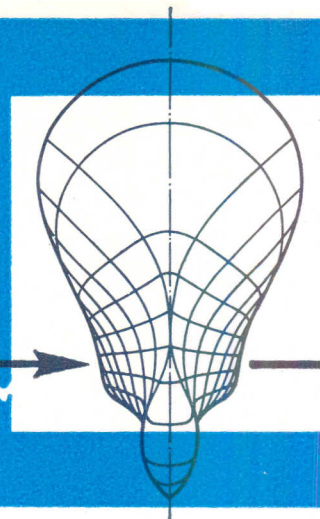


INSTITUT FÜR SCHIFFBAU
DER UNIVERSITÄT HAMBURG



Zusammenstellung von Versuchsergebnissen
propellererregter Druckschwankungen unter
besonderer Berücksichtigung der Kavitation

E.-A. Weltendorf

Oktober 1973

Bericht Nr. 296

Zusammenstellung von Versuchsergebnissen
propellererregter Druckschwankungen unter
besonderer Berücksichtigung der Kavitation

E.-A. Weitendorf

Diese Arbeit ist im Sonderforschungsbereich 98 "Schiffstechnik und Schiffbau" Hannover - Hamburg als Arbeitsunterlage für das Teilprojekt C4 entstanden und wurde auf seine Veranlassung unter Verwendung der ihm von der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Verfügung gestellten Mittel gedruckt. - Diese Arbeit ist gleichlautend mit einem Referat über das o.g. Thema, das innerhalb des 4. Fortbildungskurses mit dem Titel "Praktische Probleme des Schiffspropellers in heutiger Sicht" im Institut für Schiffbau im Oktober 1973 gehalten wurde.

Hamburg, Oktober 1973

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Vorbemerkung	1
2. Messeinrichtung und Versuchsdurchführung	2
3. Ergebnisse für homogene Zuströmung mit Kavitation	6
3.1. Druckamplitudenabfall durch Schubanfall	8
3.2. Amplitudenvergrößerung durch den Randwirbel	10
4. Ergebnisse von Druckschwankungsamplituden bei Kavitation im Nachstromfeld	13
4.1. Systematische Ergebnisse bei Kavitation im Nachstromfeld für Propeller von Spezialfahrzeugen	13
4.2. Systematische Ergebnisse bei Kavitation im Nachstromfeld für Frachtschiffpropeller	14
4.3. Druckschwankungsergebnisse unter Berücksichtigung des Betriebspunktes bei Kavitation im Nachstromfeld	18
5. Vergleiche von Modell- und Grossausführungsmessungen	20
6. Bewertung der Grösse von propellererregten Druckschwankungen	23
7. Versuchsergebnisse von elastisch gelagerten Platten über dem Propeller	25
8. Zusammenfassung	28
9. Literaturverzeichnis	29
10. Anhang mit Tabellen 1 und 2	31
11. Abbildungen 1 bis 33	33

1. Vorbemerkung

Durch die in der letzten Zeit im Schiffbau installierten grösseren Leistungen pro Propellerwelle haben die Kavitation sowie die Vibrationen infolge des Propellers eine besondere Aktualität erhalten. Daher soll in dem vorliegenden Referat auf die neuesten Messergebnisse der einen Art der Vibrationserregung durch den Propeller, nämlich auf die der propellererregten Druckschwankungen, ausführlich eingegangen werden. Während bei der anderen Art der Vibrationserregung, nämlich bei der der hydrodynamisch erregten Propellerlagerkräfte, die an anderer Stelle dieses Kurses behandelt wurden, die Erregungen durch die Propellerlagerung (wie der Name sagt) auf das Schiff übertragen werden, wirken die propellererregten Druckschwankungen direkt durch das Wasser auf die Aussenhaut ein.

Ein grosser Teil der Untersuchungen, deren Ergebnisse hier mitgeteilt werden sollen, wurde etwa im Laufe der letzten drei Jahre in der HSVA durchgeführt /11, 12, 13/. Auch ausländische Ergebnisse werden, soweit sie zum o.g. Thema gehören, behandelt /1, 2, 3, 8/. Dabei werden vor allem Versuchsergebnisse betrachtet, mit denen eine grobe Abschätzung und Bewertung von Druckamplituden im Projektstadium vorgenommen werden können. Die systematischen Versuche /8/ aus Wageningen und Trondheim /2/ sind mit Frachtschiffpropellern, die umfangreichen systematischen Versuche /12/ in der HSVA sind hauptsächlich mit Marinepropellern neben drei Untersuchungen an Frachtschiffen (z.B. /11/) ausgeführt worden.

2. Messeinrichtung und Versuchsdurchführung

Die Messung der propellererregten Druckschwankungen bei Kavitation mit und ohne axialen Nachstrom in der HSVA /11, 12/ wurden in dem dort vorhandenen mittleren Kavitationstunnel durchgeführt. Dieser hat einen Querschnitt von 570 x 570 mm. Abb. 1 zeigt die Messtrecke dieses Tunnels mit einem der benutzten Propeller (hier den Handelsschiffpropeller 1654 aus /11/). Auf dem Bild sind die Drahtsiebe zu erkennen, mit denen der axiale Nachstrom simuliert wurde.

Die vibrationserregenden Drücke wurden an einer in dem Tunnel verstellbaren Platte gemessen, auf der die Druckdosen P1 bis P7 und ausserdem noch die Beschleunigungsmesser B1 bis B5 angeordnet waren (Abb 2). Ausserdem ist in diese Abbildung das Koordinatensystem eingetragen, das bei der Darstellung der Ergebnisse verwendet wurde.

Bei den benutzten Propellern Nr. 1240 (Z=3), 1241 (Z=4), 1242 (Z=5) und 1283 (Z=3) mit den Flächenverhältnissen $A_e/A_o = 0,74; 0,72; 0,70$ und $0,77$ handelt es sich um Verstellpropeller für Marinefahrzeuge mit einem Durchmesser von 240 mm, deren weitere Daten in /10/ angegeben sind. Beim Propeller 1283 ist die Zirkulationsverteilung der Flügel annähernd optimal, während bei den übrigen die maximale Zirkulation, die der Belastung des Flügels in radialer Richtung entspricht, nach innen gezogen ist. Das verwendete axiale Nachstromfeld (vgl. /12/ Abb. 2) mit einer mittleren nominellen Nachstromziffer von $w = 0,02$ wurde an dem im Masstab $\lambda = 12,29$ hergestellten Modell eines Marinefahrzeuges aufgemessen.

Die ausführlichen Propellerdaten des verwendeten Handelsschiffpropellers 1654 mit $D = 252,63$ mm und dem Flächenverhältnis $A_e/A_o = 0,55$ und dem Modellmasstab $\lambda = 19$ finden sich in /11/. Ebenso ist dort das für diesen Propeller verwendete Nachstromfeld angegeben, das durch eine mittlere nominelle Nachstromziffer von $w = 0,36$ gekennzeichnet ist.

Zur Versuchsdurchführung ist folgendes zu bemerken:

Bei den Druckschwankungs- und Kavitationsversuchen in homogener Zuströmung wurde für jeweils eine Fortschrittsziffer J stufenweise unter Vorgabe der jeweiligen Kavitationszahl $\sigma_{VA} = (p - p_v) / \rho V_A^2 / 2$ der Druck abgesenkt, wobei die kleinste Kavitationszahl für die Geschwindigkeit $V = 29,5$ km der Grossausführung gilt. Auf jeder Stufe, d.h. für die jeweilige Kavitationszahl und Fortschrittsziffer J wurden Schub- und Drehmoment gemessen und meist auch photographische Aufnahmen gemacht.

Bei den im eingeregelter Nachstrom ausgeführten Versuchen wurde analog vorgegangen, nur mit dem Unterschied, dass für die Bestimmung des vorzugebenden Druckes die Beziehung $\sigma_{VA} = \sigma_n \cdot \frac{(\pi/J)^2}{(p - p_v)}$ zwischen den beiden Kavitationszahlen σ_{VA} und $\sigma_n = \frac{1}{(\rho/2) \cdot (\pi n D)^2}$ benutzt wurde (vgl. in /11/ S. 426 bzw. S.6 des entsprechenden Sonderdruckes, der hier beigelegt wurde). Für die Bestimmung der Fortschrittsziffer J wurde die Schubidentität benutzt.

Bevor über die Ergebnisse der Versuche im Kavitationstunnel berichtet wird, soll noch kurz auf die zu benutzenden Modellgesetze eingegangen werden, deren Anwendung häufig als völlig klar angesehen wird, die bei Druckschwankungsversuchen mit Kavitation jedoch einer weitergehenden Betrachtung bedarf.

Die Verwendung geometrisch ähnlicher Propeller und das Fahren im überkritischen Reynolds-Zahlenbereich von $R_n = 3,2 \cdot 10^5$ wird vorausgesetzt. Bei Kavitationsversuchen in homogener Zuströmung ist als Versuchsvorschrift nach Lerbs verlangt (/6/ Seite 36, 37 und 45), dass bei dem auf die Propellerwellenmitte bezogenen Druck die Kavitationszahlen sowie die Fortschrittsziffern von Modell und Grossausführung gleich sind. Benutzt man ausserdem das Froude'sche Gesetz, so sind für alle Radien und Stellungen des betrachteten Propellers die Kavitationszahlen richtig eingehalten (/6/ Seite 36).

