebiet der instationären Meßnabe ist vielseitiger. Neben der Untersuchung der Schwingungserregung durch den Propeller kann die Belastung des einzelnen Propellerflügels in Abhängigkeit von der Propellersteigung untersucht werden. Nachteile dieses Meßsystems sind die verhältnismäßig großen Abmessungen der Meßnabe, die große Propeller und entsprechend große Schiffmodelle bedingen, und die möglicherweise etwas geringere Meßgenauigkeit. Hauptursachen hierfür sind einerseits, daß die Hebelarme der angreifenden Kräfte nicht genau bekannt sind und andererseits, daß die Kraftschwankungen höherer Ordnungen am Propellerflügel, die die Kraftschwankungen am vollständigen Propeller und damit die Schiffsschwingungen hervorrufen, deutlich kleiner sind als die Kraftschwankungen der ersten beiden Ordnungen, das Meßsystem jedoch für diese große Kraftschwankungen ausgelegt werden muß.

Im Bulgarian Ship Hydrodynamics Centre Varna (BSHC) wird zur Bestimmung der Schwingungserregenden Propellerkräfte und Momente ein instationäres Propellerdynamometer entsprechend Methode (a) verwendet, mit dem die beiden Komponenten Propellerschub und Propellerdrehmoment gemessen werden können.

In der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam (SVA) des VEB Kombinat Schiffbau der DDR wird zur Bestimmung dieser Verwindungen eine Meßnabe entsprechend Methode (b) verwendet.

Zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit dieser Gerätesysteme wurden in beiden Institutionen Vergleichsversuche durchgeführt. Dazu wurden nach gleichen Linierrissen Modelle in annähernd gleichen Maßstäben angefertigt.

Unter Berücksichtigung aktueller Tendenzen im Frachtschiffbau wurde für die Vergleichsversuche ein Multiflexschiff mit großem, langsam laufendem Propeller ausgewählt. Ergänzend zu den instationären Vergleichsversuchen wurden auch Standardmodellversuche durchgeführt, um auch diesbezüglich Vergleiche der Meßtechniken beider Versuchsanstalten durchführen zu können.

2. Symbole

a_1	cos-Fourierkoeffizient des axialen Nachstroms	
A_E/A_0	Flächenverhältnis des Propellers	
b_1	sin-Fourierkoeffizient des tangentialen Nachstroms	
B	Koeffizient von Schiff oder Modell	[m]
c_B	Koeffizient der Verdrängung	
d_n	Nabendurchmesser	[m]
D	Propellerdurchmesser	[m]
J	Fortschrittsziffer ($J = V'/n' \cdot D'$)	
J_{eff}	effektive Fortschrittsziffer ($J_{\text{eff}} = V' (1 - w_T) / n' \cdot D'$)	
K_Q	Drehmomentbeiwert ($K_Q = Q/\rho \cdot n'^2 \cdot D'^5$)	
K_T	Schubbeiwert ($K_T = T/\rho \cdot n'^2 \cdot D'^4$)	
L_{PP}	Länge zwischen den Loten	[m]
L_{WL}	Länge in der Wasserlinie	[m]

n	Drehzahl des großen Propellers	[U/min]
n'	Drehzahl des Modellpropellers	[U/s]
P_K/D	Konstruktionssteigungsverhältnis	
$P_{0,7}/D$	Verhältnis der auf 0,7 R eingestellten Steigung	
P_D	Antriebsleistung am Propeller	[kW]
P_E	Schleppleistung	[kW]
Q_0	stationäres Drehmoment	[Nm]
\dot{Q}_i	Amplitude der i-ten Ordnung des Drehmoments	[Nm]
r	Radius in der Propellerebene	[m]
R	Propellerradius	[m]
S	benetzte Oberfläche	[m ²]
t	Sogziffer	
T_0	stationärer Propellerschub	[N]
\dot{T}_i	Amplitude der i-ten Ordnung des Propellerschubs	[N]
T_a	Tauchtiefe am hinteren Lot	[m]
T_f	Tauchtiefe am vorderen Lot	[m]
T_m	Tauchtiefe von Mitte Schiff	[m]
V	Schiffsgeschwindigkeit	[kn]
V'	Modellgeschwindigkeit	[m/s]
w_a	axialer nomineller Nachstrom	
w_t	tangentialer nomineller Nachstrom	
w_T	effektiver Nachstrom, mit Schubidentität gebildet	
Z	Flügelzahl	
ΔC_F	Reibungszuschlag-Beiwert	
ϵ	Neigung des Propellerflügels	[°]
η_0	Propellerwirkungsgrad	
η_D	Propulsionswirkungsgrad	
η_H	Schiffskörpereinflußgrad ($\eta_H = 1 - t / (1 - w_T)$)	
η_R	Gütegrad der Propelleranordnung	
θ	Polarkoordinate in der Propellerebene	[°]
θ_S	Skew-Winkel	[°]
z	Modellmaßstab	
ν_a	Eigenfrequenz des Meßgliedes mit Meßflügel in axialer Richtung	[Hz]
ν_t	Eigenfrequenz des Meßgliedes mit Meßflügel in tangentialer Richtung	[Hz]
ν_g	Grenzfrequenz	[Hz]
ϕ_i	Phasenwinkel einer Belastungsschwankung der i-ten Ordnung	[°]
∇	Verdrängung	[m ³]

3. Geometrische Daten der Modelle

3.1. Schiffmodell

Die Modellversuche wurden mit dem Multiflexschiff vom Typ „Hamlet Alice“ durchgeführt. Dieses Schiff besitzt ein speziell für große Propeller entwickeltes Tunnelheck (Bild 1). Während vom BSHC speziell für dieses Schiff ein Propeller angefertigt worden ist, wurde in der SVA ein vorhandener Propeller mit ähnlichem Flächenverhältnis gewählt. Daher unterscheiden sich die Modellmaßstäbe

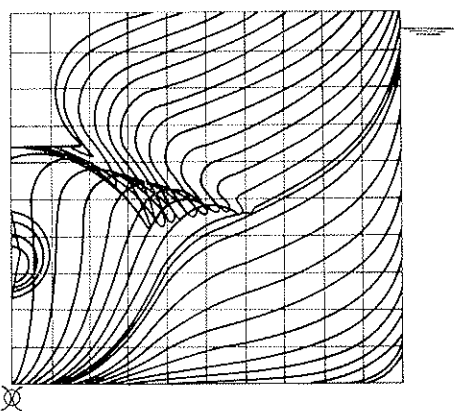


Bild 1. Spantenriß

Tabelle 1.: Hauptabmessungen vom Schiff und den Modellen

Versuchsanstalt		BSHC	SVA
Bezeichnung		Hamlet Alice	M 0124
Maßstab	λ	—	23,5
Länge zwischen den Loten	L_{pp} [m]	122,3	5,204
Länge in der Wasserlinie			
beladen	L_{WL} [m]	126,0	5,362
unbeladen		130,7	5,562
Breite	B [m]	20,5	0,872
Tiefgang Mitte Schiff			
beladen	T_m [m]	9,4	0,400
unbeladen		5,3	0,226
Tiefgang vorderes Lot			
beladen	T_f [m]	9,4	0,400
unbeladen		4,45	0,189
Tiefgang hinteres Lot			
beladen	T_a [m]	9,4	0,400
unbeladen		6,15	0,262
Blockkoeffizient			
beladen	C_B [—]	.710	
unbeladen		.615	
Verdrängung			
beladen	∇ [m ³]	17248	1,329
unbeladen		8734	0,673
benetzte Oberfläche			
beladen	S [m ²]	4114	7,150
unbeladen		2899	5,249

geringfügig. Die Hauptabmessungen vom Schiff und den Modellen sind aus Tabelle 1 zu ersehen.

