

Ergebnisse bei der Anwendung von Berechnungen und Experimenten zur Entwicklung von Propellern mit guten Gebrauchseigenschaften

Dr. sc. techn. Klaus Wagner, VEB Dieselmotorenwerk Rostock

Dr.-Ing. Manfred Mehmel, VEB Kombinat Schiffbau, Direktorat Forschung und Erzeugnisentwicklung

1. Einleitung

Während in der Vergangenheit die meisten Schiffstypen zu höheren Geschwindigkeiten, größeren Abmessungen und damit höheren Wellenleistungen tendierten, ergeben sich heute unter der Berücksichtigung der steigenden Material- und Betriebskosten verstärkte Tendenzen zum Leichtbau und zur Brennstoffeinsparung.

In beiden Fällen spielen die Propulsionsaspekte eine nicht unwesentliche Rolle, weil sie einen direkten Einfluß auf die Betriebskosten und auf die Arbeits- und Lebensbedingungen an Bord haben.

Bezüglich des Propellers wurde dem letztgenannten Problem wachsende Aufmerksamkeit geschenkt, da sowohl mit zunehmender Schiffsgröße als auch mit höherer Schiffs geschwindigkeit die vom Propeller abgestrahlte spezifische Druckenergie ansteigt.

Gleichzeitig steigt die Gefahr der Propellerkavitation, die, wie festgestellt wurde, die propellererregten Druckschwankungen erheblich vergrößert.

Aber auch der Leichtbau und die Tendenz zu Schiffen mit größeren Propellerdurchmessern werfen ähnliche Probleme auf, da durch den Leichtbau die Schwingungsanfälligkeit wächst und die großen Propeller zwangsläufig einen kleineren Freischlag bedingen.

Die hydrodynamischen Erregerkräfte können in Propeller- und Schiffsaußenhautkräfte unterteilt werden. Die Propellerkräfte werden auf die Stevenrohlager und die Antriebseinheit übertragen. Die Außenhautkräfte werden durch Druckschwankungen auf den Außenplatten im Bereich des Propellers verursacht. Das Ziel eines modernen Propellerentwurfs besteht nun darin, den Propeller energetisch und erregerseitig optimal auszuliegen.

Der VEB Dieselmotorenwerk Rostock als zentraler Hersteller von Propelleranlagen in der DDR verfügt über ein EDV-Programmpaket [1], welches die Arbeiten vom Entwurf bis zur Erstellung der Lochstreifen für die numerisch gesteuerte Fräsmaschine umfaßt. Jede Entwurfsmethodik bedarf aber der Überprüfung durch das Experiment, bevor sie in die Praxis eingehen kann. Die erforderlichen Experimente mit Propellermodellen werden in der Schiffbauversuchsanstalt des VEB Kombinat Schiffbau in Potsdam durchgeführt.

In der vorliegenden Veröffentlichung wird über die Anwendung verschiedener Entwurfsmethoden und den Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen bezüglich des Kavitationsverhaltens und der propellererregten Druckimpulse berichtet, wobei für die Druckimpulsberechnung das Det Norske Veritas Programm NV 570 [2] verwendet wurde.

2. Anwendung verschiedener Entwurfsmethoden und Darstellung der untersuchten Propellervarianten

Beim Propellerentwurf werden folgende Zielstellungen verfolgt:

- Erzeugung eines gegebenen Schubes bzw. Verarbeitung einer gegebenen Leistung bei einem bestimmten Betriebszustand des Schiffes

- Gewährleistung eines hohen Wirkungsgrades der Umsetzung der Antriebsleistung der Maschinenanlage in Vortriebsleistung des Schiffes
- Sicherung guter Kavitationseigenschaften und dadurch Abstrahlung geringer auf die Schiffsaußenhaut wirkender Druckimpulse sowie Vermeidung von Kavitationserosion am Propeller selbst
- Erzeugung möglichst geringer über die Wellenleitung in die Antriebsanlage und das Schiff eingeleiteter Propellerwechselkräfte und -momente

Es sind zunächst 2 Hauptmöglichkeiten des Propellerentwurfes zu unterscheiden:

- Auswahl der geometrischen Propellerparameter aus systematischen Modellpropellerserien (z. B. Wagninger-B-Serie [3], AU-Serie [4])
- Berechnung der geometrischen Propellerparameter mit Hilfe theoretisch begründeter Verfahren (z. B. nach der Wirbeltheorie [5])

Während im ersten Fall bewährte Propellerbasisformen nach geometrischen Prinzipien variiert werden, wobei die hydrodynamischen Auswirkungen dieser Variationen aus den Modellversuchen zu ermitteln sind, kann im zweiten Fall von hydrodynamischen Gesichtspunkten ausgegangen werden, deren Verwirklichung direkt in die geometrische Gestaltung der Propeller eingeht.

Zur Auswahl eines Propellers für vorgegebene Entwurfsbedingungen aus systematischen Serien brauchen keine weiteren Erläuterungen gegeben zu werden.

Die Treffsicherheit dieser Verfahrensweise hinsichtlich der Realisierung des Entwurfsbetriebszustandes ist recht hoch, die Kavitationseigenschaften derart ausgewählter Propeller sind jedoch wegen der Einhaltung geometrischer Ähnlichkeitsbedingungen innerhalb der Serie nur bedingt beeinflussbar.

Beim Entwurf von Propellern nach wirbeltheoretischen Verfahren ist es möglich, sowohl durch die Variation der radialen Belastungsverteilung der Propellerflügel als auch durch die zweckmäßige Anpassung der geometrischen Blattschnittparameter, insbesondere des Verhältnisses von Profilwölbung und -anstellung, die Kavitationseigenschaften der Propeller in freifahrendem Zustand und im inhomogenen Nachstrom des Schiffes gezielt zu beeinflussen. Die hierbei im VEB Dieselmotorenwerk Rostock angewendeten Prinzipien und Verfahren sind in [6] dargelegt. Diese Verfahren basieren auf der Theorie der tragenden Linie mit Korrekturen für den Effekt der tragenden Fläche.

Wirbeltheoretische Verfahren bieten auch gute Möglichkeiten, durch besondere Flügelumrißformen auf die Propellereigenschaften Einfluß zu nehmen. Auf die letztgenannte Möglichkeit wird in der vorliegenden Arbeit noch nicht eingegangen.

Für die durchzuführenden Vergleiche wurden Propellervarianten für 2 Schiffstypen entworfen und zwar für ein schnelles Frachtschiff (Propeller P 1190, P 1191, P 1192 und P 1196) und für ein Massengutfrachtschiff (Propeller VP 4005 und VP 4008).

Als Entwurfsbedingungen lagen für jedes dieser Schiffe folgende Daten vor:

Propellerdurchmesser und -flügelzahl, Propellerschub, Propellerdrehzahl, Schiffsgeschwindigkeit, mittlere effektive Nachstromziffer, Tauchtiefe der Propellerwelle, Propellerwerkstoff, Klassifikationsvorschrift und Eis-kategorie.

Weiterhin war für jedes dieser Schiffe das am Modell in der Propellerebene aufgemessene nominelle Nachstromfeld bekannt.

2.1. Propellervarianten für ein schnelles Frachtschiff

Für den Propeller des schnellen Frachtschiffes galten folgende dimensionslose Werte für den Entwurfspunkt:

Schubbeiwert	$K_T^* = 0,170$
Fortschrittsgrad	$J^* = 0,639$
Kavitationszahl	$\sigma_n^* = 1,989$

Folgende Entwurfsvarianten wurden ausgearbeitet:

2.1.1. Propeller P 1190

Es handelt sich um eine Auswahl nach systematischen Seriendiagrammen der Wageningen-B-Serie [3].

Der radiale Dickenverlauf wurde entsprechend der anzuwendenden Bauvorschrift abweichend vom linearen Verlauf der Serienpropeller bestimmt.

Das Flächenverhältnis wurde nach den in der Werftpraxis gebräuchlichen Grenzkurven von *Burrit-van Manen* [7] bestimmt.

Es wurden die für die Wageningen-Serien-Propeller gültigen Troost-Profile verwendet. Eine Steigungskorrektur wegen der geänderten Profildicken und der dickeren Nabe erwies sich als nicht erforderlich, da sich beide Einflüsse etwa aufheben.

2.1.2. Propeller P 1191

Dieser Propeller ist ein sogenannter „nachstromangepaßter“ Propeller, d. h., er ist nach der Theorie der tragenden Linie für eine radial veränderliche Nachstromverteilung (rotationssymmetrische Anströmung) als Propeller geringsten Energieverlustes nach *Lerbs-van Manen* [8] entworfen.

Das Optimierungskriterium ist

$$\tan \beta_i = \frac{\tan \beta}{\text{Konst.}} \cdot \left(\frac{1 - \bar{w}}{1 - w(x)} \right)^{1/2}$$

Die nominelle Nachstromverteilung $w(x)$ wurde aus der Aufmessung am Modell gewonnen, wobei eine Korrektur auf ein dem mittleren effektiven Nachstrom entsprechendes Volumenmittel \bar{w} vorgenommen wurde.

Es wurden die Mittelwertfaktoren nach *Tachmindji-Milam* [9] und die Korrekturen für die tragende Fläche nach *Morgan-Silović-Denny* [10] angewendet. Die induzierte Stromlinienkrümmung wurde zu 35% in der Profilwölbung, zu 65% als Steigungskorrektur berücksichtigt.

Als nominelle Kavitationssicherheit

$$S = 1 - |C_{p\min}|/\sigma_x$$

(Sicherheit gegen Blasen kavitation bei stoßfreier Anströmung) wurden 20% für die Blattsschnitte $x \geq 0,7$ vorgegeben.

Wie bei allen folgenden Propellern wurden Profile mit der NACA-Mittellinie $a = 0,8$ und einer modifizierten Dickenverteilung nach NACA 16 angewendet.

2.1.3. Propeller P 1192

Dieser Propeller ist nach der Theorie der tragenden Linie für homogene Zuströmung (freifahrend) als Propeller geringsten Energieverlustes nach *Betz* [11], d. h. für die sogenannte „optimale“ Zirkulationsverteilung entworfen.

Das Optimierungskriterium ist

$$\tan \beta_i = \frac{\tan \beta}{\text{Konst.}}$$

Es wurden wiederum die Mittelwertfaktoren nach [9] und die Korrekturen für die tragende Fläche nach [10] angewendet. Die induzierte Stromlinienkrümmung wurde zu 35% in der Profilwölbung und zu 65% als zusätzliche Steigung berücksichtigt.

Als nominelle Kavitationssicherheit wurden 20% für die Blattsschnitte $x \geq 0,7$ vorgegeben.

2.1.4. Propeller P. 1196

Dieser Propeller wurde nach der Traglinientheorie für eine vorgegebene, zur Flügelsspitze reduzierte radiale Zirkulationsverteilung mit Hilfe der Induktionsfaktoren-methode entworfen.