In einer späteren Arbeit /7/ weist Lerbs dann darauf hin, dass die örtlichen Kavitationszahlen von Modell und Grossausführung bei Abweichung (vgl. /7/ S. 11) vom Froude'schen Gesetz für bestimmte Winkelstellungen des Flügelblattes eine Differenz aufweisen, während die Mittelwerte der Kavitationszahlen für eine Umdrehung noch gleich bleiben. Die noch zuzulassenden Abweichungen der Froude-Zahlen werden in (/7/ Abb. 20) angegeben. Bedenkt man, dass Lerbs das Einhalten des Froude'schen Gesetzes für Modellversuche als massgebend erklärt hat, bei denen die stationären Schübe und Momente bestimmt werden, so muss daraus geschlossen werden, dass die Einhaltung dieses Gesetzes viel wichtiger bei denjenigen Versuchen ist, bei denen instationäre Vorgänge behandelt werden, wie es die hier zu besprechenden Druckschwankungsversuche sind. Die Erfüllung des Froude'schen Gesetzes stellt also sicher, dass an allen Stellen des Nachstromfeldes die richtige Kavitationszahl herrscht und dass die zeitliche Änderung der Kavitationsblasen annäherungsweise ähnlich zur Grossausführung erfolgt. Das letztere würde ausserdem die Erfüllung des Weber'schen Ähnlichkeitsgesetzes erfordern, das aber wahrscheinlich ohne Einfluss ist (vgl. /7/ S. 21 und S. 36). Auch die Einhaltung der richtigen Versuchsvorschrift für die zeitliche Änderung des Spitzenwirbels bzw. seine niederfrequenten Schwingungen sollte durch die Benutzung des Froude'schen Gesetzes ermöglicht werden. Das Nichtbeachten dieser Versuchsvorschrift dürfte höchstwahrscheinlich der Grund dafür sein, dass man bei unterschiedlichen Drehzahlen, wie sie in /8/ im Nachstromfeld mit $n = 20$ und $n = 30$ Hz benutzt wurden, zu unterschiedlichen dimensionslosen Druckamplituden K_p kommt.

Auf die Arbeit von van Oossanen und van der Kooy /8/ wird später noch im Zusammenhang mit den Ergebnissen im Nachstromfeld eingegangen. Um jedenfalls die Versuchsvorschrift des Froude'schen Gesetzes bei den Druckschwankungsversuchen mit Kavitation im Nachstromfeld sicherzustellen, wurde für die Propeller 1283, 1240 bis 1242 eine Modelldrehzahl von $n = 22$ Hz benutzt. Bei Versuchen in homogener Zu-

strömung betrug die Drehzahl $n = 25$ Hz. Leider konnte wegen zu kleiner Momente und Schübe bei dem Handelsschiffpropeller 1654 /11/ die Froude'sche Drehzahl nicht eingehalten werden, die etwa bei $n = 10$ Hz lag. Benutzt wurde die Drehzahl $n = 25$ Hz. Die einmal vorgegebenen Drehzahlen werden in dem mittleren Tunnel der HSVA automatisch konstant gehalten.

Wie sehen nun die Messsignale aus, die mit den oben beschriebenen Versuchseinrichtungen erhalten wurden ? In der Abb. 3 sind drei typische Messschriebe von Druckamplituden und Beschleunigungen wiedergegeben. Durch den oben auf dem Schrieb angegebenen Drehzahlkontakt sind die Blattfrequenzen der Druckamplituden des dreiflügeligen Propellers P 1283 und des fünfblügeligen P 1242 leicht zu erkennen. Die Bestimmung der Druckamplituden aus den Messsignalen erfolgte auf elektronischem Wege (vgl. /12/).

3. Ergebnisse für homogene Zuströmung mit Kavitation

Erste Ergebnisse für homogene Zuströmung seien in der Abb. 4 betrachtet. Das Bild enthält für den Propeller P 1283 fünf verschiedene Diagramme übereinander, die für verschiedene Fortschrittsziffern $J = \frac{V_A}{nD}$ gelten. Aufgetragen sind über der Längsrichtung x/R (vgl. das Koordinatensystem in Abb.2) die dimensionslosen Druckamplituden

$$K_{pz} = \frac{\Delta p}{\rho n^2 D^2}$$

der harmonischen Flügelordnung bezogen auf eine Umdrehung. Hierbei sind:

- Δp = Druckamplituden in kp/m^2
- ρ = Dichte des Wassers $102 \frac{\text{kp} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4}$
- n = Drehzahl in Hz
- D = Propeller Durchmesser in m
- Z = Propellerflügelzahl

Die jeweils dick ausgezogene Kurve gilt für den nicht kavitierenden Zustand. Er ist mit ATM bezeichnet, da dann der Tunnel zum atmosphärischen Druck Verbindung hatte. Die gestrichelten Kurven gelten für die 6 gefahrenen Kavitationszahlen σ_{VA} .

In der nächsten Abbildung (Abb.5) sind Ergebnisse des fünf-flügeligen Propellers P 1242 angegeben. Genauso wie die Saugseitenkavitation (z.B. bei $J = 0,66$ und $\sigma_{VA} = 2,00$) für alle Druckdosen eine gleichmässige Amplitudenerhöhung bewirkt, ergibt sich durch die Druckseitenkavitation (vgl. das Kavitationsdiagramm in Abb. 7 oben) infolge ihres Verdrängungseffektes eine Vergrösserung der Druckamplituden.

Die beiden zuletzt besprochenen Abbildungen 4 und 5 gelten für den Spitzenabstand $a/R = 0,352$ (a = Abstand Propellerspitze-Aussenhaut; R = Propellerdurchmesser), welches der Freischlag der für diese Untersuchungen zugrunde gelegten Marinefahrzeuge ist. In dem ausführlichen Bericht /12/ sind weiterhin Ergebnisse für die Propeller P 1283 und P 1240 bis 1242 enthalten, die für weitere vier Spitzenabstände bei der Entwurfsfortschrittsziffer $J = \frac{V_A}{nD} = 0,803$ und den jeweiligen Entwurfssteigungen in homogener Zuströmung gelten. Aus der Tabelle 1 des Anhanges ergibt sich eine Zusammenstellung der systematischen Ergebnisse von Druckamplituden für homogene Zuströmung, die in der Veröffentlichung /12/ enthalten sind.

Die bei dem entsprechenden Forschungsvorhaben verwendeten Marinepropeller sind mit ihren Ergebnissen für homogene Zuströmung in der Abb. 6 für die Druckdose auf Position 3 (direkt über dem Propeller) verglichen worden.

Der oben in den Abb. 4 und 5 schon gezeigte Amplitudenabfall, der insbesondere in den Diagrammen für kleine Fortschrittsziffern J und σ_{VA} zu sehen war, wird auch in dieser Abb. 6 für Propeller 1283 bei $J = 0,72$ und $\sigma_{VA} = 1,50$ deutlich. Der Vergleich der 4 Propeller für jeweils eine Druckdose direkt über dem Propeller lässt deutlich werden, dass die Abweichung der Druckamplituden bei Kavitation von denen des kavitationsfreien Zustandes bestimmt wird von der jeweiligen Ausdehnung der Kavitation. Daher sind in der Abb. 7 die Kavitationsdiagramme zweier betrachteter Propeller (in /12/ auch die der beiden weiteren Propeller) angegeben. Es fällt hierbei in Abb. 7 auf, dass der kavitationsfreie Bereich des Propellers 1242 grösser ist als der des Propellers 1283. Dem entsprechend tritt bei Propeller 1242 in Abb. 6 auch nur eine kleine Amplituden-Abweichung vom atmosphärischen Zustand auf, also bei $\sigma_{VA} = 3,0, 2,0, 1,75$ und $1,5$ kleine Erhöhungen, bei $\sigma_{VA} = 1,14$ kleine Erniedrigungen. Anders verhält es sich beim Propeller 1283: Für $\sigma_{VA} = 1,50, 1,25$ und $1,14$ treten

ab $J = 0,72$ starke Amplitudenverkleinerungen gegenüber $\sigma_{VA} \hat{=} \text{ATM}$ auf. Wie das Kavitationsdiagramm (Abb. 7 unten) zeigt, liegt der eben genannte Bereich ($J = 0,75$ und $\sigma_{VA} = 1,50$ bis $1,14$) im Bereich der Vollkavitation. An dieser Stelle stellt sich fast automatisch die Frage nach den Ursachen der Druckamplituden-Verringerung, der im nächsten Unterabschnitt nachgegangen werden soll.