3.2. Propellermodelle

Vom BSHC wurde der speziell für dieses Schiff entworfene Propeller im Modell nachgebaut. In der SVA wurde ein vorhandener Verstellpropeller-Flügelsatz für diese Untersuchungen verwendet. Der Steigungsverlauf dieses Propellers ist einer Nachstromverteilung eines Schiffes angepaßt, bei dem der Nachstrom im äußeren Radienbereich im Mittel verhältnismäßig klein ist. Deshalb nimmt die Steigung nach außen hin zu. Derartige Propeller werden jetzt kaum noch gebaut, da diese nachstromangepaßten Optimalpropeller verhältnismäßig große Druckschwän-

Tabelle 2.: Parameter der Propellermodelle

Bezeichnung		BSHC	SVA
Durchmesser	D [m]	0,260	0,250
Konstruktionssteigung	P_K/D	1,078	0,957
eingestellte Steigung	$P_{0,7}/D$	1,078	1,078
Flächenverhältnis	A_F/A_0	0,420	0,484
Flügelzahl	z	4	4
Drehrichtung		rechts	links
Flügelneigung (rake)	r°	0	0
Flügelrücklage (skew)	θ_S°	10	7
Nabendurchmesser	d_n [m]	0,062	0,075
Nabendurchmesserverhältnis	d_n/D	0,238	0,300

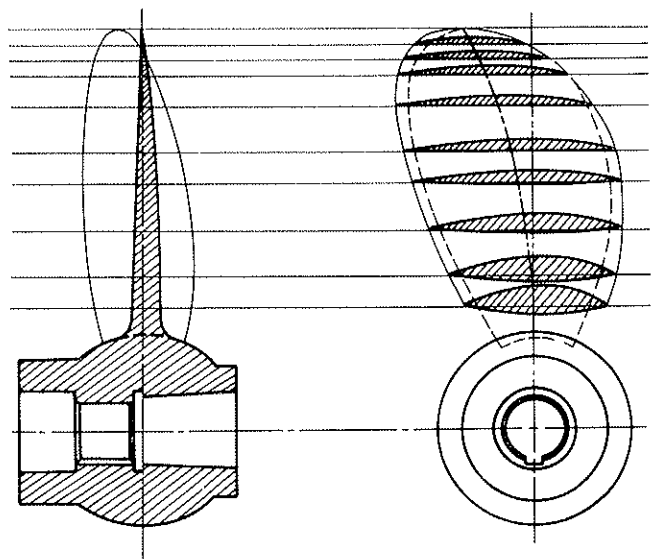


Bild 2. BSHC-Propeller P 0278

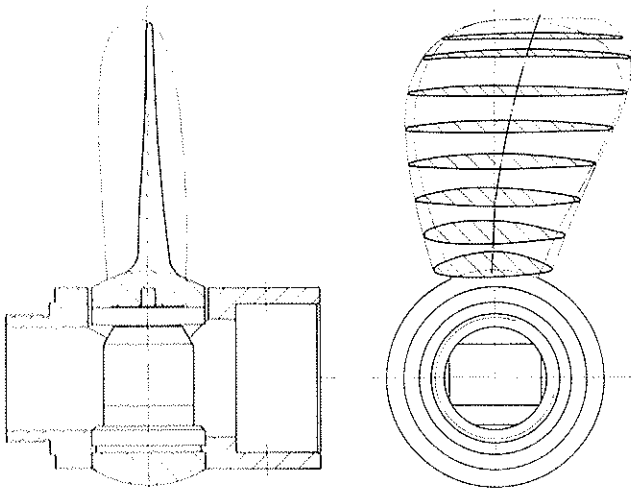


Bild 3. SVA-Propeller VP 3019

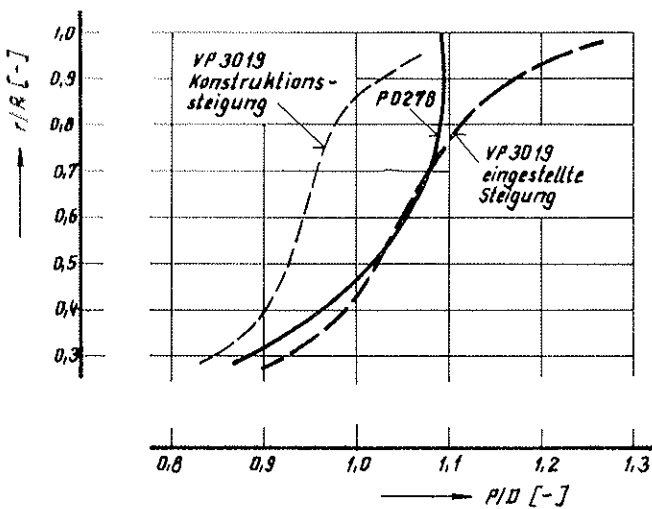


Bild 4. Steigungsverläufe

kungen an der Schiffsaußenhaut erzeugen, so daß in den letzten Jahren oftmals Propeller mit an der Flügelspitze reduzierter Steigung entworfen wurden.

Die Bilder 2 und 3 zeigen die verwendeten Propeller. Auf dem Bild 4 sind die Steigungsverläufe beider Propeller dargestellt. Der SVA-Propeller wurde derartig eingestellt, daß die Steigungen auf den Radius $r/R = 0,7$ übereinstimmen. In der Tabelle 2 sind die wichtigsten Parameter der Propellermodelle aufgeführt.

4. Standardmodellversuche zur Bestimmung stationärer Meßgrößen

4.1. Propellerfreifahrtversuche

Die Propellerfreifahrtversuche mit dem Propeller P 0278 wurden im BSHC in der Schlepprinne durchgeführt.

Die Versuche mit dem Verstellpropeller VP 3019 wurden in der SVA im Kavitationstunnel durchgeführt. Daher beginnt der Meßbereich erst bei $J = 0,3$. Der Wandeinfluß wurde nach der Methode von Glauert eliminiert.

Die Meßergebnisse sind im Bild 5 dargestellt. Der Wirkungsgrad des SVA-Propellers ist deutlich niedriger. Das ist auf den größeren Nabendurchmesser und den für homogene Propellerzuströmung ungünstigen Steigungsverlauf zurückzuführen.

4.2. Widerstands- und Propulsionsversuche

Die Widerstands- und Propulsionsversuche wurden für den voll beladenen und den unbeladenen (Ballast-) Zustand durchgeführt.

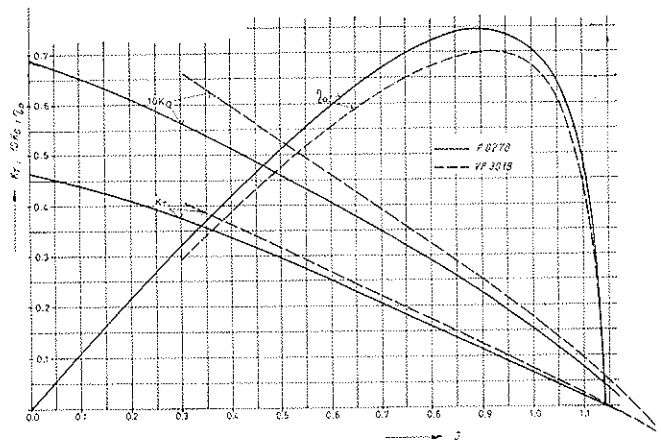


Bild 5. Propellerfreifahrtkurven

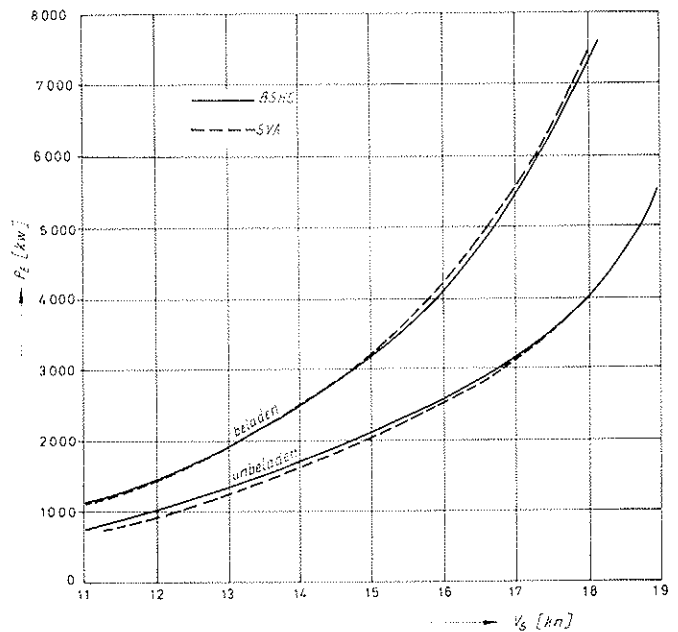


Bild 6. Schleppleistungen

Die Ergebnisse der Widerstandsversuche sind in Bild 6 dargestellt. Die Meßergebnisse des BSHC sind mit der ITTC-57 Reibungslinie und dem Reibungsbeiwert $\Delta C_F = 0,00033$ auf die Großausführung umgerechnet worden, während für die Umrechnung der SVA-Versuchsergebnisse die Methode nach Schoenherr mit dem Beiwert $\Delta C_F = 0,0002$ verwendet worden ist.

Die Propulsionsversuche wurden im BSHC und in der SVA nach verschiedenen Methoden durchgeführt. Im BSHC war das Modell mit der Widerstandswaage fest verbunden (Britische Methode). In der SVA wurden die Propulsionsversuche nach der Methode des freifahrenden Modells durchgeführt (Kontinentale Methode). Zur Korrektur des Reynoldszahleinflusses wurde das Modell mit dem Reibungsabzug R_a entlastet, der wiederum mit $\Delta C_F = 0,0002$ berechnet worden ist.