Als Zirkulationsverteilung wurde vorgegeben:

$$\Gamma(x) = \Gamma(0,6) \cdot \sin \psi$$

$$\text{mit } \psi = \pi \cdot \frac{x - x_N}{1 - x_N} \quad \text{für } x_N \leq x \leq 0,6$$

$$\text{und } \psi = \arccos \frac{1/2 \cdot (1 + x_N) - x}{1/2 \cdot (1 - x_N)} \quad \text{für } 0,6 \leq x \leq 1,0$$

Es wurden die Induktionsfaktoren nach *Lerbs* [12] zugrunde gelegt.

Für die Effekte der tragenden Fläche wurden auch hier die Korrekturen nach [10] angewendet. Die induzierte Stromlinienkrümmung wurde voll in der Profilwölbung berücksichtigt, d. h. der Propeller wurde für stoßfreie Anströmung beim Entwurfsfortschrittsgrad entworfen.

Als nominelle Kavitationssicherheit (Sicherheit gegen Blasen kavitation) wurden 20% für die Blattsschnitte $x \geq 0,7$ vorgegeben.

Die Blattsschnittparameter der 4 Propellervarianten für das schnelle Frachtschiff sind in Bild 1 gegenübergestellt.

2.2. Propellervarianten für ein Massengutschiff

Für die Propeller des Massengutschiffes galten folgende dimensionslose Werte für den Entwurfspunkt:

Schubbeiwert	$K_T^* = 0,169$
Fortschrittsgrad	$J^* = 0,474$
Kavitationszahl	$\sigma_n^* = 2,094$

Folgende Entwurfsvarianten wurden ausgearbeitet:

2.2.1. Propeller VP 4005

Dieser Propeller ist nach der Theorie der tragenden Linie für eine radial veränderliche Nachstromverteilung als Propeller geringsten Energieverlustes nach *Lerbs-van Manen*, also entsprechend dem Propeller P 1191, entworfen. Es wurden wiederum die Mittelwertfaktoren nach [9] und die Korrekturen für die tragende Fläche [10] angewendet. Die induzierte Stromlinienkrümmung wurde an der Nabe voll als Wölbungskorrektur, auf 0,95 R zu 65% als Steigungskorrektur und zu 35% als Wölbungskorrektur berücksichtigt.

Als nominelle Kavitationssicherheit (bei stoßfreier Anströmung) wurden 40% für die Blattsschnitte $x \geq 0,7$ vorgegeben.

2.2.2. Propeller 4018

Dieser Propeller wurde, wie auch der Propeller P 1196, nach der Traglinientheorie für eine vorgegebene radiale Zirkulationsverteilung mit Hilfe der Induktionsfaktoren-methode entworfen.

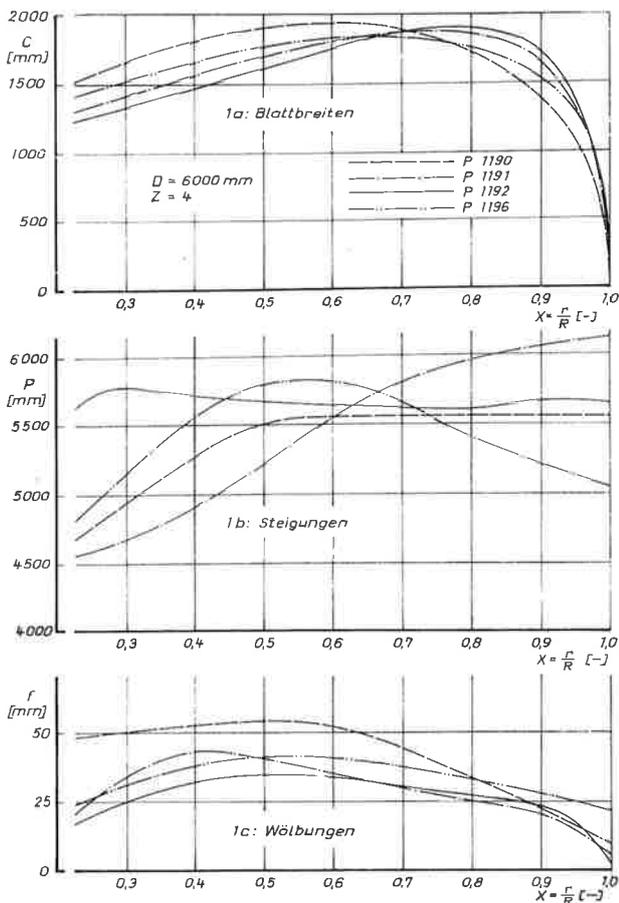


Bild 1. Vergleich geometrischer Parameter für die Propeller eines schnellen Frachtschiffes

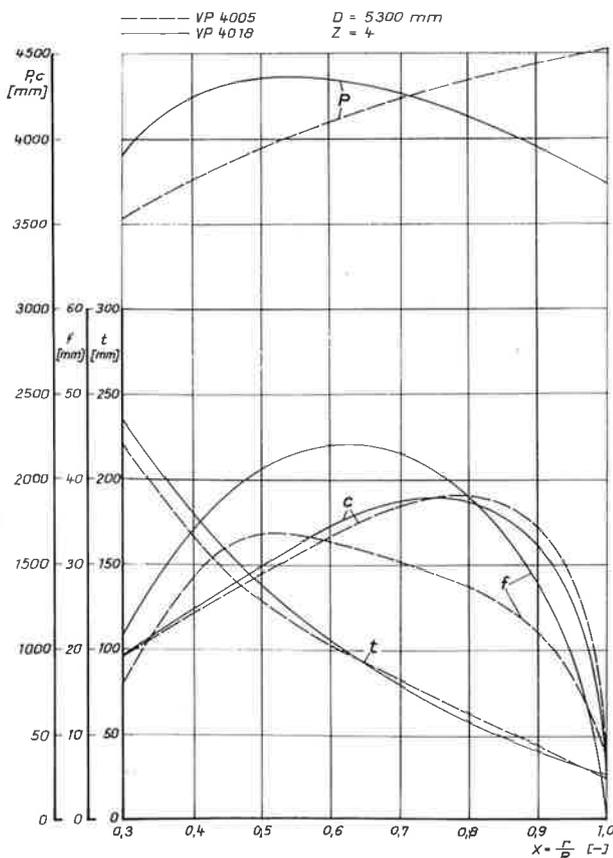


Bild 2. Vergleich geometrischer Parameter für die Propeller eines Massengutschiffes

Es wurde eine nach vorliegenden Erfahrungen als zweckmäßig einzuschätzende radiale Belastungsverteilung mit mäßiger Spitzenentlastung (18% gegenüber der optimalen Verteilung für den Blattschnitt 0,95 R) realisiert. Es wurden die Induktionsfaktoren nach *Lerbs* [12] zugrunde gelegt.

Für die Effekte der tragenden Fläche wurden auch hier die Korrekturen nach [10] angewendet. Das Flächenverhältnis wurde wie beim Propeller VP 4005 für eine Mindestsicherheit gegen Blasen kavitation von 40% ausgelegt.

Im Unterschied zum Propeller P 1196 wurde die Steigungs-Wölbungs-Aufteilung der Blattschnitte unter Berücksichtigung des am Modell aufgemessenen axialen und tangentialen Nachstromfeldes so festgelegt, daß die kavitationsfreien Arbeitsbereiche der Blattschnitte optimal mit den quasistationären Arbeitsbereichen im Nachstromfeld harmonisieren [6].

Im vorliegenden Fall bedeutete das, daß die Profilwölbung an der Flügelwurzel gegenüber der für stofffreie Anströmung erforderlichen noch erhöht und die Steigung entsprechend herabgesetzt werden mußte, während beim Blattschnitt 0,95 R der induzierten Stromlinienkrümmung zu 30% als Steigerungserhöhung und zu 70% als Wölbungskorrektur Rechnung getragen werden mußte. Die Verteilung des Aufteilungsparameters

$$A = 1 - \frac{\Delta f/c}{(f/c)_{\text{ind}}}$$

zwischen Flügelwurzel und -spitze wurde linear angenommen.

Mit der gewählten Verteilung $A(x)$ war ein Arbeiten des Propellers im Nachstromfeld ohne Druckseitenschichtkavitation und mit minimaler Saugseitenschichtkavitation zu erwarten.

Als Profiltyp wurde wiederum eine modifizierte NACA 16-Dickenverteilung mit der Mittellinie $a = 0,8$ eingesetzt.

Die Blattschnittparameter der Propeller für das Massengutschiff sind in Bild 2 zusammengestellt.

3. Gegenüberstellung rechnerischer Voraussagen für das Kavitationsverhalten der Propellervarianten mit Ergebnissen der Kavitationsversuche

3.1. Rechnerische Kavitationskriterien und ihre experimentelle Überprüfung

Rechnerische Voraussagen über das Kavitationsverhalten von Propellern für den Freifahrtzustand und auch für die Arbeit in einem inhomogenen Nachstromfeld werden im VEB Dieselmotorenwerk Rostock auf der Grundlage von Druckminimalkurven $C_{p\text{min}} = f(x, J)$ gemacht. Die diesen Druckminimalkurven zugrunde liegenden vereinfachenden Annahmen und die angewendeten Berechnungsverfahren sind in [6] genauer dargelegt.

Die Druckminimalkurven für die Propeller P 1190, P 1192, P 1196, VP 4005 und VP 4018 sind in den Bildern 3 bis 7 dargestellt. In diesen Diagrammen sind die für den jeweiligen Schiffstyp aus dem Modellnachstromfeld ermittelten quasistationären Arbeitsbereiche der Blattschnitte auf den Kurven $\sigma_x = f(x, J)$ für Entwurfskavitationszahl markiert.

Bei Anwendung des vereinfachenden Kriteriums, daß Kavitation dann eintritt, wenn

$$\sigma_x(x, J) \leq |C_{p\text{min}}(x, J)|$$

läßt sich das Auftreten von Kavitation im Nachstromfeld sofort aus diesen Darstellungen erkennen.