3.1. Druckamplitudenabfall durch Schubabfall

Um zu versuchen, den in den vorhergehenden Abbildungen (4 und 5) in und vor der Propellerebene festgestellten Abfall der Druckamplituden bei Kavitation gegenüber dem kavitationsfreien Strömungszustand zu erklären, wurden in Abb. 8 für Propeller 1283 das Kavitationsdiagramm, ferner das während der Druckschwankungsmessungen erstellte Freifahrttdiagramm mit den K_T - und K_Q -Werten und ausserdem zwei Amplitudendiagramme übereinander gezeichnet. Die Ähnlichkeit zwischen dem Freifahrttdiagramm und dem K_{p3} -Diagramm ist abgesehen von den Druckamplituden-Erhöhungen durch den Verdrängungseffekt auffallend. Genauso wie, z.B. für $J = 0,72$ bei einer Druckabsenkung im Tunnel von atmosphärischem Druck auf den Kavitationsdruck entsprechend $\sigma_{VA} = 1,14$, der K_T - Wert sinkt, fällt auch die dimensionslose Druckamplitude K_{p3} ($n = 25 \text{ Hz} = \text{konstant}$). Macht man die gemessene Druckamplitude Δp durch den Schub pro Propellerfläche $\frac{T}{\pi R^2}$ dimensionslos, der ebenfalls kleiner wird, so ist der Abfall geringer. Dass der Abfall nicht verschwindet, erklärt sich wohl dadurch, dass durch die Kavitation die äusseren Flügelteile stark, die inneren schwach oder nicht entlastet werden. Da für die Druckschwankungen hauptsächlich die äusseren, für den gesamten Schub jedoch alle Flügelteile massgebend sind, kann erwartet werden, dass bei starker Kavitation das Verhältnis $\Delta p / \left(\frac{T}{\pi R^2} \right)$ kleiner ist als ohne Kavitation. Die Abb.9 zeigt die entsprechenden 6 Fotos für $J = 0,72$ der in 6 Stufen verkleinerten Kavitationszahl σ_{VA} .

In dem hier interessierenden Zusammenhang des Schubabfalls mit der Kavitation ist auf die bekannten Messungen von Profilpolaren an Kreisabschnittprofilen von Walchner (/9/ S.256) zu verweisen. Hieraus geht hervor, dass im Kavitationsgebiet der Auftrieb stark abfällt. Diese Versuchsergebnisse stimmen mit einer von Betz abgeleiteten Formel für den Auftriebsbeiwert bei vollausgebildeter Kavitation überein (/9/ S. 256 Fig.6). Sie lautet: $c_L = \frac{\pi}{2} \cdot \alpha + \sigma$ (α = Anstellwinkel und σ = Kavitationszahl). Danach nimmt der Auftrieb mit kleiner werdender Kavitationszahl linear ab. Die Druckschwankung ist jedoch aus zwei Anteilen zusammengesetzt, dem Verdrängungs- und dem Lastanteil. Dieser letzte Anteil entspricht dem Auftrieb. Bei Kavitation ist mit einer Entlastung der Flügelspitzen oder sogar des gesamten Propellers zu rechnen. D.h., der Verdrängungsanteil der Druckschwankungen wird zu-, der Lastanteil abnehmen. Bei starker Kavitation kann augenscheinlich der letzte Effekt überwiegen. Das dürfte die Erklärung für die in den besagten Diagrammen festgehaltene Druckamplitudenverringering bei zunehmender Kavitation sein. Auch in der bisher bekannten Literatur ist dieser Effekt enthalten. Ihm wurde aber wegen der hauptsächlich im Bereich der beginnenden Kavitation liegenden Propeller, bei denen der Dickeneffekt stärker ins Gewicht fällt, keine Beachtung geschenkt, bzw. die hier angeführte Interpretation wurde nicht herangezogen. So findet sich der Amplitudenabfall zuerst in /1/ Fig.29, dann in /2/ Fig.28-oben und /8/ Fig.33 und 34. Es ist vorstellbar, dass bei schnellen Einschraubenschiffen dieser Effekt der Druckschwankungsverringering infolge von stark ausgebildeter Kavitation während des Durchschlagens der Flügelspitzen durch das Gebiet hohen Nachstromes gleichfalls bedeutsam werden kann.

Um keine Irrtümer aufkommen zu lassen und um auf den Unterschied zu den Ergebnissen von Frachtschiffpropeller hinzuweisen: Dieser Effekt der Amplitudenverringering spielt nur bei ausgeprägter Kavitation eine Rolle, bei der grosse Teile der Saugseite (Abb.9C) von Schichtkavitation bedeckt sind.

3.2. Amplitudenvergrößerung durch den Randwirbel

Bereits in der Abbildung 9 fällt der immer grösser werdende Durchmesser des Randwirbels auf. Weiterhin sind in Abb.7 in das Kavitationsdiagramm der Schraube 1283 die visuell abgeschätzten Durchmesser des Randwirbels eingetragen. Vergleicht man das den Fotos in Abb.9 entsprechende Diagramm für $J = 0,72$ in Abb.4, so fällt der Anstieg der Amplituden hinter der Propellerebene für die Druckdose P4 ($x/R = 0,25$) auf.

Eine weitere Beobachtung, die aus den Fotos der Abb.9 hervorgeht, verdient, beachtet zu werden: Mit kleiner werdender Kavitationszahl beginnt der Randwirbel, sich zunächst einzuschnüren. Danach werden die Abstände der Einschnürung von der Flügelspitze grösser. Bei $\sigma_{VA} = 1,75$ liegt eine Einschnürung vor der oberen Kontur der Propeller-Ablaufspitze im Fotohintergrund, bei $\sigma_{VA} = 1,14$ an der unteren Kontur (vgl. Pfeile). Für $\sigma_{VA} = 1,75$ und $J = 0,72$ beträgt der Winkel zwischen zwei Einschnürungen und der Wellenmitte 60° ; gemessen wurde er mit der Winkelmesseinrichtung eines Strobokops. Interessanterweise wird für diesen Strömungszustand die 6. harmonische Ordnung der Druckamplituden besonders gross. Für die Druckdose an Pos.5 wird sie doppelt so gross wie die dritte harmonische Ordnung. Das geht anschaulich aus Abb.10 hervor, in der die Druckamplituden bis zur 10. harmonischen Ordnung für alle Druckdosen und untersuchten Kavitationszahlen der Fortschrittsziffer $J = 0,72$ angegeben sind. In Abb.3 ist der Messchrieb für $J = 0,72$ und $\sigma_{VA} = 1,75$ (Kav.Vers.Nr.85) gezeigt, wobei in diesem Zusammenhang die Druckdose P5 interessant ist. Genauso wie in dem Messchrieb der Abb.3 für $J = 0,72$ und $\sigma_{VA} = 1,75$ bei den Druckdosen der Positionen 4 und 5 die sechste harmonische Ordnung im Gegensatz zu den Positionen 1 bis 3 beginnt hervorzutreten, kann man auch in der Abb.10 an Pos.4 und 5 das Ansteigen dieser Komponente hinter der Propellerebene erkennen. Das Hervortreten höherer harmonischer Druckanteile deutet nach dem

bisher Gesagten auf Einschnürungen des Randwirbels als Ursache für die höher frequenten Druckanteile. Es besteht hiernach der Anschein, als ob es ganz bestimmte, bevorzugte Strömungszustände gäbe, bei denen neben der Komponente der Blattfrequenz auch höhere harmonische Ordnungen des Druckes infolge der Einschnürungen des Randwirbels auftreten, mit anderen Worten: Der Randwirbel kann sowohl zu höheren harmonischen Druckanteilen führen, z.B. Abb.10, Pos. 5, $\sigma_{VA} = 1,75$, $m = 6$, als auch zur Erhöhung der Amplitude der Blattfrequenz, z.B. Abb.10, Pos. 5, $\sigma_{VA} = 1,14$, $m = 3$. Hierbei ist der Vergleich der Fotos $\sigma_{VA} = 1,75$ u. $\sigma_{VA} = 1,14$ in Abb. 9 interessant: An der unteren Kante der Ablaufspitze ist für $\sigma_{VA} = 1,75$ eine Verdickung des Randwirbels und für $\sigma_{VA} = 1,14$ eine Einschnürung (Pfeil) zu erkennen. Jedenfalls bleibt es nach Berücksichtigung dieser Fotos in Abb. 9 und der Amplituden in Abb. 10 vorstellbar, dass ein derartig dicker (ca. 7% vom Propellerdurchmesser) und in sich eingeschnürter Randwirbel durch einen weiteren Verdrängungseffekt - nämlich neben dem Verdrängungseffekt des durch Kavitation verdickten Profils - wesentliche Druckamplituden verschiedener Frequenz erzeugt. Weitere Untersuchungen über diesen physikalischen Mechanismus erscheinen wünschenswert.

Weiterhin sei hierzu bemerkt, dass bei den Propellern mit nach innen gezogener Zirkulation, die also bewusst im Hinblick auf die Unterdrückung des Randwirbels entworfen sind, die höheren harmonischen Druckanteile bedeutend schwächer als bei Optimal-Propellern auftreten, und gerade durch diesen Unterschied zwischen Optimal- und Propellern mit nach innen gezogener Zirkulation bzw. zwischen Auftreten und Nichtauftreten des Randwirbels wird sein Einfluss klar. Dementsprechend ist in den Ergebnissen der Abb.5 für die Schraube P1242 hinter der Propellerebene im Falle von Kavitation nur ein verschwindender Anstieg der Druckamplituden feststellbar, der im Gegensatz zur Abb.4 des Normalpropellers 1283 steht.

Immerhin wäre nach den obigen Ausführungen für das verstärkte Hervortreten höherer harmonischer Druckkomponenten bei Grossausführunsmessungen eine Erklärung gegeben, wenn man den Randwirbel von Optimal-Propellern als Ursache hierfür ansieht. Im Schiffbau bedeutungsvoll wären diese höheren Druckkomponenten des Randwirbels dann, wenn man sie als Erregerquelle für Vibrationen ansieht, die zu Schäden im Hinterschiffsbereich über den Propellern führten. Für derartige Schadensfälle waren Erregerquellen nicht ohne weiteres vorstellbar, zumal die Eigenfrequenzen der beschädigten Konstruktionen oftmals höher als die Impulszahl (Drehzahl mal Flügelzahl) lagen.