Das Bild 7 zeigt die Wellenleistungen am Propeller P_D [kW] und die zugehörigen Propellerdrehzahlen n [U/min].

Die Bilder 8 und 9 zeigen die Koeffizienten der Wechselwirkung von Schiff und Propeller w_T und t und die Wirkungs- bzw. Gütegrade η_0 , η_D , η_R , η_H für den beladenen und unbeladenen Fahrtzustand.

Die hauptsächlichsten Unterschiede resultieren aus den unterschiedlichen Propellern. Wegen des niedrigeren Wirkungsgrades des SVA-Propellers werden hier bei etwa gleichem Schiffswiderstand für die gleiche Geschwindigkeit höhere Antriebsleistungen benötigt.

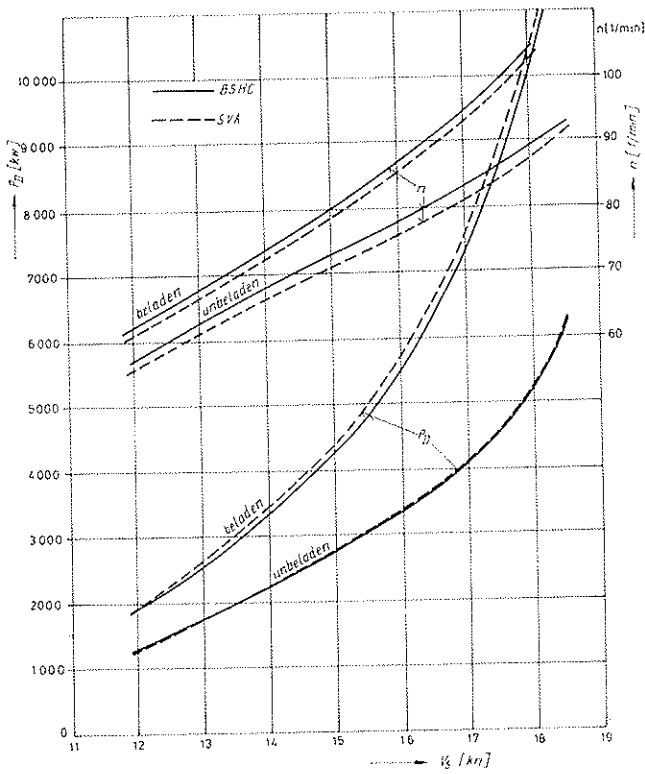


Bild 7. Antriebsleistungen, Drehzahlen

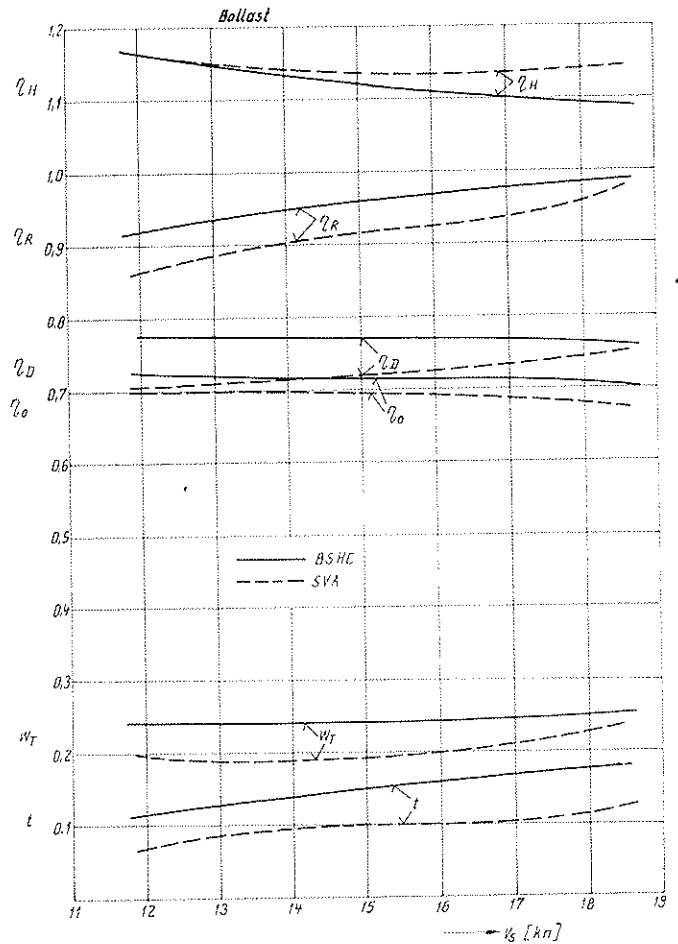


Bild 8. Propulsionskennzahlen, unbeladen

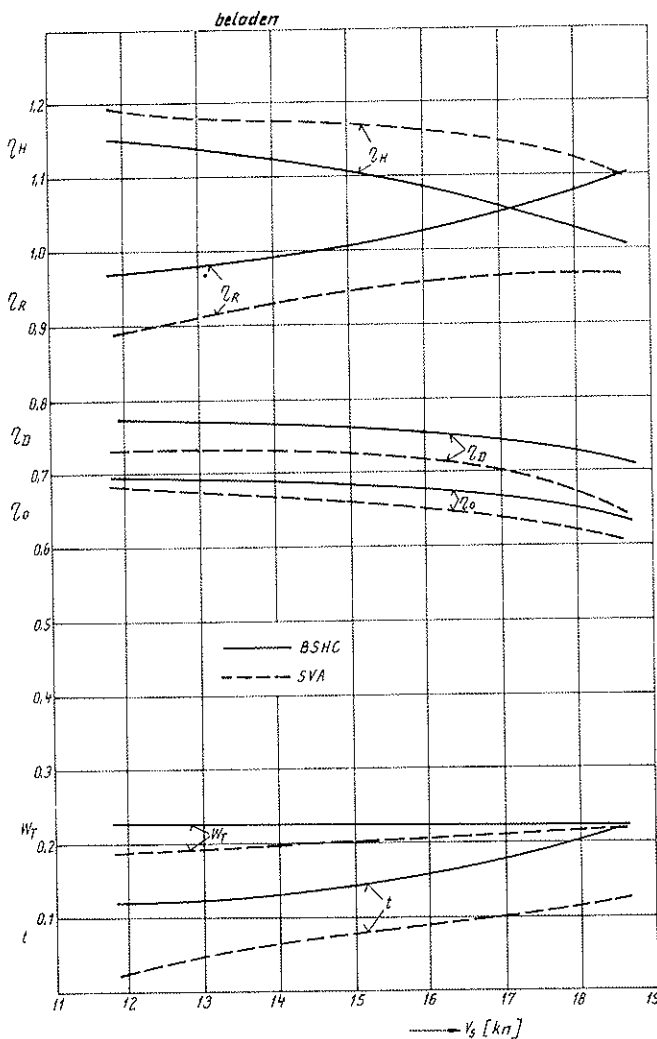


Bild 9. Propulsionskennzahlen, voll beladen

Weitere bemerkenswerte Unterschiede zeigen sich bei den Sog- und effektiven Nachstromziffern. Diese Unterschiede resultieren aus den unterschiedlichen Steigungsverläufen beider Propeller. Der SVA-Propeller besitzt in den äußeren Radialbereichen eine größere Steigung, erzeugt hier folglich verhältnismäßig mehr Schub. Da die Anströmgeschwindigkeiten hier im Mittel größer sind, sind bei den SVA-Versuchen die effektiven Nachstromziffern kleiner. Die Verlagerung des Schubs nach außen schlägt sich jedoch auch in deutlich niedrigeren Sogziffern nieder, so daß bei den SVA-Versuchen der Schiffskörpergütegrad η_H sogar höher ist. Leider wird die Erhöhung des Schiffskörpergütegrades durch eine deutliche Verschlechterung des Gütegrades der Anordnung η_R erkauft, so daß der Propulsionsgütegrad η_P mit dem BSHC-Propeller P 0278 größer ist.

Bemerkenswert ist weiterhin, daß die Abhängigkeiten der Propulsionskennzahlen von der Geschwindigkeit in beiden Versuchsanstalten gleiche Tendenzen aufweisen.

4.3. Nachstrommessungen

Beide Versuchsanstalten untersuchten auch die nominellen Nachstromverteilungen in der Propellerebene für beide Beladungsfälle. Im BSHC wurden die Nachstromverteilungen mit 5-Loch-Sonden gemessen, in der SVA mit 3-Loch-Kugelsonden. Das heißt, daß im BSHC neben den axialen Geschwindigkeiten auch die tangentialen und radialen Komponenten bestimmt wurden, in der SVA jedoch nur die axialen und tangentialen Komponenten.