Bild 5. Druckminimalkurven für Propeller P 1196

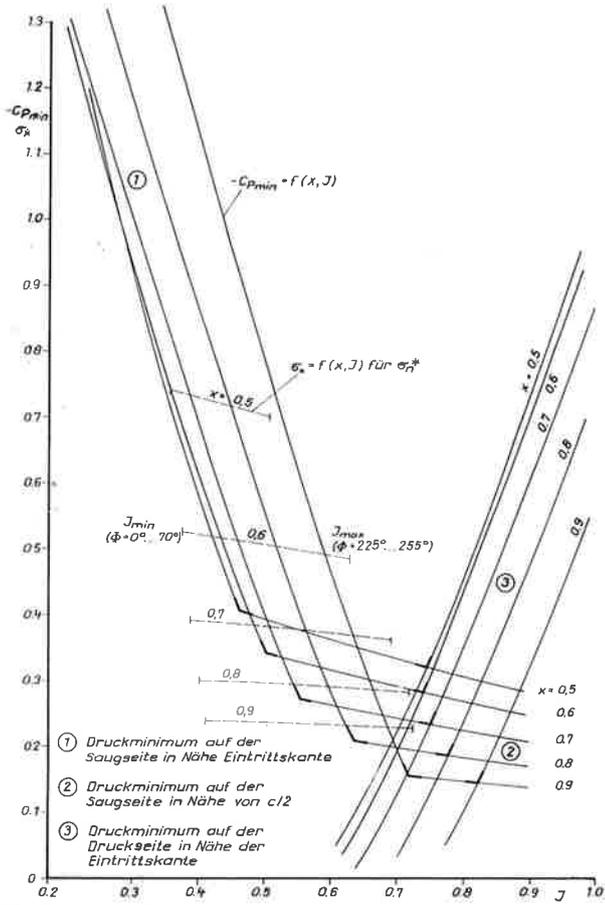


Bild 3. Druckminimalkurven für Propeller P 1190

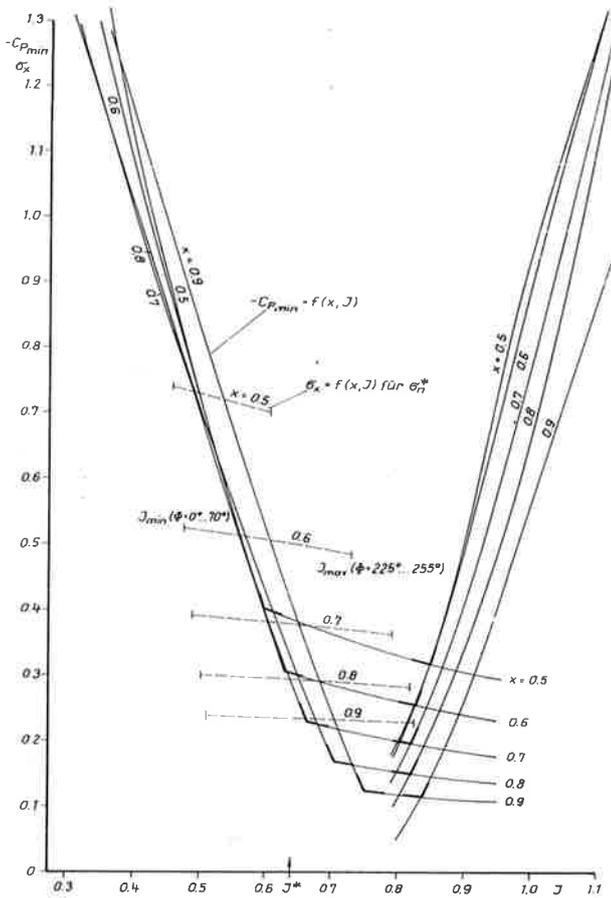
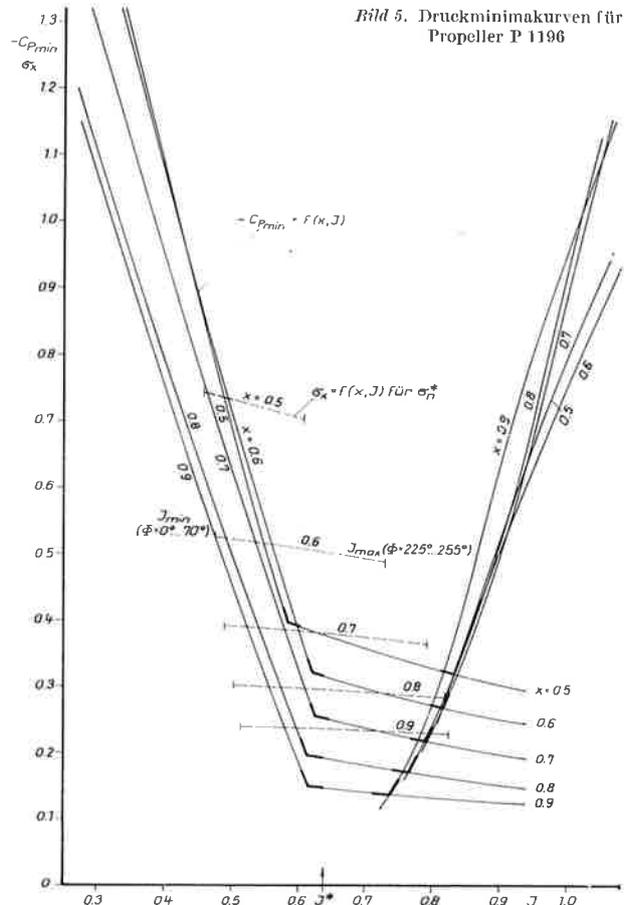


Bild 4. Druckminimalkurven für Propeller P 1192

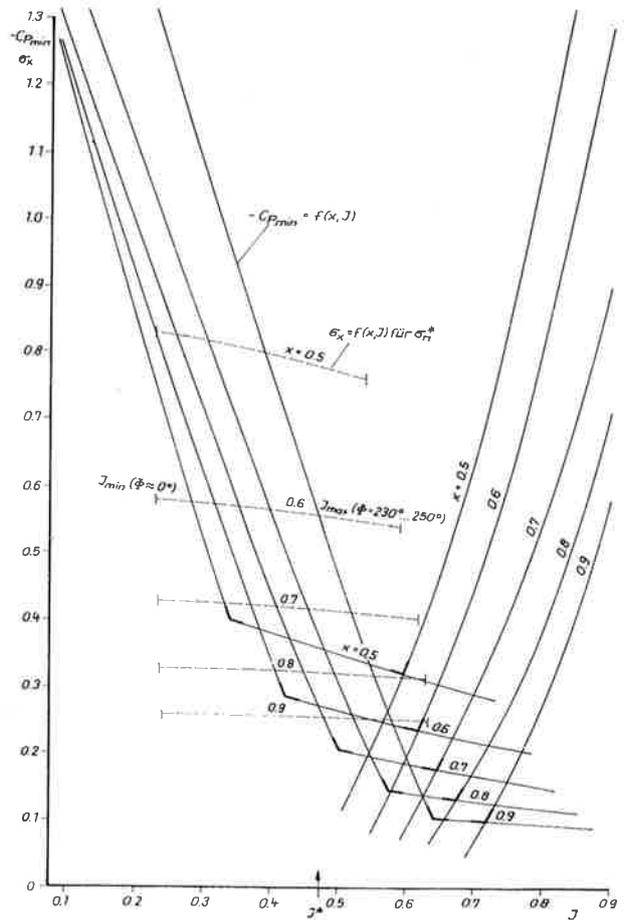


Bild 6. Druckminimalkurven für Propeller VP 4005

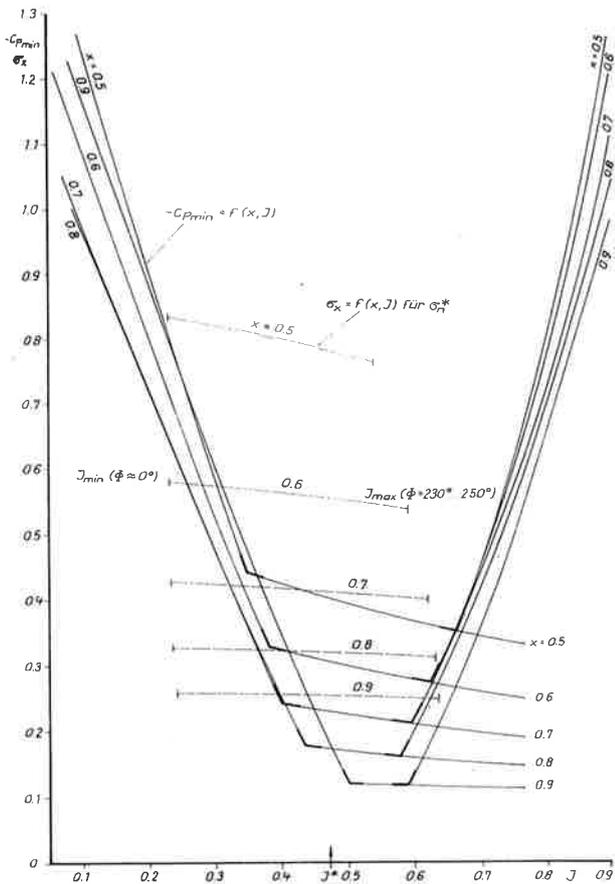


Bild 7. Druckminimalkurven für Propeller VP 4018

Beispielsweise läßt sich aus Bild 3 ablesen, daß beim Wageningen Serienpropeller im Nachstromfeld des schnellen Frachtschiffes bei Entwurfskavitationszahl beim oberen Stevendurchgang im Bereich ab 0,7 R nach außen Saugseitenschichtkavitation erwartet werden muß und daß der Blattmittbereich x ca. 0,8 im Gebiet minimalen Nachstroms hart an der Grenze beginnender Druckseitenschichtkavitation liegt.

Diese Voraussage wird durch den Modellversuch im simulierten Nachstromfeld [13] recht gut bestätigt, wie Bild 8 zeigt.

Als Zusammenfassung der Druckminimadiagramme können die rechnerischen Kavitationsgrenzen $\sigma_{n\text{krit}} =$

$f(J)$ der freifahrenden Propeller ermittelt werden, indem die für jede der 3 Kavitationsarten Saugseitenschichtkavitation, Saugseitenblasenkavitation bzw. Druckseitenschichtkavitation gültigen Äste der Druckminimalkurven des jeweils kritischen Blattschnitts herausgezogen werden. Als kritisch wird derjenige Blattschnitt bezeichnet, bei dem die Kavitationserscheinungen bei gegebener Kavitationszahl σ_n zuerst auftreten.