4. Ergebnisse von Druckschwankungsamplituden bei

Kavitation im Nachstromfeld

4.1. Systematische Ergebnisse bei Kavitation im Nachstromfeld für Propeller von Spezialfahrzeugen

Wie bereits unter Punkt 2. (Versuchsdurchführung) angedeutet wurde, mussten die HSVA-Versuche für die Propeller der Marine-Fahrzeuge /12/ im einregulierten axialen Nachstromfeld wegen des auftretenden Schubabfalls (vgl. Abb.8 K_T - und K_Q -Diagramm) prinzipiell genauso durchgeführt werden wie die Versuche bei homogener Zuströmung. Es musste also ein Feld von Versuchspunkten gefahren werden, das den möglichen Betriebspunkt einschliesst. Der Schubabfall bei Kavitation geht deutlich aus der Abb.11 hervor, wenn man bei konstanter Fortschrittsziffer J die Abnahme des K_T -Wertes vom kavitationsfreien Zustand (dick ausgezogene Kurve für $\sigma_{VA} \hat{=} ATM$) bis zum kavitierenden Zustand (z.B. $\sigma_{VA} = 1,14$) für einen Propeller verfolgt. Die zu den Zuständen der Abb.11 gehörigen Druckamplituden direkt über dem jeweiligen Propeller (Druckdose auf Position 3) gehen aus der Abb.12 hervor. Sie ist direkt mit der Abb.6 für homogene Zuströmung vergleichbar. Neben dem Anstieg der Amplituden im Nachstrom gegenüber denen der Freifahrt für die kavitationsfreie Strömung fällt auf, dass die gleichen Effekte, wie z.B. der Amplitudenabfall- oder Anstieg im Nachstrom bereits bei gleicher Fortschrittsziffer viel stärker auftreten. Es sei betont, dass die instationäre Kavitation, die Huse /3/ Volumenänderungskavitation nennt, im Nachstrom zusätzlich gegenüber der homogenen Zuströmung auftritt.

So wie die Ergebnisse der beiden letztgenannten Abbildungen für den Spitzenabstand $a/R = 0,352$ gelten, welches der Abstand der den Untersuchungen zugrunde gelegten Fahrzeuge ist, beziehen sich auch alle übrigen Ergebnisse im Nachstrom in /12/ auf diesen Abstand. Eine Übersicht über die übrigen Ergebnisse im Nachstrom mit diesem Abstand $a/R = 0,352$ ist in der Tabelle 2 des Anhanges angegeben.

4.2. Systematische Ergebnisse bei Kavitation im Nachstromfeld für Frachtschiffpropeller

Derartige Messungen von propellererregten Druckschwankungen sind von van Oossanen und van der Kooy /8/ vorgelegt worden. Die Versuche sind mit neun Propellern der Wageninger B-Serie ausgeführt worden. Die Flügelzahl wurde von $Z=3$ ($\frac{A_E}{A_0}=0,65$) bis $Z=7$ ($\frac{A_E}{A_0}=0,85$) variiert, das Flächenverhältnis von $\frac{A_E}{A_0} = 0,4$ bis $1,0$ bei konstanter Flügelzahl $Z=4$. Das Steigungsverhältnis betrug bei allen Propellern $\frac{P}{D} = 1,0$. An drei Positionen wurden die Druckamplituden gemessen. Diese sind aus der Abb.13 zu entnehmen. Danach ergeben sich von der Propellerspitze die folgenden auf den Propellerradius R bezogenen Abstände:

Druckdose	senkrecht	in Schiffslängensrichtung nach vorn
Vordere (Forward pressure pick-up)	$a/R=0,36$	$x/R = 0,608$
Mittlere (Middle pressure pick-up)	$a/R=0,50$	$x/R = 0,317$
Hintere (Aft pressure pick-up)	$a/R=0,64$	$x/R = 0,025$

Dieser Abbildung entnimmt man ferner, dass zur Simulierung des axialen, tangentialen und des radialen Nachstroms eine Hinterschiffsattrappe (neben zusätzlichen Drahtsieben) in den Kavitationstunnel eingebaut wurde. Der mittlere axiale Nachstrom, der der Schiffsförm eines grossen Einschraubentankers

entspricht, betrug ca. $w = 0,40$. In der vorliegenden Abb.14 sind die vollständigen Resultate aus /8/ wiedergegeben worden. Es sind hierin zwei Gruppen von Ergebnissen zu unterscheiden und zwar die für die Variation der Flügelzahl (linker Teil der Abbildung) und die Variation des Flächenverhältnisses. Die eingehaltenen Schubbeiwerte $K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$ und die eingehaltenen, auf die Drehzahl bezogenen Kavitationszahlen $\sigma_n = \frac{P_0 - P_v}{\rho/2 n^2 D^2}$ gehen aus den Diagrammen hervor. Ausserdem sind die dimensionslosen Druckamplituden $K_p = \frac{\Delta p}{\rho n^2 D^2}$ der ersten harmonischen Ordnung der beiden Ergebnisgruppen für die jeweils drei verwendeten Druckdosen angegeben.

Auffällig an den Ergebnissen ist die Tatsache, dass sich für gleiche Kavitationszahlen $\sigma_n = 2,5$ unterschiedliche Druckamplituden K_p ergeben haben. Hierfür ist in /8/ keine einleuchtende Erklärung gegeben. Möglicherweise ist das Nichteinhalten der Froude'schen Drehzahl, wie unter Punkt 2 ausgeführt wurde, der Grund für diese Diskrepanz. Übrigens ergeben sich für den Fall ohne Kavitation in homogener Zuströmung bei unterschiedlichen Drehzahlen gleiche dimensionslose Druckamplituden K_p (vgl. Tabelle A.2.1 im Anhang 2 von /12/). Die weiteren wichtigen Ergebnisse dieses Berichtes /8/ entsprechend den dortigen Folgerungen sind:

Der absolute Anstieg der Druckamplituden infolge von Kavitation ist praktisch von der Flügelzahl unabhängig. Die maximalen Amplituden werden bei Kavitation nach hinten verschoben. In /8/ wird keine Erklärung hierfür gegeben. Doch dürfte es sich dabei um den Einfluss des Lastanteil bzw. des Drucksprunges der Druckschwankungen handeln, der bei starker Kavitation infolge des Schubabfalles abnimmt, während der Einfluss des Randwirbels zunimmt.

Als weiteres Ergebnis aus /8/ wird eine Verschiebung der Phasen, was übrigens auch in /2/ und /12/ bemerkt wurde, derart festgestellt, dass bei Kavitation alle Messtellen

einen Phasenwinkel von ähnlicherer Grösse haben als ohne Kavitation. Das hat bei der Integration der Drücke über die Schiffsoberfläche grössere Kräfte zur Folge.

Der Wert dieser Untersuchungen /8/ aus Wageningen besteht trotz der nicht berücksichtigten Versuchsvorschrift des Froude'schen Gesetzes und der damit verbundenen eingeschränkten Übertragbarkeit auf die Grossausführung darin, dass es sich hierbei um Versuchsergebnisse mit der grossen Anzahl von neun typischen Frachtschiffpropellern handelt, deren propellererregte Druckschwankungen im Nachstrom eines völligen Frachtschiffes untersucht worden sind.

Der etwa zur gleichen Zeit bekannt gewordene Bericht von Huse /2/ stellt insofern eine Ergänzung dar, als er die in /8/ fehlende Variation des senkrechten Spitzenabstandes c (oben mit a bezeichnet) für die Flügelzahl $z = 4$ enthält. Dadurch ergibt sich allerdings, da der Modellpropeller hinter einer Hinterschiffsattrappe angeordnet war, eine Variation in der Nachstromziffer w . Hiermit soll nicht gesagt sein, dass allein die mittlere axiale Nachstromziffer w für die Grösse der Druckamplituden massgebend wäre, auch die Nachstromverteilung über den Umfang spielt eine Rolle.

In Abb. 15 (nach /2/ Fig.20) ist das Hinterschiff-Modell mit der Lage der Druckdosen, wie sie im Kavitationstunnel gewählt wurde, zu erkennen. Auch die vier verschiedenen Anordnungen des Propellers mit den sich daraus ergebenden Spitzenabständen c gehen aus der Abbildung hervor. Zu den vier Abständen gehören die folgenden mittleren nominellen axialen Nachstromziffern $w = \frac{V - V_A}{V}$:

c/D	0,07	0,22	0,37	0,62
w	0,26	0,21	0,17	0,10

Der verwendete Propeller P 548 hat ein Flächenverhältnis von $\frac{A_E}{A_0} = 0,60$ und eine Steigung von $\frac{P_{0,7}}{D} = 1,08$ bei einem Durchmesser von $D = 191,1$ mm.