Es wurde auf folgenden Radien gemessen:

	r/R				
BSHC	0,35	0,50	0,65	0,85	1,00
SVA	0,32	0,48	0,64	0,80	0,96

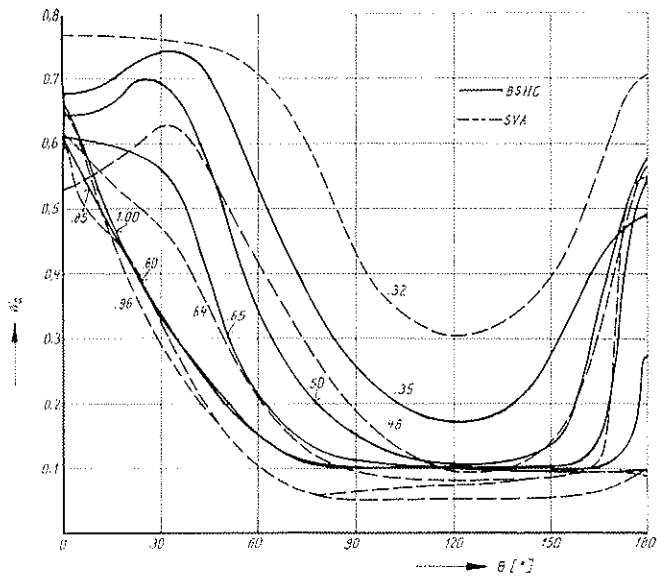


Bild 10. Nomineller axialer Nachstrom, voll beladen

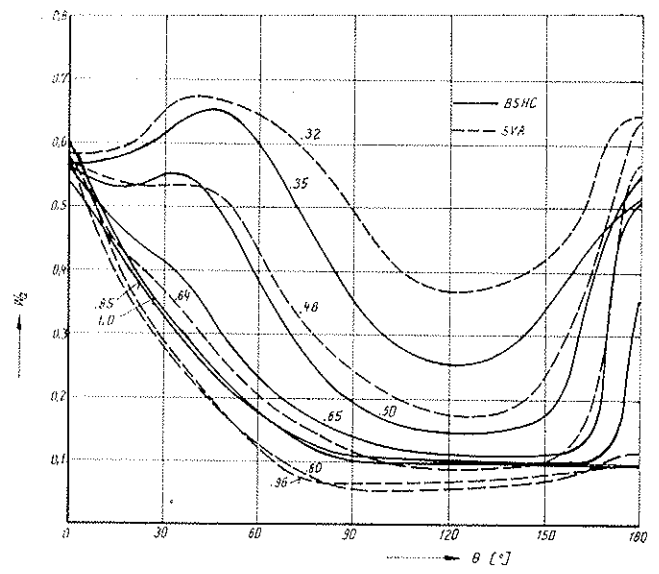


Bild 11. Nomineller axialer Nachstrom, unbeladen

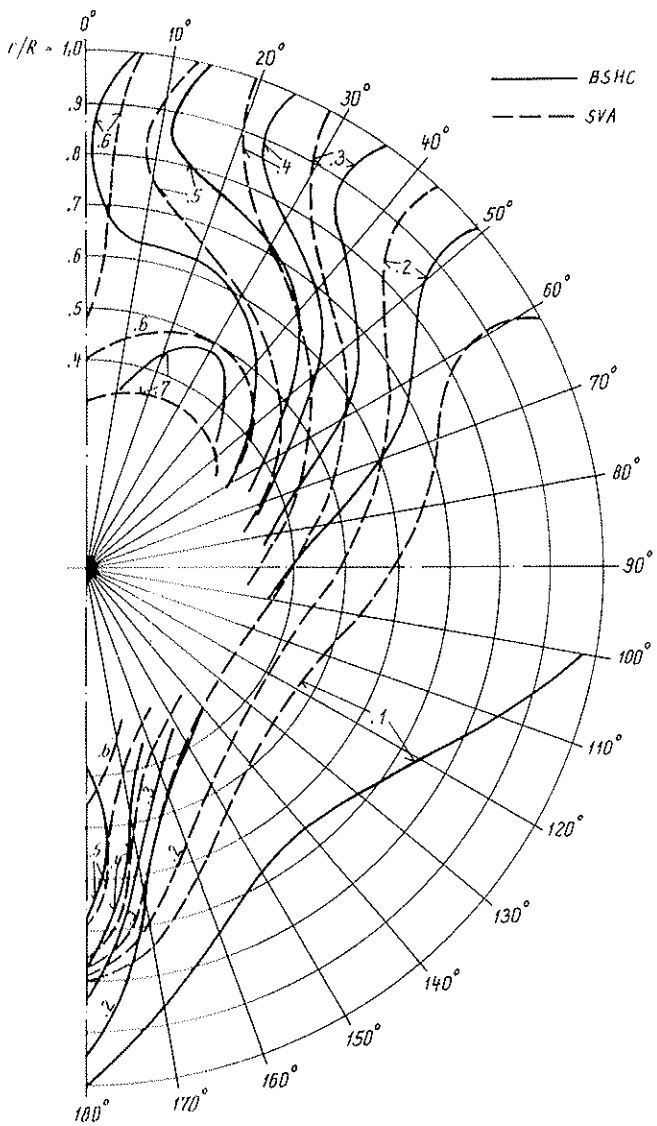


Bild 12. Nachstromisotachen, voll beladen

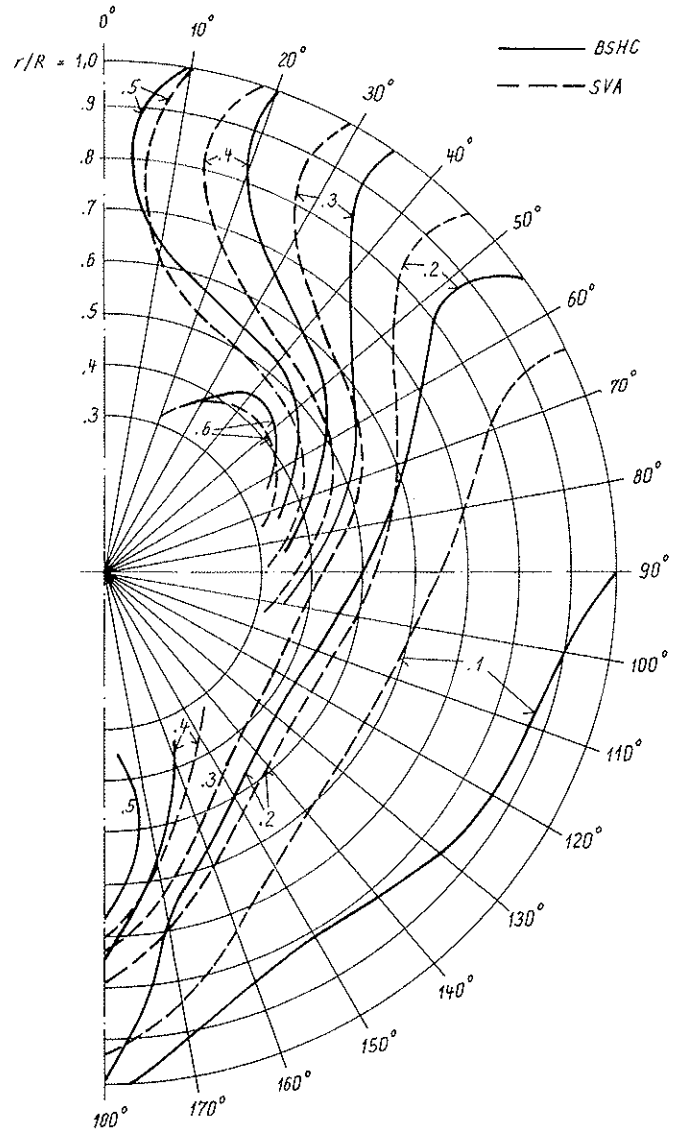


Bild 13. Nachstromisotachen, unbeladen

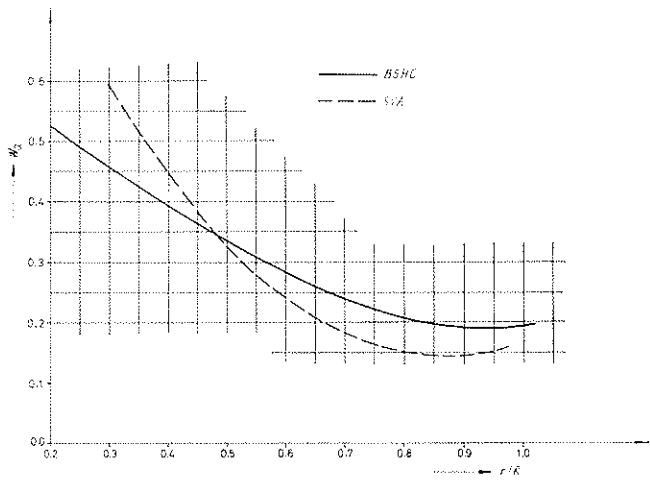


Bild 14. Radiale Verteilung des mittleren axialen Nachstroms, voll beladen

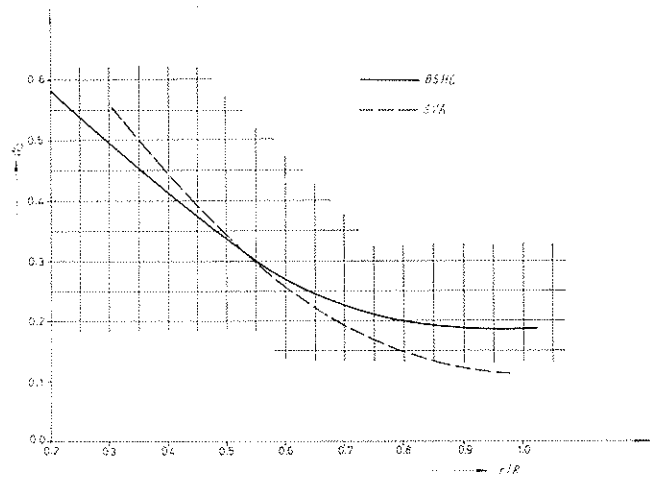


Bild 15. Radiale Verteilung des mittleren axialen Nachstroms, unbeladen

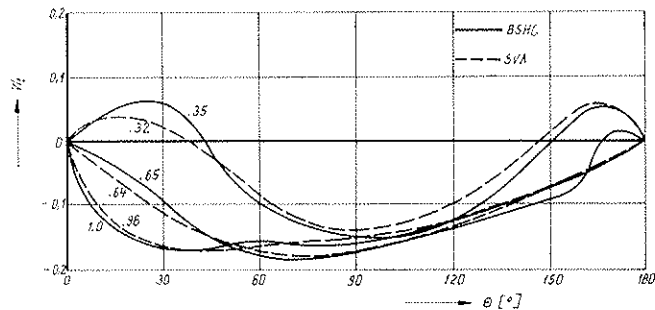


Bild 16. Nomineller tangentialer Nachstrom, voll beladen

Die Meßradien stimmten nicht genau überein, die Meßergebnisse sind jedoch gut miteinander vergleichbar.

In allen nachfolgenden Bildern sind die Ergebnisse der Messungen auf Steuerbord und Backbord gemittelt. Die Bilder 10 und 11 zeigen die Verteilungen des nominellen axialen Nachstroms auf den Meßradien für den voll beladenen und den Ballastzustand. Die üblichen Nachstromisotaechen werden auf den Bildern 12 und 13 gegenübergestellt. Die radiale Verteilung des in Umfangsrichtung gemittelten axialen Nachstroms wird auf den Bildern 14 und 15 dargestellt.

Die Verteilungen des nominellen tangentialen Nachstroms werden für die beiden Beladungsfälle auf den Bildern 16 und 17 gegenübergestellt. Damit die Übersichtlichkeit nicht verlorengeht, werden nur die Verhältnisse auf drei Meßradien dargestellt. Die Vektordarstellungen der transversalen Geschwindigkeitskomponenten in der Propeller-

ebene können nicht miteinander verglichen werden, da in der SVA bei Standardversuchen die radialen Geschwindigkeitskomponenten nicht bestimmt werden.

Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchungen war die Bestimmung der instationären Propellererregung. Die instationären Propellerbelastungen werden durch bestimmte harmonische Koeffizienten der Nachstromverteilungen hervorgerufen. Deshalb sollen auch die radialen Verteilungen der Fourierkoeffizienten der Nachstromverteilungen verglichen werden. Die Bilder 18 und 19 zeigen die \cos -Glieder a_j der Verteilungen des axialen Nachstroms, die Bilder 20 und 21 die \sin -Glieder b_j des tangentialen Nachstroms.

Oggleich die Nachstromverteilungen, die im BSHC und in der SVA gemessen worden sind, ähnlich sind und gleiche