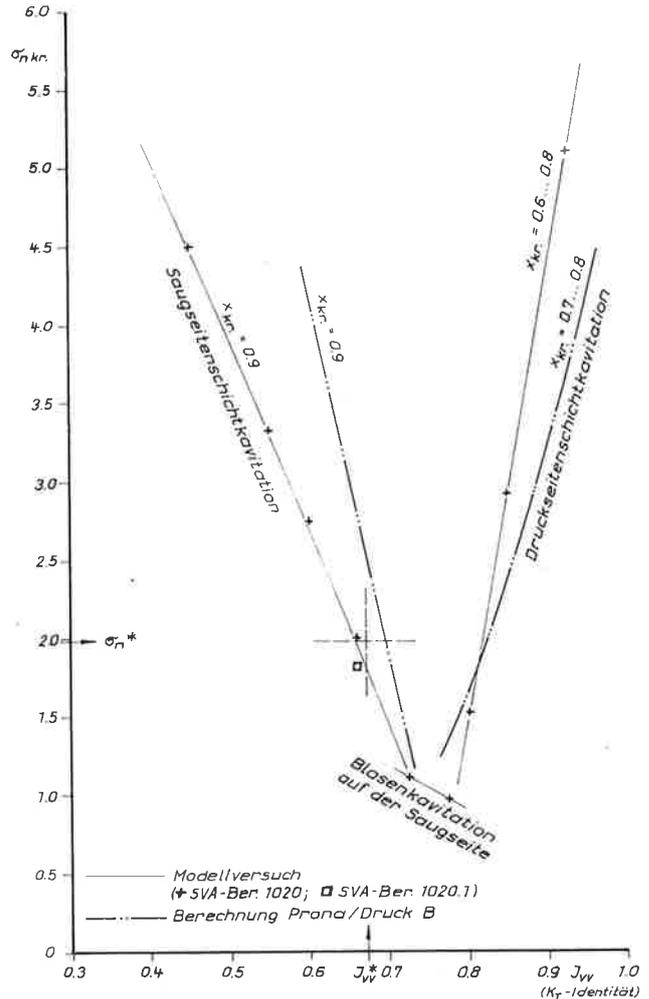


Bild 9. Vergleich von Kavitationsgrenzkurven für Propeller P 1190 nach Rechnung und Experiment

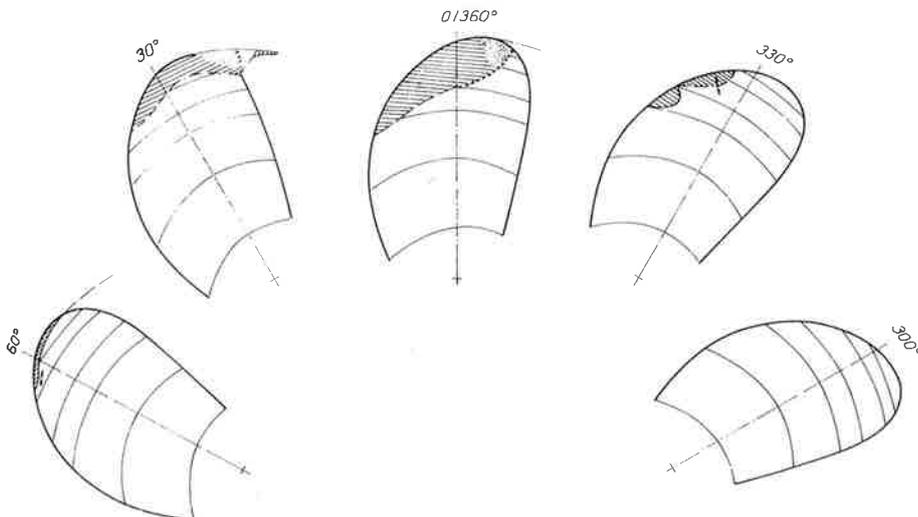


Bild 8. Kavitation im simulierten Nachstromfeld am Propeller P 1190

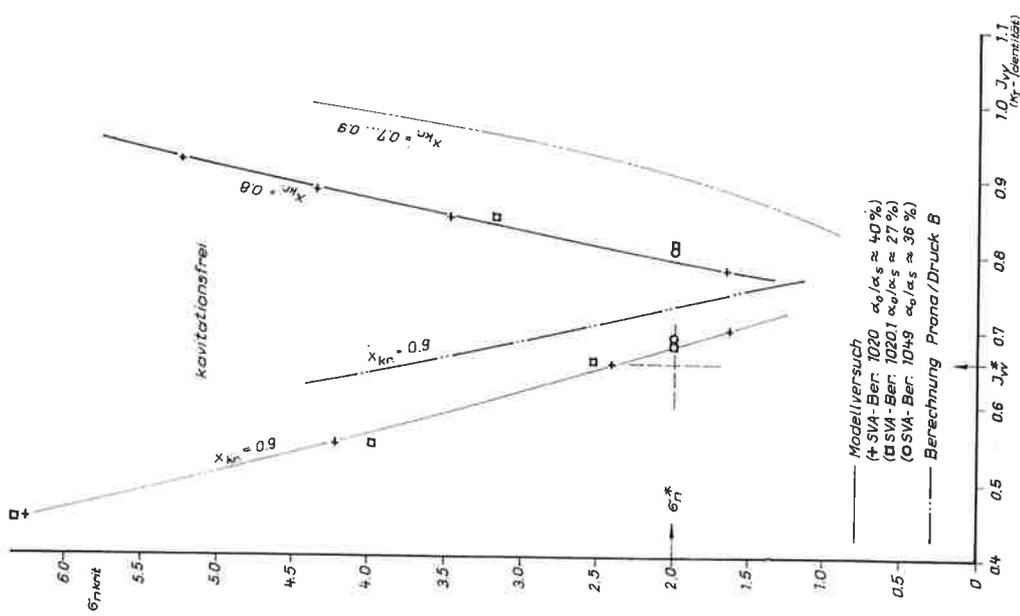


Bild 10. Vergleich von Kavitationsgrenzkurven für Propeller P 1192 nach Rechnung und Experiment

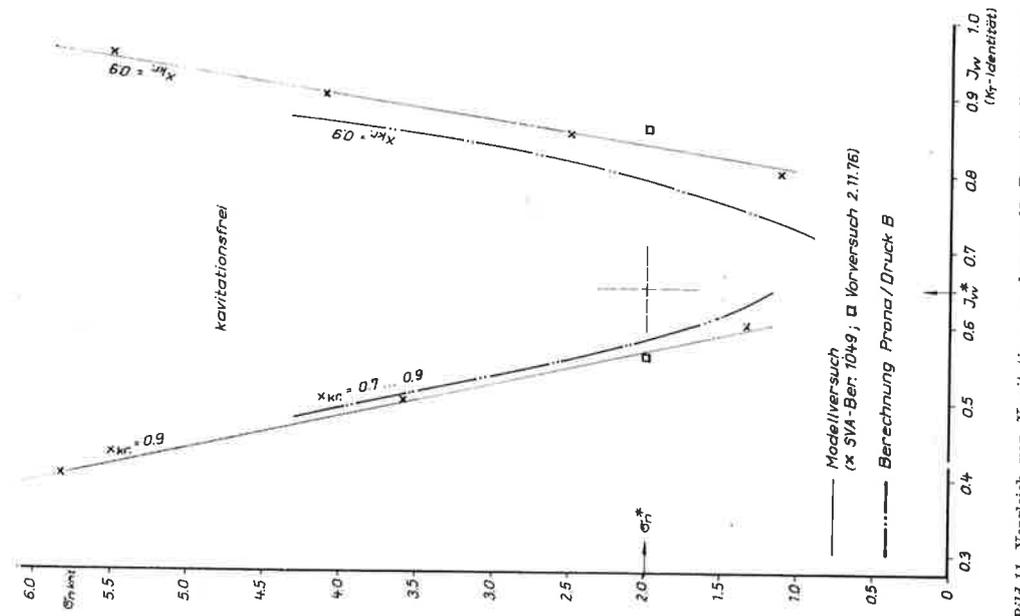


Bild 11. Vergleich von Kavitationsgrenzkurven für Propeller P 1196 nach Rechnung und Experiment

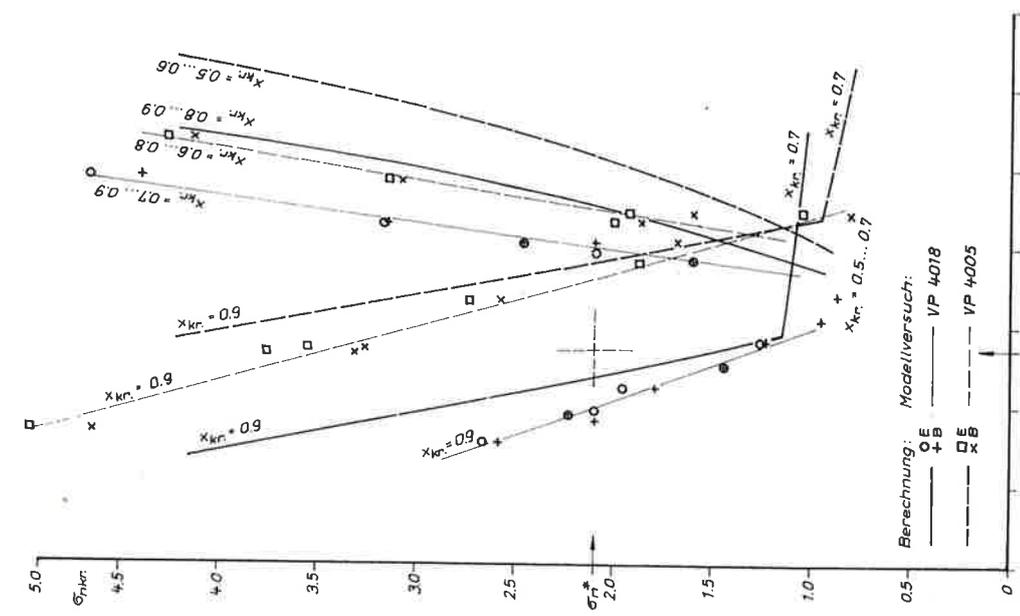


Bild 12. Kavitationsgrenzen für die Propeller eines Massengutschiffes

Die so definierten Kavitationsgrenzkurven wurden für die hier zu vergleichenden Propeller auch im Kavitationstunnel K 15 A der Schiffbau-Versuchsanstalt experimentell ermittelt [13], [14], [15], [16].

Die rechnerischen Voraussagen sind den Versuchsergebnissen aus dem Kavitationstunnel für die Propeller P 1190, P 1192 und P 1196 in den Bildern 9 bis 11, für die Propeller VP 4005 und VP 4018 in Bild 12 gegenübergestellt. Für die Zuordnung der Fortschrittsgrade aus Berechnung und Versuch wurde die Schubidentität zugrunde gelegt.

Die Übereinstimmung von Berechnung und Experiment ist gemessen an den starken Vereinfachungen der komplizierten physikalischen Sachverhalte [6] als befriedigend zu bezeichnen. Auch der kavitationsmäßig gefährdete Bereich der Flügelfläche wird richtig vorausgesagt.

Als allgemeine Tendenz ist zu bemerken, daß die Saugseitenschichtkavitation erst später, d. h. bei höherer Propellerbelastung bzw. geringerem Fortschrittsgrad einsetzt, als rechnerisch vorausgesagt wird, während die Druckseitenkavitation bereits eher, d. h. bei niedrigeren Fortschrittsgraden einsetzt, als die Berechnung ausweist. Lediglich für den Propeller P 1196 (Bild 11) trifft die letzte Feststellung nicht zu, hier stimmen Berechnung und Experiment erstaunlich gut überein.

3.2. Vergleich der Entwurfsverfahren hinsichtlich der Propellerkavitation

Der Vergleich der Entwurfsverfahren hinsichtlich der Kavitationseigenschaften des freifahrenden Propellers ist an Hand der Tafel 1 möglich.

Die Propeller mit vorgegebener, an der Spitze reduzierter radialer Belastungsverteilung (P 1196 und VP 4018) haben sowohl nach der Berechnung als auch nach dem Experiment den größten kavitationsfreien Fortschrittsgradbereich. Den geringsten kavitationsfreien Arbeitsbereich im freifahrenden Zustand haben die sogenannten „nachstromangepaßten“ Propeller P 1191 und VP 4005. Hinsichtlich der Propeller P 1190 und P 1192 ist die Rangfolge nach Berechnung und Modellversuch nicht eindeutig.