Die Versuche wurden für die vier folgenden Kombinationen der Fortschrittsziffer $J = \frac{V_A}{n \cdot D}$ mit der Kavitationszahl

$$\sigma_o = \frac{p_o - p_v}{\frac{1}{2} (V_A^2 + (0,7\pi n D)^2)}$$

durchgeführt:

J	0,42	0,59	0,84	1,09
σ_o	0,388	0,538	0,765	0,790

Dabei bedeuten

- V_A = mittlere Propellereintrittsgeschwindigkeit
- p_o = statischer Tunneldruck der ungestörten Strömung
- p_v = Dampfdruck entsprechend der Temperatur des Tunnelwassers

Die Abbildungen 16 und 17 (aus /2/ Fig.26 und 27) zeigen die dimensionslosen Druckamplituden $c_{pc} = \frac{\Delta p}{\rho n^2 D^2}$ für die vier Druckaufnehmer T1 bis T4 und für die o.g. vier Spitzenabstände c/D . Es sollte festgehalten werden, dass für die vier J-Werte jeweils verschiedene Kavitationszahlen verwendet worden sind, die gezeichneten Kurven also nicht zu einem konstanten Parameter σ_o gehören. Deutlich geht aus diesen beiden Abbildungen hervor, wie die Druckamplituden mit grösser werdendem Spitzenabstand abnehmen. Dieser Effekt der Abnahme der Druckamplituden bei grösser werdendem Abstand c/D und der Nachstromziffer (auch über den Umfang) ist somit sicherlich durch zwei Ursachen beeinflusst. Auch der im folgenden noch auftauchende Unterschied der Druckamplituden zwischen der Steuer- und der Backbordseite ist in den beiden Abbildungen feststellbar. Neben diesen experimentellen Ergebnissen enthält der Bericht vor allem als das Wichtigste die Ergebnisse von Berechnungen instationärer Kavitation. Diese wird bei Huse cavity-volume variation = Volumenänderungskavitation genannt. Diese Art der Kavitation führt zu den wesentlichsten Amplitudenvergrößerungen gegenüber dem kavitationsfreien Zustand. Zusätzlich ist in

/2/ der Einfluss des Spitzenwirbels mit einer Dicke von 1,2 % des Propellerdurchmessers berechnet. Er ist für das angenommene Strömungsmodell eines unendlich langen Schlauches gering. Das ist bei dickeren (ca. 7% vom Propellerdurchmesser, vgl. Kap. 3.2.) und dabei sich regelmässig im Durchmesser ändernden Randwirbeln jedoch anders.

Auch bei den von Huse /2/ vorgelegten Modellversuchen mit den vier verschiedenen Spitzenabständen c/D wurde die Versuchsvorschrift des Froude'schen Gesetzes nicht berücksichtigt.

4.3. Druckschwankungsergebnisse unter Berücksichtigung des Betriebspunktes bei Kavitation im Nachstromfeld

Vergleiche von Druckamplituden verschiedener Propeller sollte man möglichst für ihren jeweiligen Arbeitspunkt vornehmen. Gilt dieses auch für die Frachtschiffpropeller der Wageninger B-Serie in /8/, so wird die Frage nach dem Arbeitspunkt besonders wichtig, wenn durch starke Kavitation ein Schubabfall auftritt. Daher war im Falle der Marinepropeller in /12/ der sich einstellende Betriebspunkt durch Interpolation zu finden. Hierbei wird in dimensionslosen Diagrammen der Schiffswiderstand dem Schub der einzelnen Propeller bei Kavitation gegenübergestellt. Die gefundenen Daten (J und σ_{VA}) des Betriebspunktes wurden am Rande der hier als Beispiel gezeigten Abb.18 für die vier zu vergleichenden Propeller angegeben. Das Diagramm zeigt die dimensionslosen Druckamplituden K_{pz} für die Betriebspunkte der Entwurfssteigungen bei einer Geschwindigkeit von $V = 28 \text{ kn}$ ($\sigma_{VA} = 1,28$). Zu Vergleichszwecken sind die Druckamplituden ohne Kavitation (dünn gestrichelte Kurve) für jeweils gleiche Fortschrittsziffern J eingetragen. Die bisher bekannten Kurvenverläufe der Druckamplituden in Längsrichtung mit den Maxima vor der Propellerebene werden durch das Auftreten der Kavitation völlig verändert!

Es ist in diesem Falle sinnvoll, die dimensionslosen Druckamplituden von den Drehzahlen unabhängig zu machen, die wegen der unterschiedlichen Steigungen der Propeller verschieden sind. Daher sind ausserdem die dimensionslosen Druckamplituden

$$v_z^* = \frac{\Delta p}{(\rho/2) \cdot V_A^2} \quad \text{verglichen worden, die auf die für}$$

alle Propeller bei $V = 28 \text{ kn}$ gleiche Anströmungsgeschwindigkeit V_A bezogen sind. Auch bei dieser Gegenüberstellung (in /12/ Abb.38) weist der fünfblügelige Propeller P 1242 Vorteile auf. In der folgenden Abb.19 sind dann die photographischen Aufnahmen zusammengestellt, die zu dem Vergleich "Gleiche Geschwindigkeit" (Abb.18) gehören. Dabei fehlt leider die Aufnahme für Propeller 1240 wegen eines technischen Fehlers. Auffällig ist noch einmal das Auftreten eines Randwirbels bei Propeller 1283 gegenüber seiner Unterdrückung bei den anderen beiden Schrauben. Der aufgetretene Randwirbel wird im Bereich höheren Nachstromes, also in der Gegend der 12oUhr-Flügelstellung, deutlich dicker als im nachstromfreien Strömungsfeld.

5. Vergleiche von Modell- und Grossausführungsmessungen

Inwieweit Überlegungen und Untersuchungen zu Modellversuchen richtig sind, kann letztlich nur durch einen Vergleich mit der Grossausführung überprüft werden. In Abb.20 ist eine derartige Gegenüberstellung für einen der Marine-Propeller gewagt worden, wobei es sich um die Messtelle direkt über dem Propeller (Pos. 3, $x/R = y/R = 0$) handelt. Die Werte der Grossausführung stammen aus Messungen des Battelle-Institutes. Berücksichtigt man die Empfindlichkeit der Druckamplituden (z.B. Abb.12) innerhalb eines an sich kleinen Feldes von $0,72 \leq J \leq 0,84$ auch gegenüber der Kavitationszahl σ_{VA} , so darf man bei Grossausführungsmessungen mit ihren messtechnischen Widrigkeiten zufrieden sein, wenn diese Gegenüberstellung eine tendenzmässige Übereinstimmung ergibt. Das ist hier der Fall, wobei ausserdem noch hervorzuheben ist, dass bei den Modellversuchen keine Schräganströmung vorhanden war.

Bevor ein weiterer Vergleich von Modell- und Grossausführungswerten gezeigt wird, soll für diesen zu betrachtenden Fall aus /11/ die Gegenüberstellung von Druckamplituden und K_T - und K_Q -Werten in Abb.21 gebracht werden. Im Falle dieses Handelsschiffpropellers 1654 werden die stationären Schub- und Drehmomentenbeiwerte im Gegensatz zu den Marinepropellern (Abb.11) nicht beeinflusst, wie aus dem unteren Teil der Abb.21 hervorgeht. Der starke Anstieg der dimensionslosen Druckamplituden K_{p4} für die Druckdose P6 (Numerierung nach Abb.2) mit kleiner werdender Fortschrittsziffer J und kleiner werdender Kavitationszahl σ_{VA} ist dadurch zu erklären, dass die Kavitation zu einer vergrösserten instationären effektiven Dicke des Propellerflügels führt. Die Beobachtungen im Kavitationstunnel und die dazugehörigen Fotos haben das klar gezeigt. Als Beispiel für derartige fotografische Aufnahmen seien diejenigen für die Kavitationszahlen $\sigma_{VA} = 8,72$ bei der Fortschrittsziffer $J = 0,55$ sowie $\sigma_{VA} = 7,24$ und $\sigma_{VA} = 7,46$ bei $J = 0,625$ angeführt (Abb.22).

In der folgenden Abb. 23 ist dann für die Propellerebene (Schiffsquerrichtung) der Vergleich einiger im Rahmen der Untersuchungen erhaltenen Ergebnisse für $J = 0,55$ vorgenommen worden. Ein Ergebnis ist zunächst, dass die Amplituden im axial eingeregelter Nachstrom im Kavitationstunnel ohne Kavitation um ca. 100% über den Amplituden der homogenen Zuströmung liegen (vollausgezogene Kurven). Demgegenüber beträgt bei dem Propeller 1283 der Anstieg der Amplitude in dem Nachstrom des betrachteten Fahrzeuges ($w=0,02$) ca. 50%. Als wesentlichstes Ergebnis kann man für Bild 23 festhalten, dass bei Berücksichtigung der Kavitation die Modellwerte sich denen der flachbodigen Grossausführung nähern. Dabei ist für den Grossversuch eine Korrektur von $K_{p4} = 0,041$ auf $K_{p4} = 0,037$ vorgenommen worden, die durch die Berücksichtigung der Amplitudenüberhöhung infolge des Frequenzganges eines Ventils vor der Druckdose zu erklären ist. Für die noch vorhandene Differenz zwischen Grossversuch ($K_{p4} = 0,037$) und Modellversuch ($K_{p4} = 0,028$) mögen mehrere Gründe massgebend sein: Ein Grund könnte sein, dass nicht die axiale Nachstromverteilung des Messfahrttiefganges mit $T_h = 7,11$ m, sondern die des Tiefganges $T_h = 7,56$ m für die Einregulierung im Tunnel benutzt wurde, wobei die tangentialer Strömungsverteilung überhaupt fehlt. Ein anderer Grund ist auch hier mit grösster Wahrscheinlichkeit die Nichteinhaltung des Froude'schen Modellgesetzes im Kavitationstunnel (Propellerdrehzahl $n = 25$ Hz statt $n = 9,2$ Hz), das die Garantie für den richtigen Druckverlauf im Nachstromfeld in radialer Richtung bieten würde. Auch die Berücksichtigung eines Tunneleffektes, der möglicherweise infolge von Reflektionen zu Verfälschungen der Druckamplituden führt, könnte eine Rolle spielen. Weiterhin bereitet die Feststellung des Betriebspunktes des Propellers in der Grossausführung gewisse Schwierigkeiten, wobei vor allem die Messunsicherheit im Sinne von DIN 1319 Blatt 3 (Grundbegriffe der Messtechnik, Begriffe für die Fehler beim Messen) recht hoch anzusetzen wäre.