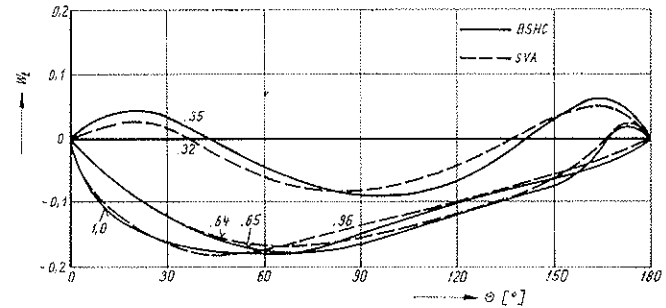


Bild 17. Nomineller tangentialer Nachstrom, unbeladen

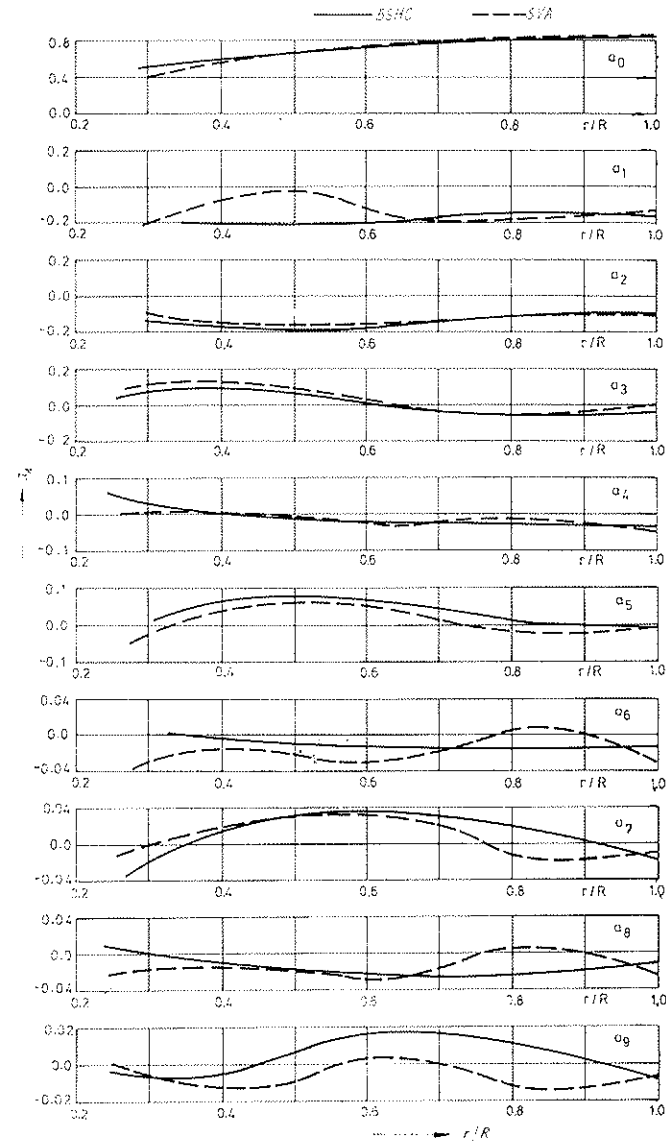


Bild 18. Fourierkoeffizienten des axialen Nachstroms, voll beladen

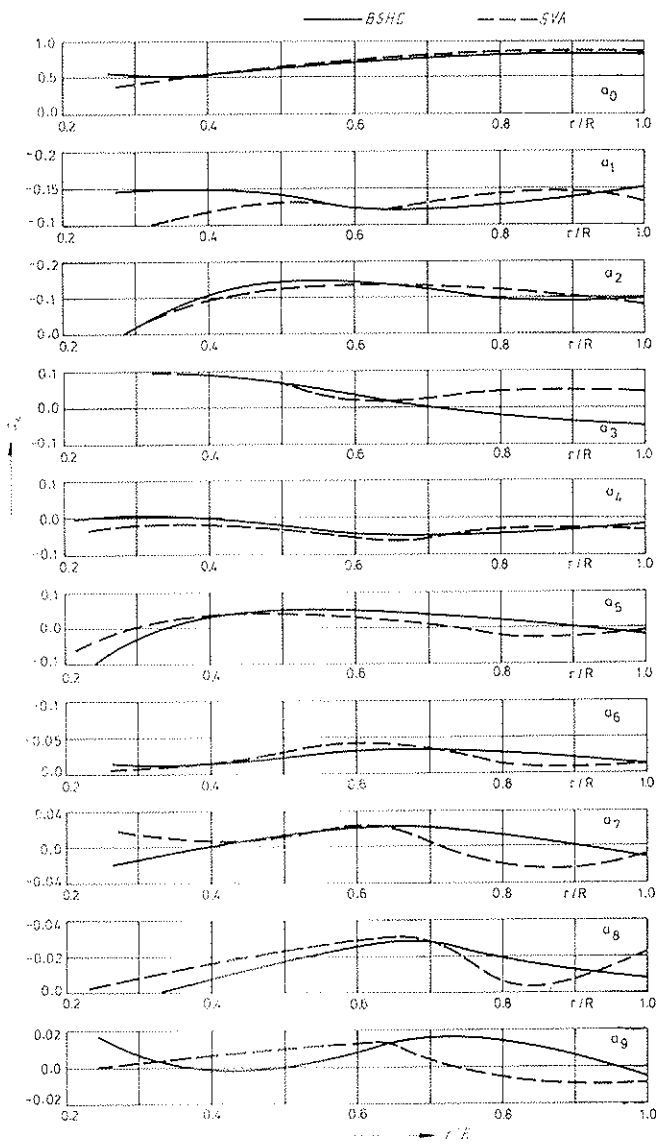


Bild 19. Fourierkoeffizienten des axialen Nachstroms, unbeladen

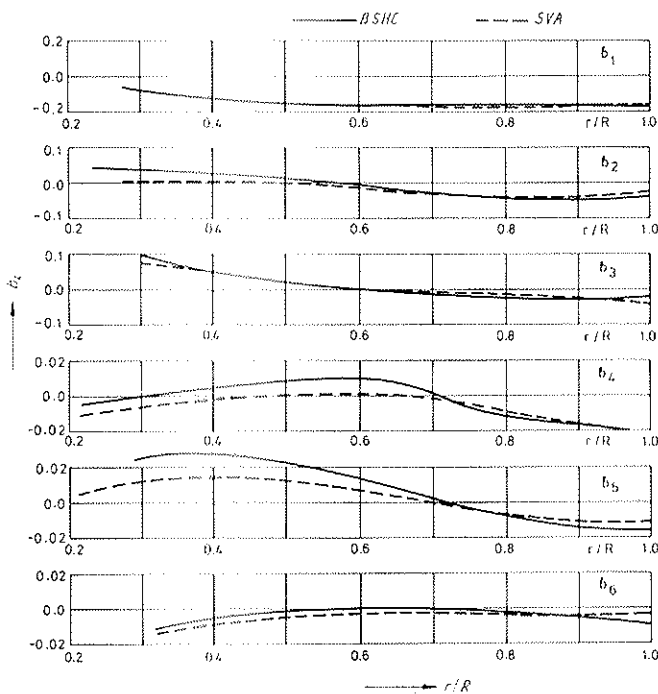


Bild 20. Fourierkoeffizienten des tangentialen Nachstroms, voll beladen

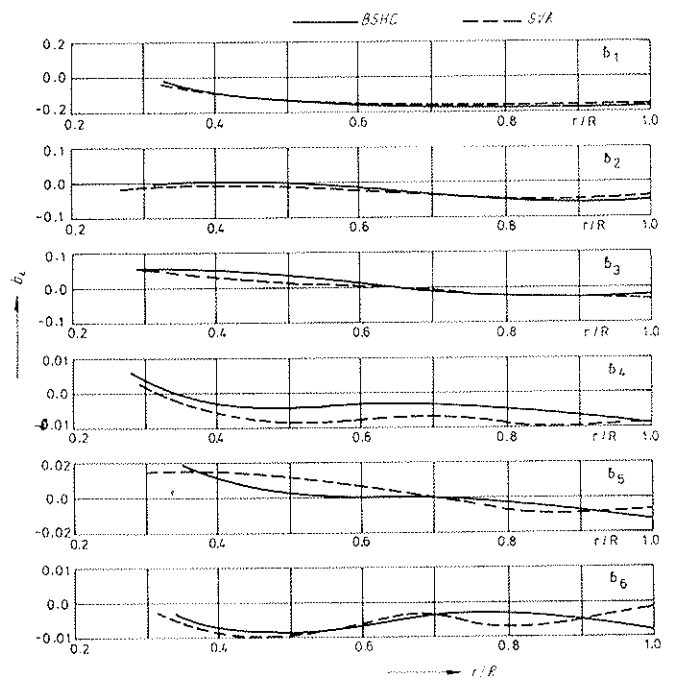


Bild 21. Fourierkoeffizienten des tangentialen Nachstroms, unbeladen

Tendenzen aufweisen, zeigen sich auch einige erhebliche Abweichungen. Die größten Unterschiede treten in den inneren und äußersten Radienbereichen auf. In der SVA wurden auf den inneren Radien größere und auf den äußeren Radien kleinere Nachstromwerte gemessen.

Die auf den inneren Radien gemessenen größeren Nachstromwerte sind darauf zurückzuführen, daß die Stevnuß des SVA-Modells mächtiger ausgebildet wurde, da sie dem Propeller mit dem Nabendurchmesserverhältnis $d_n/D = 0,30$ angepaßt worden ist.

Für die unterschiedlichen Meßergebnisse auf den äußeren Radien gibt es bislang noch keine Erklärung. Ein Maßstabeffekt scheidet aus. Dazu unterscheiden sich die Modellmaßstäbe zu wenig. Außerdem müßte die Tendenz dann entgegengesetzt sein. Auch eventuelle Unterschiede bei der Turbulenzerzeugung als Ursache für die unterschiedlichen Nachstromverteilungen erscheinen unwahrscheinlich. Die Hauptursache scheint in der unterschiedlichen Meßtechnik begründet zu sein. Untersuchungen zur Klärung des Einflusses von Schrägströmungskomponenten und ihrer Berücksichtigung bei der Versuchsauswertung werden noch durchgeführt.