Tafel 1. Vergleich der kavitationsfreien Fortschrittsgradbereiche ΔJ für Entwurfskavitationszahl σ_n^*

Propeller	A_E/A_0	Kavitationsfreier Fortschrittsgradbereich					
		Berechnung			Modellversuch		
		J_{SSK}	J_{DSK}	ΔJ	J_{SSK}	J_{DSK}	ΔJ
P 1190	0,554	0,697	0,822	0,125	0,660	0,817	0,157
P 1191	0,536	—	—	—	0,726	0,813	0,087
P 1192	0,525	0,730	0,905	0,175	0,678	0,793	0,115
P 1196	0,538	0,580	0,790	0,210	0,564	0,832	0,268
VP 4005	0,510	0,581	0,713	0,132	0,559	0,648	0,089
VP 4018	0,510	0,437	0,652	0,215	0,398	0,600	0,202

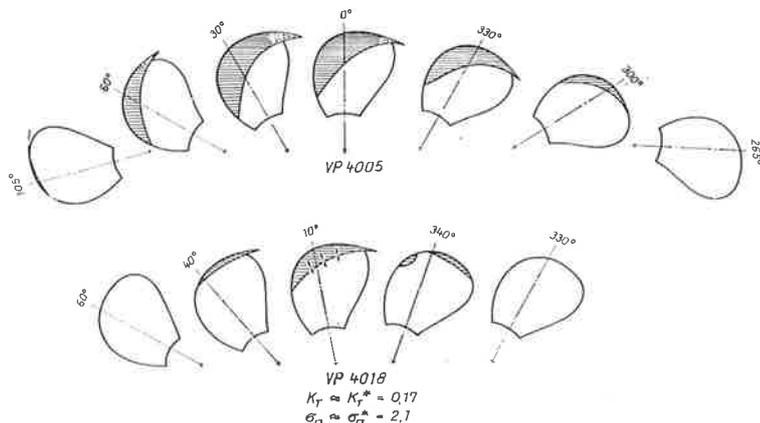


Bild 13. Kavitationserscheinungen im simulierten Nachstromfeld eines Massengutschiffes beim Propellerentwurfzustand

Am Rande sei noch bemerkt, daß die unterschiedlichen „Breiten“ der kavitationsfreien Propellerbetriebsbereiche trotz etwa gleicher Flächenverhältnisse erreicht werden. Das bekräftigt die in [6] getroffene Aussage, daß durch das Flächenverhältnis nicht die Sicherheit gegen Saug- oder Druckseitenschichtkavitation beeinflusst wird, sondern nur die Sicherheit gegen Blasen kavitation und Schubabfall.

Wie bereits vorher ausgeführt, kann das Kavitationsverhalten im Nachstromfeld aus den Druckminimadiagrammen mit den eingetragenen quasistationären Fortschrittsgradbereichen der Blattsschnitte eingeschätzt werden.

So läßt sich z. B. aus den Bildern 6 und 7 ableiten, daß der Propeller VP 4018, dessen Blattsschnittparameter Wölbung/Steigung unter Berücksichtigung der peripheren Nachstromschwankungen optimiert wurden, zeitlich veränderliche Kavitation in geringerem Umfang aufweisen müßte als der Propeller VP 4005. Diese Voraussage wird durch den Modellversuch voll bestätigt (Bild 13).

Inwieweit die durch Spitzenentlastung und Blattsschnittoptimierung verbesserten Kavitationseigenschaften sich auch hinsichtlich der Verminderung der propellererregten Druckimpulse auswirken, wird im folgenden Abschnitt dargestellt.

4. Gegenüberstellung der rechnerischen Voraussage für die Druckimpulse mit dem Experiment

4.1. Das EDV-Programm „NV 570“

Das Programm „NV 570“ berechnet für vorgegebene Propeller und Anströmbedingungen folgende Größen:

- die hydrodynamischen Charakteristiken von Propellerblattschnitten,
- die Freifahrtcharakteristiken,
- die instationäre Belastung einzelner Propellerblattschnitte,
- die vom Propeller induzierte resultierende Belastung der Propellerwelle,
- die harmonischen Analysen der Schub- und Momentenwerte sowie der Belastung der Propellerwelle,
- die Druckverteilung auf dem Propellerblatt,
- die Ausdehnung, die Dicke und den Typ der Kavitation,
- die Druckimpulse am Schiffskörper, hervorgerufen durch nichtkavitierende und teilweise kavitierende Propeller,
- die pulsierenden Oberflächenkräfte am Schiffskörper.

Für einen im Nachstrom arbeitenden Propeller sind folgende Eingabedaten erforderlich:

- Angaben zu den Propellerblattschnitten,
- Angaben über den Nachstrom

- Beladungs- und Arbeitsbedingungen für das Schiff,
- Hinterschiffsform.

Weitere Informationen hierüber sind [2] zu entnehmen.

4.2. Berechnung der Druckimpulse für die Modellpropeller

Die Druckimpulse wurden für die vier Modellpropeller des schnellen Frachtschiffes P 1190, P 1191, P 1192 und P 1196 berechnet, die im Maßstab 1:25 gefertigt worden waren (\varnothing 240 mm). Da die Berechnungen für den Entwurfsschubbeiwert $K_T^* = 0,17$ und die Entwurfskavitationszahl $\sigma_n^* = 1,99$ erfolgen sollten, mußte die Schiffsgeschwindigkeit so eingegeben werden, daß dieser Schubbeiwert realisiert wurde.

Die eingegebene Drehzahl $n = 1380 \text{ s}^{-1}$ entsprach der Drehzahl der Modellversuche. Für die einzugebende Profilform wurden die Werte des Großpropellers maßstäblich umgerechnet. Beim Propeller P 1190 (Troost-Profil) mußten die Profilaufmaße für jeden Blatt-schnitt eingegeben werden, während für die übrigen Propeller (modifiziertes NACA 16-Profil) nur die Steigung, die Sehnenlänge - der Abstand Eintrittskante, Erzeugende, der Eintrittskantenradius, der Abstand Basislinie - Sehne und die Koordinaten der Saug- bzw. Druckseite an der Stelle maximaler Dicke eingegeben werden mußte.

Als Nachstromdaten wurden die im Kavitationstunnel mit eingebauter Druckmeßdosenstrebe gemessenen Werte [18] eingegeben. Da Druckimpulse nur bei Eingabe von Nachstromdaten berechnet werden können, wurde für die Rechnung bei homogener Anströmung ein Nachstromfeld mit der Nachstromziffer $w = V_A/V_S = 1,0$ in allen Punkten eingegeben. Bei der Aufmessung im Kavitationstunnel wurden Geschwindigkeitsschwankungen von $\pm 2\%$ über den Radius festgestellt [18], doch sind diese ohne weitere Bedeutung für die Druckimpulse.

Tangentiale Nachstromdaten wurden nicht eingegeben, da hierüber bisher keine Meßergebnisse vorliegen. Es kann jedoch angenommen werden, daß zumindest bei homogener Zuströmung die tangentialen Geschwindigkeitskomponenten im Kavitationstunnel vernachlässigbar gering sind.

Die Auswahl der Feldpunkte, für die die Druckimpulse berechnet werden sollten, erfolgte einmal so, daß die Einflüsse der axialen Lage des Propellers und des Freischlages erfaßt wurden und zum anderen so, daß ein Punkt der Lage der Druckmeßdose bei den Experimenten entsprach. Sämtliche Punkte liegen in der Schiffssymmetrieebene.

Die in das Programm einzugebende Tauchtiefe des Propellers berechnet sich zu

$$h_0 = \frac{\sigma_n [\varrho/2 (nD)^2] + p_v - p_{at}}{\varrho g}$$

mit $p_v = 2360 \text{ N/m}^2$ und $p_{at} = 103300 \text{ N/m}^2$. Auf Grund der vorgegebenen Kavitationszahl und des Maßstabseinflusses ergibt sich für die Berechnung eine negative Tauchtiefe von $h_0 = -7009 \text{ mm}$.

4.3. Experimentelle Ermittlung der Druckimpulse

Auf eine umfassende Beschreibung des Versuchsaufbaus und der Versuchsdurchführung kann an dieser Stelle verzichtet werden, da dies schon in [17] erfolgte. Es sollen nur noch einmal die wichtigsten Fakten zusammengestellt werden.

Die Membranebene des Aufnehmers mit einem Durchmesser von 16,5 mm liegt horizontal über dem Propeller und zwar mit ihrem Mittelpunkt genau normal über dem Austritt der Erzeugenden aus der Flügelspitze. Der senkrechte Abstand zum Propellerkreis betrug bei den Messungen 30% des Propellerdurchmessers. Für die Untersuchungen im simulierten Nachstromfeld wurde das auf der Grundlage des am Schiffsmodell aufgemessenen nominellen axialen Nachstroms geschaffene Nachstromsieb für das schnelle Frachtschiff eingesetzt [19].

Untersucht wurden alle vier Propeller beim Entwurfsfortschrittsgrad und verschiedenen Kavitationszahlen, wobei hier nur die Ergebnisse bei Entwurfskavitationszahl herangezogen werden. Einzelheiten sind [20] zu entnehmen.

Im Ergebnis der Druckimpulsmessung an einem Propeller erhält man dann ein Amplitudenfrequenzspektrum der Druckschwankungen, einen Schrieb der Druckschwankungen des ungefilterten Drucksignals und ein Amplitudenfrequenzspektrum der Vertikalschwingbeschleunigungen der Meßeinrichtung. Gleichzeitig wurden bei den Zuständen mit Kavitation die Kavitationserscheinungen skizziert, wobei dies im simulierten Nachstrom für verschiedene Winkelstellungen Φ erfolgte.

4.4. Diskussion der Ergebnisse

4.4.1. Homogene Zuströmung

In der Tafel 2 wurden die dimensionslosen Beiwerte der Druckamplituden, der realisierte Schubbeiwert, die Kavitationszahl und die kavitierende Flügelfläche von Rechnung und Experiment für die einzelnen Propeller gegenübergestellt. Die Ergebnisse der Druckamplituden wurden in Form eines Säulendiagramms in Bild 14 aufgetragen. Dabei wurden die resultierenden Druckamplituden unter Berücksichtigung der Phasenlage dargestellt, da bei den Messungen jeweils nur das Gesamtsignal der jeweiligen Blattfrequenz ermittelt wird. Der Anteil infolge Kavitation ergibt sich aus der Differenz zur Amplitude ohne Kavitation.