Die oben schon kurz erwähnte Unsymmetrie der Drücke auf der Steuer- und der Backbord-Seite bei einem rechtsdrehenden Propeller ist auch hier wieder zu erkennen. Dieser Effekt war auch bei Huse (vgl. Abb. 16 u. 17) und bei zwei weiteren dem Verfasser bekannten Grossausführungs-Messungen ("Otto Hahn" und "Abel Tasman") festgestellt worden.

Die zu der Abb.23 gehörende Verteilung von Druckamplituden in Schiffslängsrichtung für den HSVA-Propeller 1654 bei der Fortschrittsziffer $J = 0,55$ zeigt Abb.24. Auffällig ist die gleichbleibende Grösse der Druckamplituden bei Kavitation im Nachstrom hinter der Propellerebene ($x/R > 0$).

Ein anderes Ergebnis eines Vergleichs zwischen Modell- und Grossausführungsmessungen sei aus einer schwedischen Arbeit /3/ gezeigt. Dabei geht zunächst die Anordnung der Druckaufnehmer aus der Abb.25 hervor. Bei dem Vergleich der Versuchsergebnisse in Abb.26 ist zu beachten, dass der dimensionslose K_p -Wert aus der Doppelamplitude der Signale bestimmt wurde. Eine sehr gute Übereinstimmung findet man für $n = 84$ und $n = 56$ revs/min zwischen dem gefilterten Modellmittelwert und dem aus einem Energiespektrum (hier Flügelzahlordnung) der Grossausführung. Obwohl auch bei diesen Versuchen die Vorschrift des Froude'schen Modellversuches nicht eingehalten wurde, ist die Übereinstimmung bemerkenswert. Leider bleibt der Vergleich bei $n = 84$ revs/min der einzige, der überzeugt, denn bei $n = 56$ revs/min ist die Kavitation schwach und für diesen Fall gibt es schon andere gute Übereinstimmungen (z.B. /4/ Meteor). Alle weiteren Vergleiche zwischen Modell- und Grossausführungswerten (z.B. full scale, max, mit Modell max) halten einer kritischen Betrachtung nicht Stand.

6. Bewertung der Grösse von propellererregten Druckschwankungen

Ergebnisse von propellererregten Druckschwankungen sind erst dann richtig bewertet, wenn mit ihnen eine Abschätzung des eventuellen Auftretens von Vibrationen infolge der Druckfelderregung möglich wird. Das soll hier versucht werden, wobei folgendes zu bedenken ist:

Bei unterkritischer Anregung von Aussenhautkonstruktionen, die über dem Propeller liegen, ergeben sich bei weichen Elastizitäten grössere erzwungene Wege bzw. grössere in den Schiffskörper übertragene Kräfte. Diese Feststellung, die in dem noch zu besprechenden Aufsatz /13/ enthalten ist, steht im Einklang mit dem Ergebnis der Grossausführungsmessung (Abb.20), die an einem Marinefahrzeug mit leicht gebauter Aussenhaut vorgenommen wurde: Bei einer dimensionslosen Druckamplitude von $K_{p3} = 0,02$ ($\hat{\Delta p} = 600 \text{ kp/m}^2$ bei $n = 350 \text{ UpM}$) treten im Hinterschiff besonders unangenehme Vibrationen auf. Dagegen sind bei den steifer ausgeführten Hinterschiffen des Frachtschiffes "Hornmeer" (Abb.23) mit den dimensionslosen Amplituden $K_{p4} = 0,04$ ($\hat{\Delta p} = 400 \text{ kp/m}^2$ bei $n = 130 \text{ UpM}$) und des Forschungsschiffes "Meteor" (/4/ Abb.10) mit $K_{p5} = 0,030$ ($\hat{\Delta p} = 210 \text{ kp/m}^2$ bei $n = 175 \text{ UpM}$) keine lästigen Vibrationen festgestellt worden. Für das Auftreten von Vibrationen infolge von propellererregten Druckschwankungen in der Grossausführung ist also die Steifigkeit der Konstruktion bzw. ihre Reaktion (response) neben der Grösse der Druckamplituden massgebend. Solange eine eingehende theoretische Berechnung der hydroelastischen Systems "Erregende-Druckamplitude-und-darauf-reagierende-Konstruktion" nicht möglich ist, muss man sich mit Faustformeln bzw. pauschalen Grenzwerten zufrieden geben. Hierfür werden nach Berücksichtigung der von Huse (/2/ Fig.2) veröffentlichten Messwerte, die in Abb.27 wiedergegeben werden, und der bekannten Ergebnisse von M.S. "Hornmeer", F.S. "Meteor" (Schiff 3 in Abb.27), N.S. "Otto Hahn" und

der besprochenen Marinefahrzeuge (Abb.28) die folgenden Grenzwerte vorgeschlagen, bei denen mit dem Auftreten von Vibrationen infolge von Propellerdruckschwankungen kaum gerechnet zu werden braucht: Für leicht gebaute Marinefahrzeuge sollten die Amplituden ca. $K_p \approx 0,008$ ($\hat{\Delta p} = 250 \text{ kp/m}^2$ bei $D \approx 3,0\text{m}$ und $n = 350 \text{ UpM}$) sein, für übliche Frachtschiffe mit normal steifer Aussenhaut sollten die K_p -Werte ca. $0,04$ ($\Delta p \approx 400 \text{ Kp/m}^2$) sein. Diese Grenzwerte sind in die Abbildungen 27 und 28 eingetragen.

7. Versuchsergebnisse von elastisch gelagerten Platten über dem Propeller

Im letzten abschliessenden Abschnitt über Versuchsergebnisse von propellererregten Druckschwankungen soll über eine mögliche, ingenieurmässige Massnahme zur Vermeidung von Vibrationen durch derartige Erregungen kurz referiert werden. Die vollständige Veröffentlichung dieser Versuche erfolgt in /13/. Hier werden die wesentlichsten Ergebnisse wiedergegeben.

Bei der Untersuchung des Problems der Beeinflussung von gemessenen propellererregten Druckamplituden durch schwingende Bauteile oder Platten wurde auf die Idee aufmerksam gemacht, eine frequenzmässig richtig abgestimmte, über dem Propeller angeordnete und vom übrigen Schiffskörper getrennte Ausschnittplatte, die elastisch gelagert ist, als schwingungsisolierendes Mittel gegen die dynamischen Auswirkungen des Druckfeldes zu verwenden. Die Frage nach der Grösse der Ausschnittplatte ist hierbei die wesentlichste. Zu ihrer Beantwortung wurden Versuche im Schlepptank durchgeführt. Als Versuchseinrichtung war die schon früher benutzte Anordnung /10/ einer relativ grossen Platte zwischen zwei Schiffsmoellen verwendet worden. In diese grosse Platte, die bei den Messungen durch die beiden Trägermodelle gehalten wurde, war die über dem Propeller befindliche Ausschnittplatte eingelassen (Abb.29). Gegenüber früher waren zusätzlich vier Wegaufnehmer auf den Plattenecken angeordnet. Mit einer durchaus ähnlichen Einrichtung wie in Abb.29, jedoch etwas grösser, konnten dann noch vier weitere quadratische Ausschnittplatten unterschiedlicher Grösse untersucht werden. Als erstes Ergebnis der Versuche mit elastisch gelagerten Platten sei Abb.30 gezeigt. Der Verlauf der an einer schwingenden Platte gemessenen und dann dimensionslos gemachten Druckamplituden

$A_3 = \frac{\Delta p}{T/\pi R^2}$ ¹⁾ über der Drehzahl bzw. über der Fortschrittsziffer $J_M = \frac{V_A}{n \cdot D}$ ist in dieser Abbildung im

Vergleich zur starren Platte wiedergegeben (oberer Teil in Abb. 30). Interessanterweise wird der resultierende Druck direkt über dem Propeller nur von der Translations-schwingung beeinflusst, wie der Vergleich des oberen Ab-bildungsteiles mit dem unteren ergibt. Die Druckerhöhung durch die schwingende Platte beträgt in der Eigenfre-quenz nur ca. 20% des Wertes der starren Platte. An weiteren Stellen über dem Propeller kann das Verhältnis der Erhöhung durchaus anders sein, wie Kloppenburg (/5/ Abb. 7) gezeigt hat.