5. Modellversuche zur Bestimmung der instationären Propellerbelastungen

5.1. Gerätesystem des BSHC zur Messung des instationären Schubs und Drehmoments am Propeller

Im BSHC werden die Schwankungen der beiden Komponenten Schub und Drehmoment am Propeller mit einem speziellen instationären Propellerdynamometer gemessen. In dem zigarrenförmigen Gehäuse des Dynamometers mit dem Außendurchmesser von 170 mm befinden sich:

- Meßelemente
- Schwungmasse
- Geber zur Bestimmung der Winkelposition des Propellers.

Schub und Drehmoment am Propeller werden in den Meßelementen in Biegemomente umgewandelt. Die Dehnungen werden in Halbleiter-Dehnungsmessstreifen-Vollbrücken gemessen. Die Positionierung der Meßegeber gewährleistet, daß die übrigen vier Komponenten der Propellerbelastungen die beiden zu messenden Größen nicht beeinflussen.

Durch eine hohe Steifigkeit der elastischen Meßelemente wird eine hohe obere Grenzfrequenz gewährleistet. Die

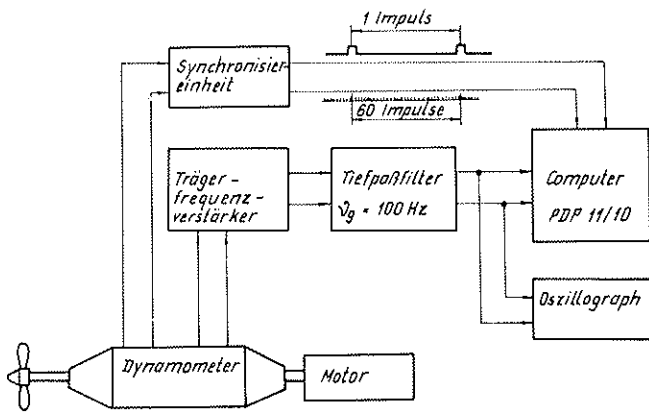


Bild 22. Geräteanordnung für instationäre Messungen im BSHC

Eigenfrequenz lag bei diesen Versuchen bei 1500 Hz (ermittelt durch Anstoßen im Wasser).

Der Propeller besitzt eine konische Bohrung und wird auf den entsprechenden Konus des Dynamometers gezogen. Das Dynamometer und der Antriebsmotor werden im Modell elastisch gelagert.

Das Dynamometer wird statisch geeicht. Dabei wird die Wechselwirkung zwischen den zu messenden Größen untersucht. Entsprechende Eichkurven der Wechselwirkung werden bei der Auswertung berücksichtigt.

Die Anordnung der weiteren Geräte ist aus Bild 22 ersichtlich.