Die beobachteten und berechneten Kavitationserscheinungen sind im Bild 15 gegenübergestellt worden. Da im Rechnerausdruck nur die Art der Kavitation (Schicht-,

Tafel 2

Dimensionslose Beiwerte der Druckamplituden und kavitierende Flügelfläche für die Propeller des schnellen Frachtschiffes — homogene Zuströmung —

	P 1190		P 1191		P 1192		P 1196		
	Messung	NV 570	Messung	NV 570	Messung	NV 570	Messung	NV 570	
K_T	0,171	0,171	0,171	0,173	0,173	0,170	0,168	0,168	
σ_n	1,99	1,99	2,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	
kavitierend	K_p^1 tot	0,016	0,020	0,022	0,026	0,020	0,025	0,016	0,022
	K_p^2 tot	0,001	0,002	0,002	0,005	0,002	0,002	0,001	0,002
Fläche	A_c	$\approx 1,6\%$	$\approx 4,5\%$	$\approx 11,9\%$	$\approx 6,2\%$	$\approx 6,4\%$	0	0	Drucks. $\approx 1,1\%$
nicht kavitierend	K_p^1 tot n	0,016	0,020	0,021	0,024	0,019	0,025	0,016	0,022
	K_p^2 tot n	0,001	0,002	0,002	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002

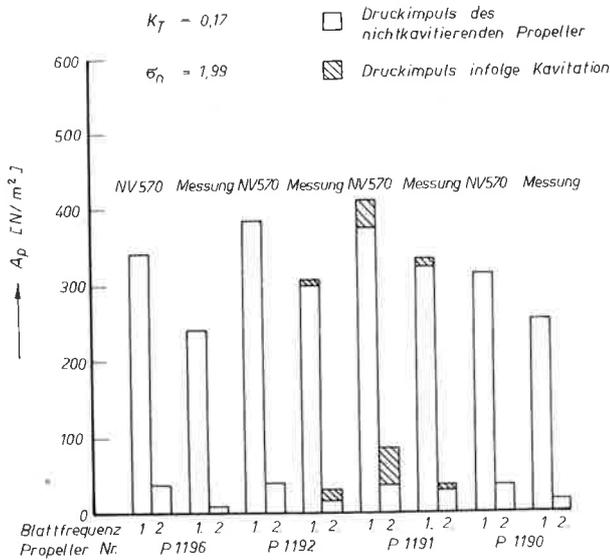


Bild 14. Die durch die verschiedenen Propeller induzierten Druckschwankungen in einem ausgewählten Feldpunkt — Vergleich Rechnung — Experiment

Blasen-, Spitzenwirbelkavitation) und deren Ausdehnung über die Sehne auf den einzelnen Blattsehnungen bzw. beim Spitzenwirbel dessen Durchmesser enthalten sind, stellen die Skizzen für die berechneten Kavitationserscheinungen nur „artists impressions“ dar. Besonders wenn nur Kavitation auf dem Blattsehnung $r/R = 0,95$ auftrat, war es schwierig, eine adäquate Skizze anzufertigen. Dies erfolgte dann unter Berücksichtigung der bei den Versuchen im Kavitationskanal beobachteten Erscheinungen.

Die berechneten Druckamplituden der ersten Blattfrequenz für die nichtkavitierenden Propeller (Bild 16) sind 10...40% größer als die gemessenen; bei den kavitierenden Propellern (Bild 17) lauten die entsprechenden Werte 25...40%. Bei der Bewertung dieser Unterschiede ist zu berücksichtigen, daß in den Berechnungen ein Wandeinflußfaktor von 2 enthalten ist, der für die verwendete Druckmeßstrebe nicht unbedingt zutreffen muß. Die größten Unterschiede zwischen Berechnung

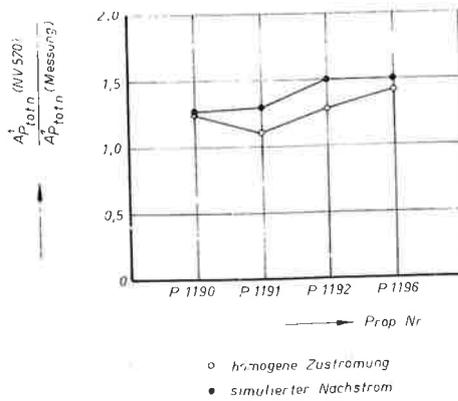


Bild 16. Druckamplituden der nichtkavitierenden Propeller; Vergleich Rechnung — Experiment

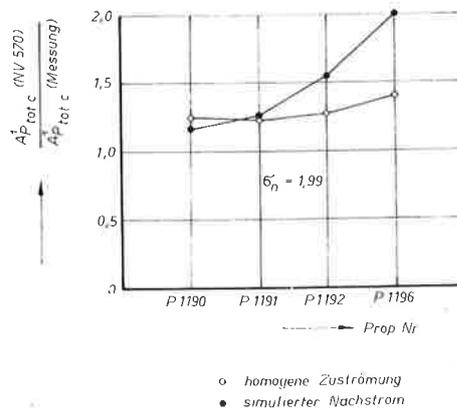


Bild 17. Druckamplituden der kavitierenden Propeller; Vergleich Rechnung — Experiment

und Experiment treten beim Propeller P 1196, die geringsten beim P 1191 auf.

Die Verhältnisse der Druckamplituden der ersten Blattfrequenz des kavitierenden zum nichtkavitierenden Propeller (Bild 18) zeigen nur geringe Diskrepanzen zwischen Messung und Rechnung. Dies ist darauf zurück-

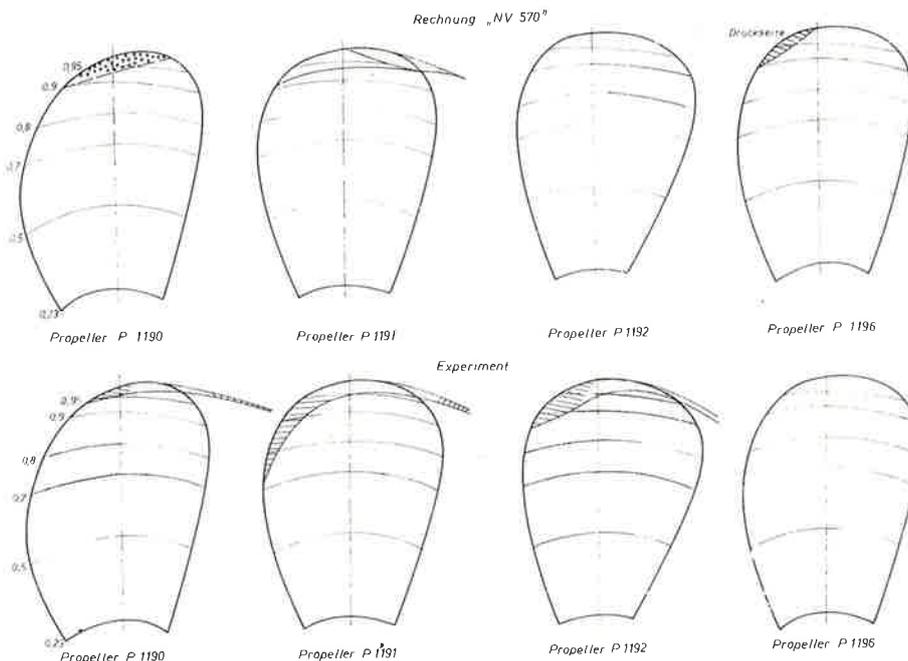


Bild 15. Kavitationsbilder bei homogener Zuströmung; Vergleich Rechnung — Experiment

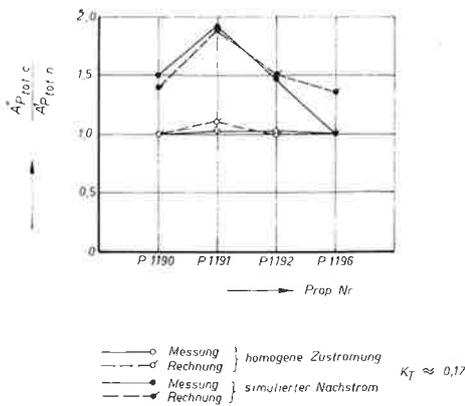


Bild 18. Zuwachs der Druckamplituden infolge Kavitation; Vergleich Rechnung — Experiment

zuführen, daß die Propeller gering bzw. gar nicht kavitieren. Dies kommt beim Propeller P 1191 deutlich zum Ausdruck. Hier ergibt sich nach Rechnung eine kavitierende Flügelfläche von ca. 6%, während nach der Beobachtung dieselbe ca. 12% beträgt. Trotzdem ist der berechnete Zuwachs infolge Kavitation größer als der gemessene. Während auf Grund der Messungen festgestellt wurde, daß bei einer mit Kavitation belegten Flügelfläche $\geq 10\%$ eine meßbare Erhöhung der Druckamplituden eintritt [20], liefert die Rechnung bereits einen Zuwachs bei kleineren Flächen. Die Dicke der Kavitation ist dabei aber sicherlich nicht ohne Einfluß.

Nach Rechnung tritt beim P 1192 keine Kavitation, beim P 1196 geringe Kavitation auf der Druckseite auf. Bei den Messungen zeigte der P 1192 relativ starke Saugseitenkavitation und der P 1196 war kavitationsfrei. Auch die nach der Berechnung zu erwartende Blasen-kavitation beim P 1190 wurde nicht beobachtet, sondern Schichtkavitation mit Spitzenwirbel.

Die sich auf der Grundlage der Messung ergebende Reihenfolge der Propeller hinsichtlich der Absolutwerte der induzierten Druckschwankungen — P 1191, P 1192, P 1190, P 1196 — hat bei der Rechnung ein etwas anderes Aussehen — P 1191, P 1192, P 1196, P 1190. Allerdings sind die Unterschiede zwischen P 1190 und P 1196 sowohl bei der Messung als auch beim Experiment gering.

Die Amplituden der zweiten Blattfrequenz erreichen maximal 20% des Wertes der ersten Blattfrequenz.

4.4.2. Simulierter Nachstrom

Entsprechend Abschnitt 4.4.1 wurden die Ergebnisse in Tafel 3 gegenübergestellt und die Druckamplituden in

Bild 19 aufgetragen. Die Kavitationserscheinungen für Propeller P 1191 sind als Beispiel in Bild 20 wiedergegeben.

Die berechneten Druckamplituden der ersten Blattfrequenz für die nichtkavitierenden Propeller sind 25...50% größer als die gemessenen (Bild 16), bei den kavitierenden Propellern lauten die entsprechenden Werte 15...100% (Bild 17). Die Bemerkung zum Wandeinfluß im Abschnitt 4.4.1 ist auch hier zu beachten. Auch hier treten die größten Unterschiede beim Propeller P 1196 auf, während die geringsten Unterschiede im Gegensatz zu Abschnitt 4.4.1 beim Propeller P 1190 auftreten.