In der Abb. 31 sind die Ergebnisse für den Propeller 1283 (Flügelzahl $Z = 3$) für fünf Ausschnittplatten ($K =$ Kanten-länge der Platte und $D =$ Propellerdurchmesser) und für die gefahrenen Drehzahlen n angegeben. Durch Multiplikation der Amplitude der Translationsschwingung \hat{z} mit der jeweili-gen Federkonstanten c ergibt sich die Kraft, die als Fun-damentkraft an den Lagerböcken der Federn auftritt; es ist quasi die Amplitude der Kraft, die in den Schiffskörper eingeleitet wird. Die Amplitude der Flügelzahlordnung (hier $m = 3$) der Kraft $c \cdot \hat{z}$ ist in Abb. 31 senkrecht nach oben aufgetragen. Die Resonanzdrehzahlen der einzelnen Platten sind jeweils eingetragen.

Um den Einfluss der, mit der Drehzahl steigenden erregenden Druckschwankung auszuschalten, wurde in Abb. 32 für je zwei Federstärken die durch den Schub T dividierte, also die dimensionslose Kraft $z^* = \frac{c \cdot \hat{z}}{T}$ angegeben. Anstelle der Drehzahlen wurde das Verhältnis der Erreger- zur Eigen-

1) Δp = Druckamplitude, T = mittlerer Schub des Propellers
 R = Propellerradius, 3 = dritte harmonische Ordnung der Propellerdrehzahl

frequenz $\frac{\omega_{err}}{\omega_0}$ benutzt. Hierbei ist ω_0 die jeweils niedrigste Eigenfrequenz einer Platte. Als das u.a. wesentlichste Ergebnis der Plattenversuche kann der Abb. 32 entnommen werden, dass bei einer überkritischen Anregung mit dem Verhältnis $\frac{\omega_{err}}{\omega_0} \geq 2,0 \div 3,0$ für alle Plattengrößen, die in den Schiffskörper übertragene Kraft z^* in senkrechter Richtung verschwindend klein wird.

Das Prinzip der elastischen Lagerung wird noch einmal durch den Vergleich der beiden Messschriebe in Abb. 33 verdeutlicht. Während im oberen Schrieb (Versuch Nr. 433) die Flügelfrequenz ($m = z = 5$) des Druckes mit der Eigenfrequenz der Platte zusammenfällt (Resonanz) wird im unteren Schrieb (Versuch Nr. 392) ein Fall gezeigt, bei dem die Flügelfrequenz des Druckes höher liegt als die von den vier Wegaufnehmern registrierten Eigenfrequenzen der Platte (überkritische Anregung). In diesem letzten Fall reagiert die Platte auf die anregende Frequenz des Druckes also nicht mehr.

8. Zusammenfassung

Zusammenfassend kann als Ergebnis des vorliegenden Referates festgestellt werden, dass neben der amplitudenvergrössernden Wirkung des Nachstroms die Kavitation in bezug auf die propellererregten Druckschwankungen von eminenter Wichtigkeit ist. Bei Kavitation tritt nicht nur, wie es bisher stets herausgestellt wurde (z.B./3/ und /4/), eine Amplitudenvergrösserung durch eine vergrösserte effektive Dicke des Profils auf, sondern im Bereich der stärker ausgeprägten Kavitation bei Auftriebsabfall am Profil tritt vor und in der Propellerebene auch Amplitudenabfall auf. Ferner tritt allgemein hinter der Schraubenebene ein Anstieg der Druckamplituden auf, der sicherlich z.T. auf den Einfluss des Rand - Wirbels zurückzuführen ist. Als letztes Ergebnis deutet sich die Möglichkeit an, eine in sich starre Ausschnittplatte mit ca. 1,5-fachen Kantenlänge des Propellerdurchmessers, die frequenzmässig tief abgestimmt ist, als schwingungsisolierendes Mittel gegen die Auswirkungen der propellererregten Druckamplituden zu verwenden.

9. Literaturverzeichnis

- /1/ Denny, S.B.:
Comparison of experimentally determined and theoretically predicted pressure in the vicinity of a marine propeller.
Naval Ship Research and Development Center, Report 2349, May 1967
- /2/ Huse, E.:
Pressure fluctuations on the hull induced by cavitating propellers.
Norw. Ship Model Experiment Tank, Publication No. 111 March 1972
- /3/ Johnsson, C.A. and Sntvedt, T.:
"Propeller Excitation and Response of 230 000 tdw Tankers"
9th Symposium on Naval Hydrodynamics, Paris 1972
- /4/ Keil, H.:
Messung der vom Propeller induzierten Druckschwankungen am Forschungsschiff "Meteor" und Vergleich mit dem Modell.
Jahrbuch d. STG, 59. Band 1965, S. 368 + 377
- /5/ Kloppenburg, M.:
Der Einfluss elastischer Platten (Schiffswnde) auf das hydroakustische Propellerdruckfeld.
Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, Bericht Nr. 283, März 1972
Gekürzte Fassung in:
Schiffstechnik 20 (1973) Nr. 100, S. 17-27
- /6/ Lerbs, H.:
Untersuchung der Kavitation an Schraubenpropellern.
Dissertation 1936 und zugleich Teil 1,
131. Mitteilung der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt, Hamburg 1936
- /7/ Lerbs, H.:
Untersuchung der Kavitation an Schraubenpropellern.
Teil 2 Habilitationsschrift, Fakultät für Maschinenwesen,
T.H. Hannover 1944
- /8/ van Oossanen, P. and van der Kooy, J.:
Vibratory hull forces induced by cavitating propellers. The Royal Institution of Naval Architects,
Spring Meeting 1972

- /9/ Walchner, O.:
Profilmessungen bei Kavitation,
Hydrodynamische Probleme des Schiffsantriebes.
Hamburg 1932
- /10/ Weitendorf, E.-A.:
Experimentelle Untersuchungen der von Propellern
an der Aussenhaut erzeugten periodischen Druck-
schwankungen.
Schiff und Hafen, Heft 1/1970, 22. Bd.; S.11-24
- /11/ Weitendorf, E.-A.:
Vergleich von propellererregten Druckschwankungen
für Modell und Grossausführung am Beispiel des
Frachtschiffes "Hornmeer".
Schiff und Hafen, Heft 5/1973, 25. Bd., S.423-428
- /12/ Weitendorf, E.-A.:
Experimentelle Untersuchungen der durch kavitierende
Propeller erzeugten Druckschwankungen.
Schiff und Hafen Heft 11/1973, 25.Bd.
- /13/ Weitendorf, E.-A.:
Versuche mit elastisch gelagerten Platten über
einem Propeller - eine Möglichkeit der Vibrations-
vermeidung.
Hansa, November 1973

10. Anhang

Propeller	Art der Ergebnisse	Spitzenabstände	Abb.Nr. in /12/	Bemerkungen
1283 (Z=3)	Druckamplituden Kp ₃ in Längsrichtung x/R	a/R = 0,109; 0,200 = 0,352; 0,50; 0,650	3	Fortschrittsziff: J=0,803 Konstr.Steig. $\frac{P_{0,7}}{D} = 1,14$
1240 (Z=3)	Druckamplituden Kp ₃ in Längsrichtung x/R	a/R = 0,109; 0,200 = 0,352; 0,50; 0,650	4	Fortschrittsziff: J=0,803 Konstr.Steig. $\frac{P_{0,7}}{D} = 1,187$
1241 (Z=4)	Druckamplituden Kp ₄ in Längsrichtung x/R	a/R = 0,109; 0,200 = 0,352; 0,50; 0,650	5	Fortschrittsziff: J=0,803 Konstr.Steig. $\frac{P_{0,7}}{D} = 1,149$
1242 (Z=5)	Druckamplituden Kp ₅ in Längsrichtung x/R	a/R = 0,109; 0,200 = 0,352; 0,50; 0,650	6	Fortschrittsziff: J=0,803 Konstr.Steig. $\frac{P_{0,7}}{D} = 1,115$

Propeller	Art der Ergebnisse	Fortschrittsziffer	Abb.Nr. in /12/	Bemerkungen
1283 (Z=3)	Druckamplituden Kp ₃ in Längsrichtung x/R	J = 0,58; 0,66; 0,72 = 0,803; 0,85	8	Konstr.Steigung Spitzenabstand a/R = 0,109
1283 (Z=3)	Druckamplituden Kp ₃ in Längsrichtung x/R	J = 0,58; 0,66; 0,72 = 0,803; 0,85	10	Konstr.Steigung Spitzenabstand a/R = 0,352 (Abb.Nr.4 d.vorl. Refer.)
1240 (Z=3)	Druckamplituden Kp ₃ in Längsrichtung x/R	J = 0,58; 0,66; 0,72 = 0,803; 0,85	11	Konstr.Steigung Spitzenabstand a/R = 0,352
1242 (Z=5)	Druckamplituden Kp ₅ in Längsrichtung	J = 0,58; 0,66; 0,72 = 0,803; 0,85; 1,00	12	Konstr.Steigung Spitzenabstand a/R = 0,352 Abb.Nr.5 d.vorl. Refer)

Tabelle 1 Zusammenstellung der systematischen Ergebnisse
von Druckamplituden in homogener Zuströmung
(aus /12/)