Die Meßsignale werden von Trägerfrequenzverstärkern KWS-6A5 (5 kHz) aufgenommen und verstärkt. Dann werden sie in Niederfrequenzfiltern mit $\nu_g = 100$ Hz gefiltert und in der EDVA PDP 11/10 auf dem Schleppwagen weiterverarbeitet.

Bei einer Meßfahrt werden von 80 Propellerumdrehungen jeweils 60 Werte von Schub und Drehmoment gespeichert. Auf der Rückfahrt des Schleppwagens erfolgt die Auswertung. Diese besteht in der Mittelung der Meßwerte der 80 Umdrehungen, der Sichtbarmachung und Kopierung der Mittelwertkurven auf dem Bildschirmgerät und der Berechnung der Fourierkoeffizienten.

Die endgültige Analyse der vollständigen Aufzeichnung erfolgt in der zentralen EDVA PDP 11/45 nach Abschluß der Modellversuche.

5.2. Gerätesystem der SVA zur Messung des instationären Schubs und Drehmoments am Propellerflügel

Die Messung des instationären Schubs und Drehmoments am Propellerflügel erfolgt mit einer Meßnabe, die auch für die Messung des Verstellmoments am Propellerflügel (unter Verwendung eines Torsionsmeßgliedes) verwendet wird. Diese Meßnabe für vierflügelige Propeller hat am Flügelfuß den Durchmesser $d_n = 75$ mm.

Mit einem Biegestab, der quer durch die Meßnabe verläuft, werden die Biegemomente, die aus der Axialkraft und der Tangentialkraft resultieren, gemessen. Dazu dienen Halbleiter-Dehnungsmeßstreifen-Vollbrücken. Diese sind in Höhe der Propellerachse auf dem Biegestab angeordnet. Dadurch ist das Biegemoment, das aus der Tangentialkraft resultiert, identisch mit dem Drehmoment eines Propellerflügels.

Zur Bestimmung des Schubs eines Propellerflügels aus dem Biegemoment ist noch die Kenntnis des Kraftangriffspunktes notwendig. Der Kraftangriffspunkt kann mit Hilfe der Propellertheorie abgeschätzt werden. Für normale Propeller, bei denen die Steigung an der Flügelspitze nicht reduziert ist (wie bei dem hier verwendeten Propeller VP 3017), kann als Kraftangriffspunkt $r/R = 0,7$ gewählt werden.

Die Eichung der Meßnabe erfolgt statisch im eingebauten Zustand am Modell. Dazu wird der Meßflügel durch einen

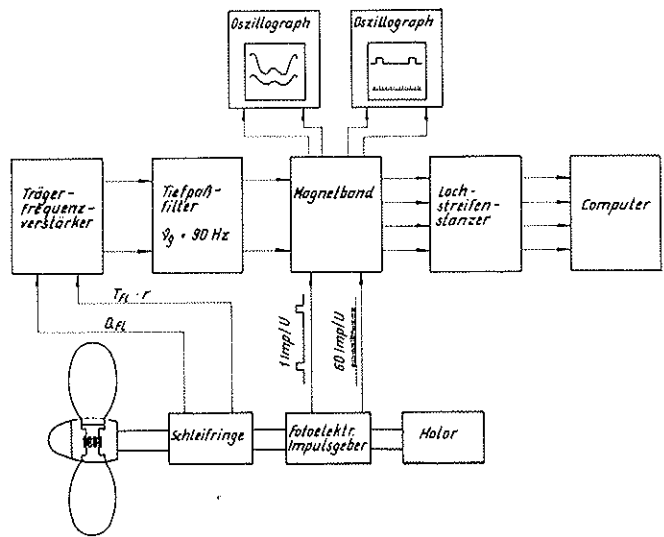


Bild 23. Geräteanordnung für instationäre Messungen in der SVA

Eichstab ersetzt, an dem Kräfte in axialer und tangentialer Richtung mit verschiedenen Hebelarmen angebracht werden. Neben den Eichfaktoren werden auch Einflußfaktoren zur Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung beider Komponenten bestimmt.

Die Eigenfrequenz des Meßgliedes mit Propellerflügel betragen in axialer Richtung $\nu_a = 350$ Hz, in tangentialer Richtung $\nu_t = 400$ Hz.

Die Anordnung der weiteren Meßgeräte zur Meßwert-erfassung und Verarbeitung ist aus Bild 23 ersichtlich.

Die Meßsignale werden von Trägerfrequenzverstärkern aufgenommen und verstärkt, dann in Tiefpaßfiltern mit der Grenzfrequenz $\nu_g = 90$ Hz gefiltert und auf zwei Spuren eines Magnetbandgerätes aufgezeichnet.

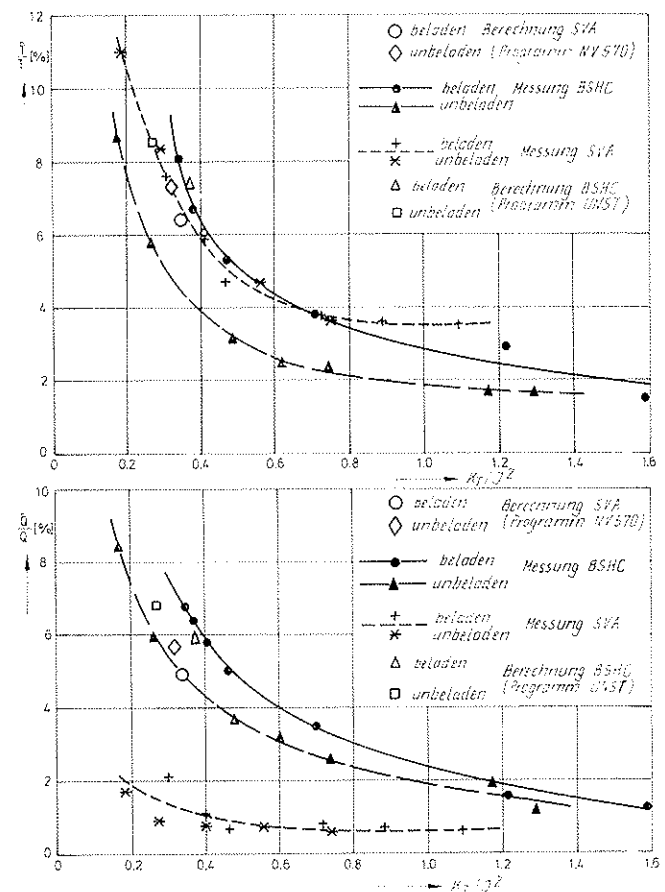


Bild 24. Schubschwankungen am Propeller

Bild 25. Drehmomentschwankungen am Propeller

Tabelle 3. Schub- und Drehmoment-schwankungen

Meßergebnisse des BSHC voll beladen $V' = 1,576 \text{ m/s}$				
$\frac{K_T}{J_{\text{eff}}^2}$	$\frac{\hat{T}_4}{T_0} \cdot 100$	$\hat{\Phi}_T [^\circ]$	$\frac{\hat{Q}_4}{Q_0} \cdot 100$	$\hat{\Phi}_Q [^\circ]$
,346	8,0	- 134	6,8	32
,371	6,6	- 4	6,4	44
,408	6,1	- 141	5,8	49
,462	5,3	5	5,0	55
,701	3,8	11	3,5	58
1,214	2,9	- 92	1,6	120
1,591	1,5	- 82	1,3	- 83
unbeladen $V' = 1,793 \text{ m/s}$				
,171	8,7	- 2	8,5	42
,265	5,8	- 175	6,0	- 132
,486	3,2	- 13	3,7	40
,608	2,5	- 201	3,2	- 139
,748	2,4	- 4	2,6	45
1,173	1,7	1	1,9	46
1,291	1,7	- 77	1,2	- 125
Meßergebnisse der SVA voll beladen $V' = 1,623 \text{ m/s}$				
,307	7,6	20	2,1	140
,393	6,0	60	1,1	-
,462	4,7	353	,7	-
,719	3,8	294	,8	123
,887	3,6	311	,7	130
1,092	3,5	308	,6	72
unbeladen $V' = 1,760 \text{ m/s}$				
,186	11,0	30	1,7	180
,276	8,4	20	,9	120
,399	5,9	346	,8	230
,557	4,7	316	,7	139
,739	3,6	314	,6	131

Zur Steuerung der weiteren Auswertung werden auf zwei weiteren Spuren des Magnetbandgerätes Steuersignale aufgezeichnet. Ein fotoelektrischer Impulsgeber liefert einen Impuls beim Nulldurchgang des Meßflügels und außerdem 60 Impulse je Propellerumdrehung.