Die Verhältnisse der Druckamplituden der ersten Blattfrequenz des kavitierenden zum nichtkavitierenden Propeller zeigen bis auf P 1196 nur geringe Unterschiede

simulierter Nachstrom

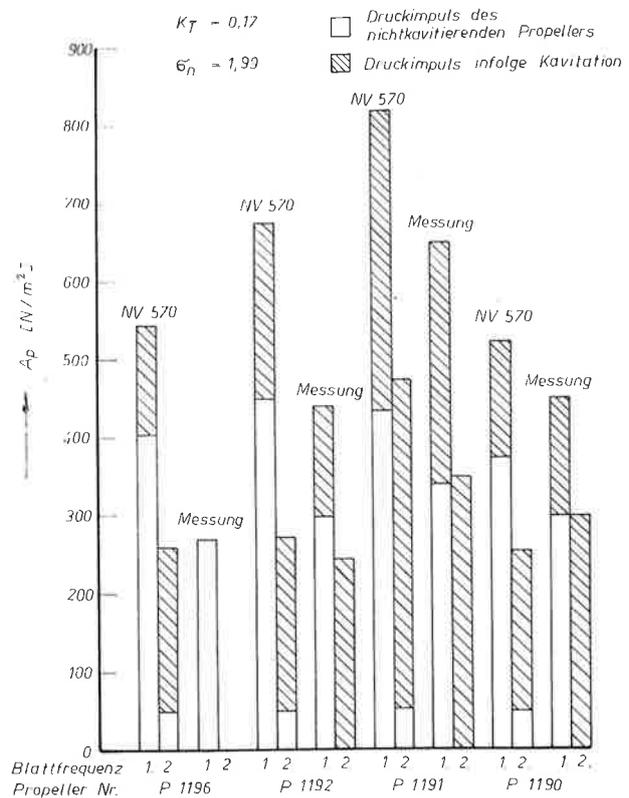
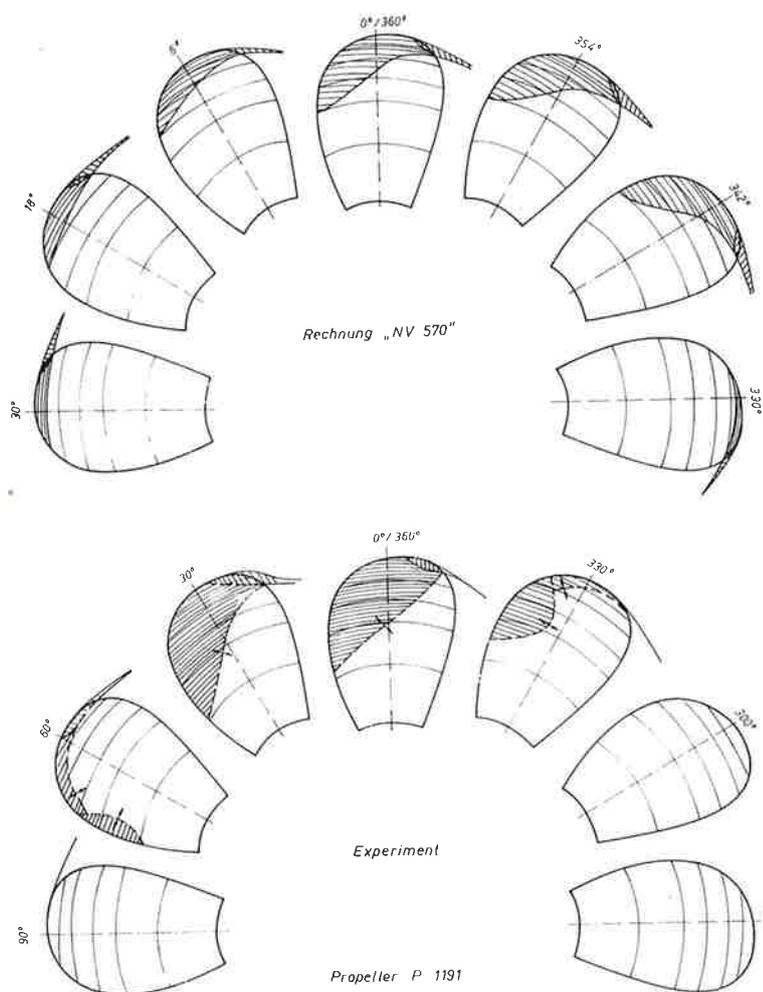


Bild 19. Die durch die verschiedenen Propeller induzierten Druckschwankungen in einem ausgewählten Feldpunkt; Vergleich Rechnung Experiment

	P 1190		P 1191		P 1192		P 1196		
	Messung	NV 570	Messung	NV 570	Messung	NV 570	Messung	NV 570	
K_T	0,171	0,170	0,171	0,168	0,170	0,172	0,169	0,171	
σ_n	1,99	1,99	2,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	
kavitierend	$K_{p^1}^{totc}$	0,029	0,033	0,042	0,052	0,028	0,043	0,017	0,034
	$K_{p^2}^{totc}$	0,019	0,016	0,022	0,030	0,016	0,017	—	0,016
	$K_{p^3}^{totc}$	0,008	—	0,020	—	0,014	—	—	—
	$K_{p^4}^{totc}$	0,011	—	0,014	—	0,016	—	—	—
	$K_{p^5}^{totc}$	0,014	—	—	—	—	—	—	—
A_e	300°	0	0	0	5%	0	0	0	
	360°/0°	16%	13%	37%	21%	37%	7%	12%	6%
	60°	1%	0	11%	0	14%	0	0	0
nichtkavitier.	$K_{p^1}^{totn}$	0,019	0,024	0,022	0,027	0,019	0,028	0,017	0,025
	$K_{p^2}^{totn}$	—	0,003	—	0,003	—	0,003	—	0,003

Tafel 3
Dimensionslose Beiwerte der Druckamplituden und kavitierende Flügelfläche für die Propeller des schnellen Frachtschiffes — simulierter Nachstrom —

Bild 20. Kavitation im simulierten Nachstromfeld;
Vergleich Rechnung — Experiment



zwischen Rechnung und Messung (Bild 18). Die beobachtete kavitierende Fläche beim P 1196 ist nur scheinbar größer, da es sich hier um intermittierende Kavitation handelt, während sich nach der Rechnung eine zwar zeitlich veränderliche jedoch in der entsprechenden Winkellage immer wiederholende Kavitation einstellt.

Bei der Kavitationserscheinung ist festzustellen, daß sowohl die beobachtete flächenmäßige Ausdehnung derselben größer als auch die über den Winkel Φ ablaufende zeitliche Veränderung länger ist als nach der Berechnung.

Die sich auf der Grundlage der Messung und Rechnung ergebenden Reihenfolgen der Propeller hinsichtlich der Absolutwerte der induzierten Druckschwankungen haben das gleiche Aussehen wie bei homogener Zuströmung. Allerdings ist zu bemerken, daß nach der Messung die Druckamplituden vom P 1196 wesentlich kleiner als die vom P 1190 sind.

Die Amplituden der zweiten Blattfrequenz, die auf Grund der instationären Kavitation wesentlich größer als bei homogener Zuströmung sind, erreichen bei der Messung bis zu 65% und bei der Rechnung bis zu 58% des Wertes der ersten Blattfrequenz. Hier zeichnet sich keine einheitliche Tendenz zwischen Rechnung und Messung ab. Bei der Messung wurden auch noch Blattfrequenzen höherer Ordnung ermittelt, die betragsmäßig die Werte der zweiten Blattfrequenz durchaus erreichen. Die Berechnung beschränkt sich auf die 1. und 2. Blattfrequenz.

Bei den Messungen ohne Kavitation konnten keine Blattfrequenzen höherer Ordnung festgestellt werden. Da jedoch bereits bei homogener Zuströmung solche

auftraten, ist zu vermuten, daß sie durch den unempfindlicheren Meßbereich verwischt wurden.

4.4.3. Vergleich homogener Zuströmung — simulierter Nachstrom

Bei der Berechnung nach dem Programm NV 570 werden die Druckimpulse des nichtkavitierenden Propellers gesondert für die einzelnen Ursachen ausgedruckt. Im einzelnen handelt es sich um Beiträge infolge der Verdrängungswirkung des Flügels, des stationären Auftriebs und des instationären Auftriebs, siehe hierzu auch [21]. Bei der Kavitation wird keine Unterteilung vorgenommen. Es ist jedoch anzunehmen, daß die Berechnung entsprechend Huse [22] erfolgt und intern drei Anteile berechnet werden und zwar Beiträge infolge der Hohraumbewegung (zeitlich konstante Kavitation wie sie bei homogener Zuströmung auftritt), der Volumenänderung des Hohraumes (zeitlich veränderliche Kavitation) und infolge des Spitzenwirbels.

Beim Vergleich der Druckamplituden für die beiden Zuströmungen ohne Kavitation in Bild 21 ist zu sehen, daß der relative Anteil des instationären Auftriebs nach Berechnung bei allen Propellern nahezu konstant ist, während bei der Messung am „nachstromangepaßten“ Propeller P 1192 kein instationärer Anteil registriert wurde. Bei Kavitation (Bild 22) macht sich der Beitrag aus der Volumenänderung des Hohraumes stark bemerkbar und erreicht für die untersuchten Propeller nahezu den Wert der Druckamplitude bei homogener Zuströmung. Während bei den Propellern P 1190 und P 1191 der instationäre Anteil durch die Rechnung gut

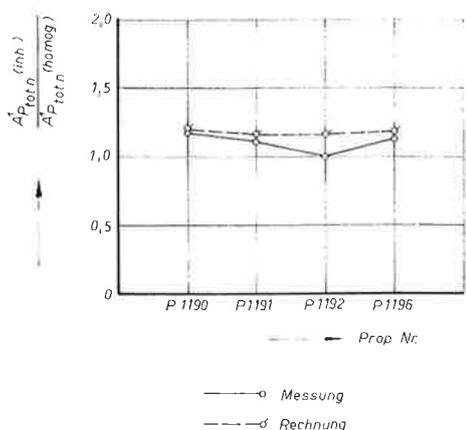


Bild 21. Zuwachs der Druckamplituden der nichtkavitierenden Propeller infolge der Ungleichförmigkeit der Zuströmung

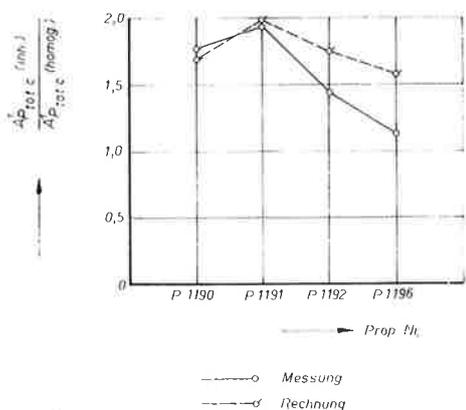


Bild 22. Zuwachs der Druckamplituden der kavitierenden Propeller infolge der Ungleichförmigkeit der Zuströmung

erfaßt wird, treten bei den beiden anderen erhebliche Differenzen auf.

5. Zusammenfassung

Ausgehend von der Notwendigkeit, Schiffspropeller hoher hydrodynamisch bedingter Gebrauchseigenschaften zu projektieren, werden Erfahrungen mitgeteilt, die bei der Ermittlung der Kavitationseigenschaften und der propellererregten Druckimpulse nach im DDR-Schiffbau angewendeten Berechnungsverfahren gesammelt wurden. Es werden Vergleiche zwischen den rechnerischen Voraussagen und Modellversuchsergebnissen im Kavitationstunnel durchgeführt.

Es wird gezeigt, daß die vergleichende Einschätzung der Kavitationseigenschaften von Propellern im freifahrenenden Zustand und im inhomogenen Nachstrom bereits durch relativ unkomplizierte und stark vereinfachende Berechnungen möglich ist, daß jedoch zwischen den berechneten und experimentell festgestellten propellererregten Druckimpulsen selbst bei Anwendung eines relativ hochentwickelten Berechnungsprogramms nicht unbeträchtliche Differenzen in der absoluten Größe der Druckschwankungsamplituden auftreten. Zur vergleichenden qualitativen Einschätzung des Erregerniveaus verschiedener Propeller ist das in Betracht gezogene Berechnungsprogramm jedoch geeignet.