Zur weiteren Auswertung werden die Magnetbandaufzeichnungen auf ein Lochband übertragen. Dieses Lochband wird dann in der EDVA weiter verarbeitet, d. h., es werden Fourieranalysen durchgeführt.

5.3. Ergebnisse der Messungen der instationären Propellerbelastungen

Die Modellversuche wurden in beiden Versuchsanstalten jeweils im voll beladenen Zustand und im Ballastzustand durchgeführt. Dabei wurde die Geschwindigkeit konstant gehalten und die Drehzahl variiert, so daß verschiedene Schubbelastungsgrade untersucht wurden.

In der Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Fourieranalyse der Schub- und Drehmomentenschwankungen dargestellt. Die Meßwerte wurden mit den stationären Propellerbelastungen dimensionlos gemacht.

Die Bilder 24 und 25 zeigen die Abhängigkeit der Schub- und Drehmomentenschwankungen von der effektiven Schubbelastung K_T/J_{eff}^2 .

Die im BSHC und in der SVA gemessenen Schubschwankungen zeigen gute Übereinstimmung. Lediglich die Unter-

schiede, die im BSHC für den beladenen und den unbeladenen Zustand gemessen worden sind, konnten durch die Messungen in der SVA nicht nachgewiesen werden. Dagegen zeigen die gemessenen Drehmomentenschwankungen keine Übereinstimmung. Die in der SVA gemessenen Werte betragen nur 25% der im BSHC gemessenen Werte.

6. Berechnung der instationären Propellerbelastungen

Zur Bewertung der unterschiedlichen Ergebnisse der Drehmomentenschwankungsmessungen wurden in beiden Versuchsanstalten Vergleichsrechnungen durchgeführt.

Im BSHC wurden Berechnungen mit dem Programm UNST durchgeführt. Dieses Programm basiert auf der instationären Tragflächentheorie. Es verwendet die Methode der beschleunigten Potentiale. Eine Beschreibung des Verfahrens liegt in [1] vor.

In der SVA wurden Berechnungen mit dem Programm NV 570 durchgeführt. Dieses von DET NORSKE VERITAS entwickelte Programm [2] berechnet nach einer quasistationären Methode die veränderlichen Druckverteilungen auf der Flügeloberfläche und durch Integration die Belastungsschwankungen des Propellers.

Die Berechnungen wurden für den freifahrenden Zustand des Schiffs im beladenen und unbeladenen Zustand durchgeführt. Die Ergebnisse sind in die Bilder 24 und 25 eingezeichnet. Sie bestätigen die Meßergebnisse des BSHC.

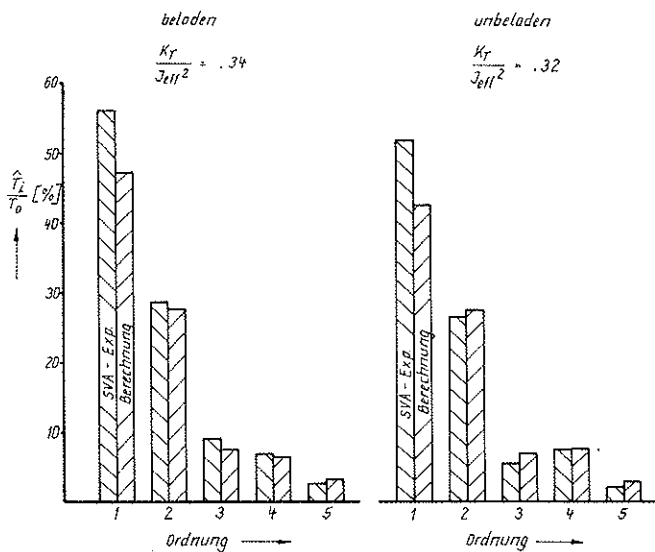


Bild 26. Schubschwankungen am Propellerflügel

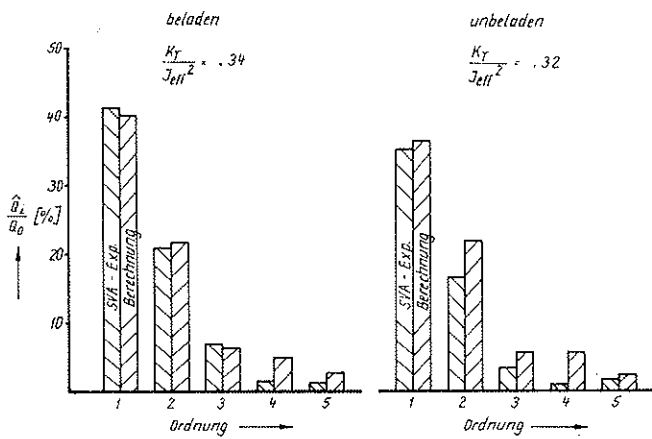


Bild 27. Drehmomentschwankungen am Propellerflügel

Zur Klärung der Ursache der zu niedrigen Meßwerte der Drehmomentschwankungen der SVA wurden auch die anderen Harmonischen der Belastungsschwankungen am Einzelflügel untersucht. Auf den Bildern 26 und 27 werden die Fourierkoeffizienten der Ordnungen 1 bis 5 der Belastungsschwankungen, die in der SVA am Propellerflügel gemessen worden sind, den Ergebnissen der Berechnung mit NV 570 gegenübergestellt. Hier zeigt sich nun ein sehr interessantes Ergebnis. Unter Berücksichtigung der Meßgenauigkeit und der Streubreite bei instationären Messungen zeigt sich zwischen den Ergebnissen von Berechnung und Experiment gute Übereinstimmung. Nur die vierte Ordnung der Drehmomentschwankung stimmt nicht überein. Die gemessenen Drehmomentschwankungen betragen nur 25% der berechneten.

Die Ursache für die zu niedrigen Meßwerte der Drehmomentschwankungen 4. Ordnung dürfte in erzwungenen Drehschwingungen zu suchen sein. Von den verschiedenen Ordnungen der Drehmomentschwankungen am Propellerflügel regt nur die Flügelzahlordnung $i = 4$ den gesamten Propeller bzw. die Wellenleitung zu Drehschwingungen an. Diese erzwungenen Drehschwingungen reduzieren offensichtlich die am Propellerflügel angreifende 4. Ordnung der Belastungsschwankungen. Theoretisch wurde dieses hydrodynamische Problem in [3] beleuchtet.

7. Zusammenfassung

Im Bulgarian Ship Hydrodynamics Centre Varna und in der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam wurden vergleichende Modellversuche in den Schlepprinnen durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit einiger Meßtechniken beider Versuchsanstalten zu testen. Die Versuche wurden mit zwei nach gleichen Linienrissen in annähernd gleichem Maßstab gefertigten Modellen eines 12800-tdw-Multiflexschiffes durchgeführt.

Eingangs wurden die Ergebnisse von Standardmodellversuchen vorgestellt. Im allgemeinen wurde hier Übereinstimmung erzielt. Einige kleine Abweichungen wurden bei den Nachstrommessungen registriert. Diese resultieren vermutlich aus der unterschiedlichen Meß- bzw. Auswertetechnik.

Den Schwerpunkt der wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit bildeten vergleichende instationäre Messungen der Propellerkräfte und -momente. Im BSHC wurden die Schub- und Momentenschwankungen des gesamten Propellers mit einem instationären Propellerdynamometer gemessen. In der SVA wurden die Belastungsschwankungen am Propellerflügel mit einer instationären Meßnabe gemessen und aus den Meßergebnissen die Belastungsschwankungen des gesamten Propellers berechnet.

Während bei den Messungen der Schubschwankungen gute Übereinstimmung erzielt wurde, stimmten die Ergebnisse der Momentenmessungen nicht überein. Zur Klärung dieser Unterschiede wurden Vergleichsrechnungen durchgeführt. Einiges deutet darauf hin, daß mit der instationären Meßnabe der SVA zu niedrige Drehmomentschwankungen ermittelt werden. Die Ursache hierfür können Drehschwingungen des Propellers sein. Eine Verbesserung des Meßsystems der SVA ist dann durch eine steifere Propellerwelle und durch Verwendung von Schwungmassen möglich.

8. Literatur

- [1] Baimov, A., Gerchev, G.: Calculation of periodic loading on a propeller in non-uniform flow. Proc. Jub. Scient. Session of BSHC, Vol. 3, Varna 1981
- [2] Pettersen, B. E.: NV 570 - User's manual. Excitation forces from a cavitating marine propeller. D n V Report No. 74 - 40 M (1974).
- [3] Lerbs, H. W., Schwanecke, H.: Beeinflussung der hydrodynamischen Erregerlasten eines Propellers durch Längs- und Drehschwingungen. Schiffstechnik, 14 (1967) 72.