Der Einfluß der Propellerentwurfsmethode auf die Kavitationseigenschaften und das Erregerniveau wird an Propellervarianten für ein schnelles Frachtschiff und für ein Massengutfrachtschiff deutlich gemacht.

Gute Kavitationseigenschaften und geringe propellererregte Druckimpulse gewährleistet eine im DDR-Pro-

pellerbau angewendete Entwurfsmethode, die durch eine zweckmäßige Entlastung des Flügelspitzenbereiches und eine optimale Anpassung des Verhältnisses von Profیلwölbung und -anstellung an das jeweils vorliegende ungleichförmige Nachstromfeld des Schiffes gekennzeichnet ist.

Verzeichnis der verwendeten Symbole

$$A = 1 \frac{\Delta f/c}{(f/c)_{ind}}$$

A_c

$$A_p(\phi) = \sum_{j=1}^{\infty} A_p^j \cdot \sin(j\phi + \varphi^j)$$

A_p^j

$$C_p = \frac{p - p_0}{\rho/2 \cdot V^2}$$

e

D

f

$(f/c)_{ind}$

h_0

$$J = \frac{V_A}{n \cdot D}$$

$$K_p^j = \frac{A_p^j}{\rho/2 \cdot (n \cdot D)^2}$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5}$$

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4}$$

n

P

p

p_{at}

p_0

p_v

Q

r

R

T

$$V = \sqrt{V_A^2 + (\pi \cdot D \cdot n \cdot x)^2}$$

V_A

V_s

w

$$x = \frac{r}{R}$$

Z

β

β_1

Γ

ρ

Parameter für Berücksichtigung der induzierten Strömungskrümmung in Wölbung und Anstellung

kavitierende Flügelfläche Fourier-Reihenentwicklung der Gesamtdruckschwankung

Druckamplitude der j -ten Blattfrequenz ($j \cdot n \cdot Z$)

Druckbeiwert der Profilmströmung

Sehnenlänge eines Propellerblattschnitts

Propellerdurchmesser

maximale Wölbung eines Propellerblattschnitts

induzierte Strömungskrümmung

Tauchtiefe der Propellerwelle

Fortsehrittsgrad des Propellers

Beiwert der Druckamplitude der j -ten Ordnung

Drehmomentenbeiwert des Propellers

Schubbeiwert des Propellers

Propellerdrehzahl

Propellersteigung

Druck der Profilmströmung

Atmosphärendruck auf NN

Statischer Druck der ungestörten Strömung

Dampfdruck

Propellerdrehmoment

Blattschnittradius

Propellerradius

Propellerschub

resultierende Anströmungsgeschwindigkeit

eines Propellerblattschnitts

Propellerfortschrittsgeschwindigkeit

Schiffsgeschwindigkeit

Nachstromziffer

Blattschnittradienverhältnis

Propellerflügelzahl

Propellerfortschrittswinkel

induzierter Propellerfortschrittswinkel

Zirkulation

Wasserdichte

$$\sigma_n = \frac{p_0 - p_v}{\rho/2 \cdot (n \cdot D)^2}$$

$$\sigma_x = \frac{p_0 - p_v}{\rho/2 \cdot V^2}$$

Φ Umlaufwinkel des Propellerflügels, gemessen zwischen der oberen Senkrechten durch Mitte Propellerwelle und der Erzeugenden, positiv in Drehrichtung des Propellers

φ^j Phasenwinkel bei der Fourier-Analyse

ψ Parameter für Radialkoordinate

Indices

c infolge Kavitation

j Ordnung der Blattfrequenz ($n \cdot Z$)

totc Summe aller Anteile des kavitierenden Propellers

totn Summe aller Anteile des nichtkavitierenden Propellers

* bezogen auf den Entwurfsbetriebszustand

— Mittelwert

Literatur

[1] Fichtner, R.: Automatisierte technische Vorbereitung der Fertigung von Schiffsschrauben im VEB Dieselmotorenwerk Rostock. Schiffbau-forschung, Rostock 15 (1976) Sonderh. S. 77—93

[2] Programmbenutzerinformation NV 570. Berechnung der Erregerkräfte eines kavitierenden Schiffpropellers. VVB Schiffbau, Inst. für Schiffbau, Rostock 1975

[3] Lanmeren, W. P. A. van, Oosterveld, W. P. A., Manen, J. D. van: The Wageningen B-screw Series. Schip en Werf, Rotterdam 37 (1970) 5, S. 115—124

[4] Yazaki, A.: Design Diagrams for Modern Four, Five, Six and Seven-bladed Propellers developed in Japan. Rep. of Transp. Techn. Res. Institute, Tokyo, Sept. 1962, Rep. No. 52

[5] Eckhard, M. K.; Morgan, W. B.: A propeller design method. Trans Soc. Nav. Archit. and Mar. Eng., New York 63 (1955) S. 325—374

[6] Wagner, K.: Gesichtspunkte und Möglichkeiten für den Entwurf von Propellern hoher hydrodynamischer Güteermkmale. Schiffbau-forschung, Rostock 17 (1978) 3/4, S. 125—131

[7] Manen, J. D. van: Enige beschouwingen over cavitatie-criteria. Schip en Werf, Rotterdam 22 (1955) 1, S. 10—17

[8] Manen, J. D. van, Troost, L.: The Design of Ship Screws of Optimum Diameter for an Unequal Velocity Field. Paper of the New England Section of The Soc. of Naval Arch. and Mar. Eng. 1952

[9] Tachmindji, A. J., Milam, A. B.: The Calculation of the Circulation Distribution for Propellers with Finite Hub, having three, four, five and six Blades. Int. Shipb. Progr., Rotterdam 4 (1957), 37, S. 467—475

[10] Morgan, B., Silovič, V., Denny, S. B.: Propeller Lifting-Surface Corrections. HyA, Lyngby, Dänemark 1965, H. 10

[11] Betz, A.: Schraubenpropeller mit geringstem Energieverlust. Vier Abhandlungen zur Hydrodynamik u. Aerodynamik. Göttingen 1927

[12] Lerbs, W.: Moderately Loaded Propellers. Trans. Soc. Nav. Archit. and Mar. Eng., New York 60 (1952) S. 73—117

[13] Böhme, H.: Freifahrt- und Kavitationsversuche in homogener und inhomogener Zuströmung mit 3 Festpropellern, Propeller Nr. P 1190, P 1191, P 1192. Berichte Nr. 1020 u. 1020.1 der Schiffbau-Versuchs-anstalt, Potsdam, 1976, unveröffentlicht

[14] Böhme, H.: Propellerversuche ohne und mit Kavitation in homogener Zuströmung und im simulierten Mitströmungsfeld mit Propeller P 1196. Bericht Nr. 1049 der Schiffbau-Versuchsanstalt, Potsdam 1976, unveröffentlicht

[15] Böhme, H.: Freifahrt- u. Kavitationsversuche in homogener und inhomogener Strömung für den Modellpropeller VP 4005 bei 3 verschiedenen Steigungen. Bericht Nr. 973 der Schiffbau-Versuchsanstalt, Potsdam 1975, unveröffentlicht

[16] Schroeder, G.: Versuche mit dem Propeller VP 4018 im Kavitationskanal. Bericht Nr. 1201 der Schiffbau-Versuchsanstalt, Berlin-Potsdam 1979, unveröffentlicht

[17] Selke, W., Mehmel, M.: Meßeinrichtung für den Kavitationskanal zur Ermittlung der vom Propeller ausgehenden Druckimpulse. Seewirtschaft, Berlin 11 (1979) 4, S. 193—195

[18] Mehmel, M.: Meßeinrichtung für den Kavitationskanal zur Ermittlung der vom Propeller ausgehenden Druckimpulse. Bericht Nr. 1108 der Schiffbau-Versuchsanstalt, Potsdam 1977, unveröffentlicht

[19] Günther, B.: Simulierung des nominellen axialen Mitströmungsfeldes für ein schnelles Frachtschiff. Bericht Nr. 991 der Schiffbau-Versuchsanstalt, Potsdam 1975, unveröffentlicht

[20] Mehmel, M.: Messung der von den Modellpropellern P 1190, P 1191, P 1192 und P 1196 ausgehenden Druckimpulse im Kavitationskanal bei homogener Zuströmung und im simulierten Nachstrom. Bericht Nr. 1118 der Schiffbau-Versuchsanstalt, Potsdam 1978, unveröffentlicht

[21] Huse, E.: The Magnitude and Distribution of Propeller-Induced Surface Forces on a Single-Screw Ship Model. Norw. Ship Model Exp. Tank Publ. 1968, No. 100

[22] Huse, E.: Pressure Fluctuations on the Hull Induced by Cavitating Propellers. Norw. Ship Model Exp., Tank Publ. 1972, No. 111

Zur Berücksichtigung von Gefügeumwandlungen bei der Bestimmung zweiachsiger Schweißspannungszustände

Prof. Dr. techn. Wiss. K. M. Gałowski, LKI Leningrad
 Doz. Dr. sc. techn. Peter Seyffarth, Wilhelm-Pieck-Universität Rostock
 Dipl.-Ing. S. A. Schemelov, LKI Leningrad
 Dipl.-Ing. S. P. Markov, LKI Leningrad

0. Einleitung

Durch die Möglichkeiten der modernen Rechentechnik gewinnt die Betrachtung von Schweißspannungen als „technologische Imperfektionen“ geschweißter Bauteile für eine Reihe praktischer Aufgabenstellungen mehr und mehr an Bedeutung. Das trifft beispielsweise für die Berechnung der Knicksteifigkeit geschweißter Stützen, für Betriebs- und Zeitfestigkeitsberechnungen von Schweißverbindungen, aber auch für die Frage nach Notwendigkeit und Höhe der Vorwärmung beim Schweißen höherfester Stähle oder die Beeinflussung des Korrosionswiderstandes von Schweißverbindungen im Meerwasser zu.

Besonders beim Schweißen höherfester Stähle werden

die zeitlichen und Restspannungen durch Gefügeumwandlungen beeinflusst, so daß eine Berechnung der Kinetik von Schweißdeformationen und Schweißspannungen ohne die Berücksichtigung der Gefügeumwandlungen unvollkommen ist und zu größeren Fehlern führen kann. Der Einfluß der Gefügeumwandlungen auf die Kinetik von Spannungen und Deformationen beruht auf dem Unterschied der spezifischen Volumina der unterschiedlichen Kristallgittertypen vor und nach der Umwandlung, aber auch auf dem komplizierten Charakter der Abhängigkeit des Widerstandes gegen plastische Deformation vor, während und nach der Umwandlung in Abhängigkeit von der Temperatur. Rechnerische und experimentelle Untersuchungen hierzu liegen u. a. mit [1] bis [6] vor.