Propeller	Art der Ergebnisse	Fortschrittsziffer	Abb.Nr. in /12/	Bemerkungen																										
1283 (Z=3)	Druckamplituden Kp_3 in Längsrichtung x/R	J = 0,72; 0,76 J = 0,803; 0,84	22	Konstruktionssteigung $\frac{P_{0,7}}{D} = 1,14$																										
			23		1283 (Z=3)	Druckamplituden Kp_3 in Querrichtung y/R	J = 0,72; 0,76 J = 0,803; 0,84	24	Konstruktionssteigung $\frac{P_{0,7}}{D} = 1,14$	25	1283 (Z=3)	Phasenwinkel θ_3 der Druckmaxima in Längsrichtung x/R	J = 0,72; 0,76 = 0,803; 0,84	26	Konstruktionssteigung $\frac{P_{0,7}}{D} = 1,14$	27	1283 (Z=3)	Druckamplituden Kp_3 in Längsrichtung x/R	J = 0,72; 0,76 = 0,803; 0,84	28	Konstruktionssteigung $\frac{P_{0,7}}{D} = 1,07$	29	1240 (Z=3)	Druckamplituden Kp_3 in Längsrichtung x/R	J = 0,72; 0,74 = 0,76; 0,803 = 0,84	29	Konstruktionssteigung $\frac{P_{0,7}}{D} = 1,187$	30	1242 (Z=5)	Druckamplituden Kp_5 in Längsrichtung x/R
1283 (Z=3)	Druckamplituden Kp_3 in Querrichtung y/R	J = 0,72; 0,76 J = 0,803; 0,84	24	Konstruktionssteigung $\frac{P_{0,7}}{D} = 1,14$																										
			25		1283 (Z=3)	Phasenwinkel θ_3 der Druckmaxima in Längsrichtung x/R	J = 0,72; 0,76 = 0,803; 0,84	26	Konstruktionssteigung $\frac{P_{0,7}}{D} = 1,14$	27	1283 (Z=3)	Druckamplituden Kp_3 in Längsrichtung x/R	J = 0,72; 0,76 = 0,803; 0,84	28	Konstruktionssteigung $\frac{P_{0,7}}{D} = 1,07$	29	1240 (Z=3)	Druckamplituden Kp_3 in Längsrichtung x/R	J = 0,72; 0,74 = 0,76; 0,803 = 0,84	29	Konstruktionssteigung $\frac{P_{0,7}}{D} = 1,187$	30	1242 (Z=5)	Druckamplituden Kp_5 in Längsrichtung x/R	J = 0,72; 0,76 = 0,803; 0,84	30	Konstruktionssteigung $\frac{P_{0,7}}{D} = 1,115$			
1283 (Z=3)	Phasenwinkel θ_3 der Druckmaxima in Längsrichtung x/R	J = 0,72; 0,76 = 0,803; 0,84	26	Konstruktionssteigung $\frac{P_{0,7}}{D} = 1,14$																										
			27																											
1283 (Z=3)	Druckamplituden Kp_3 in Längsrichtung x/R	J = 0,72; 0,76 = 0,803; 0,84	28	Konstruktionssteigung $\frac{P_{0,7}}{D} = 1,07$																										
			29																											
1240 (Z=3)	Druckamplituden Kp_3 in Längsrichtung x/R	J = 0,72; 0,74 = 0,76; 0,803 = 0,84	29	Konstruktionssteigung $\frac{P_{0,7}}{D} = 1,187$																										
			30																											
1242 (Z=5)	Druckamplituden Kp_5 in Längsrichtung x/R	J = 0,72; 0,76 = 0,803; 0,84	30	Konstruktionssteigung $\frac{P_{0,7}}{D} = 1,115$																										

Tabelle 2

Übersicht über weitere systematische
Ergebnisse von Druckamplituden im
Nachstrom bei $a/R = 0,352$ /aus 12/

MESSTRECKE MIT
NACHSTROMSIEBEN
UND
PROPELLER 1654

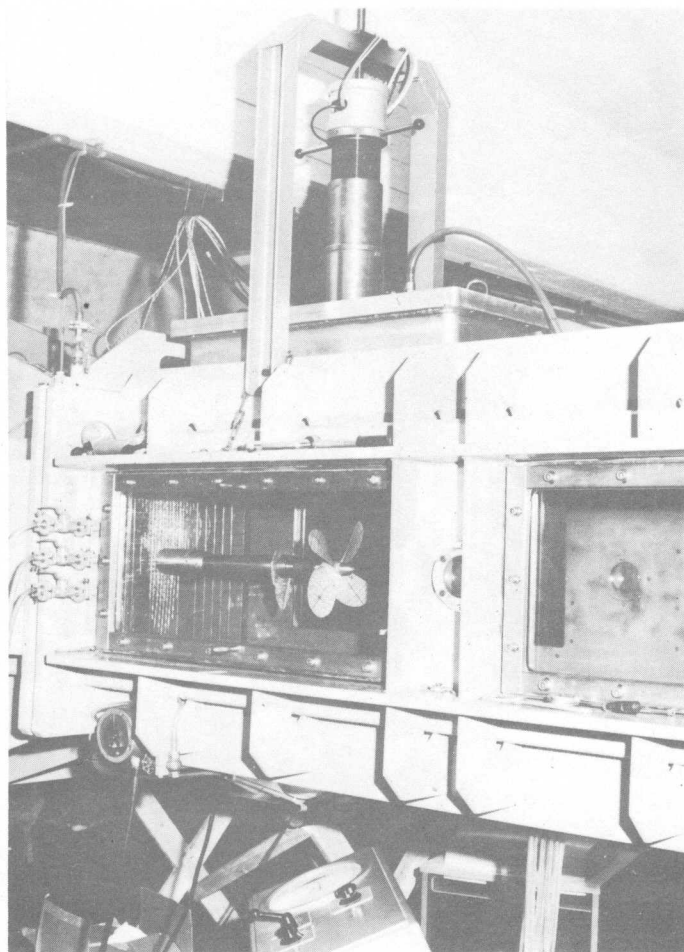
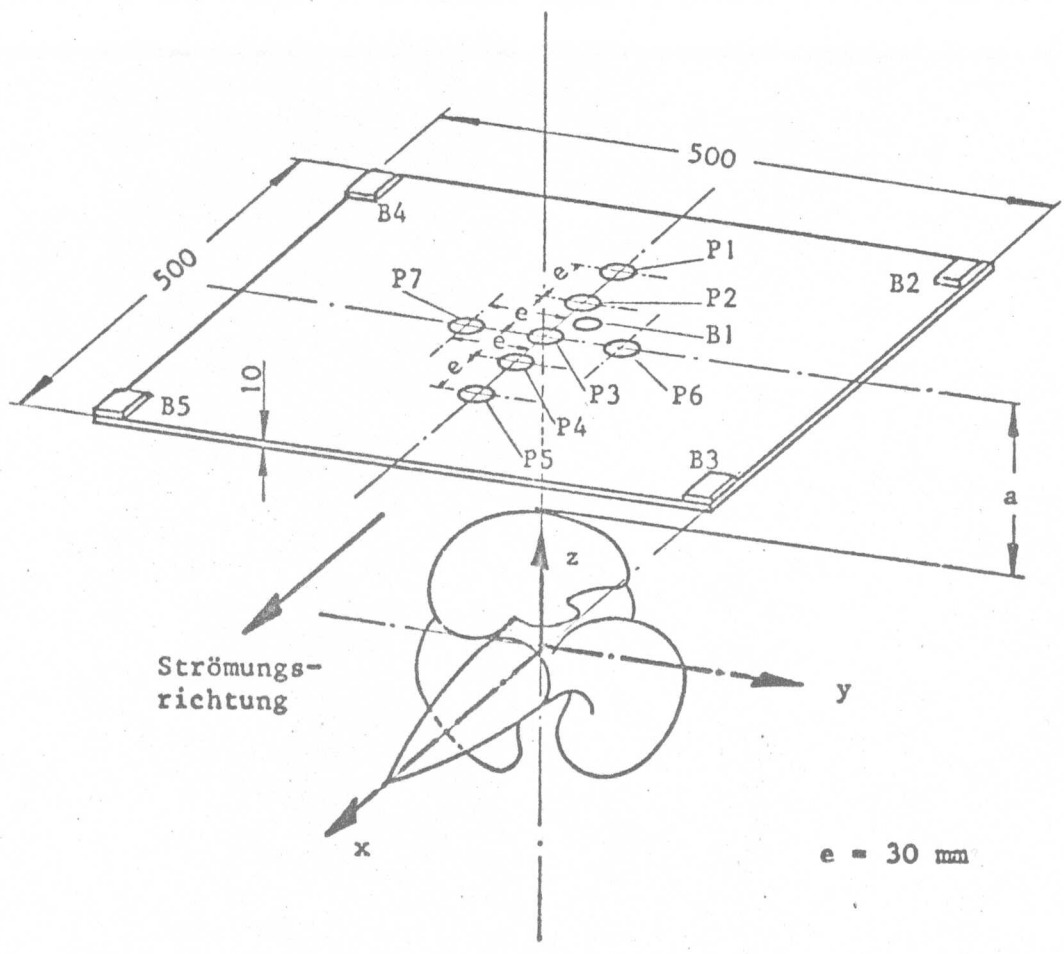
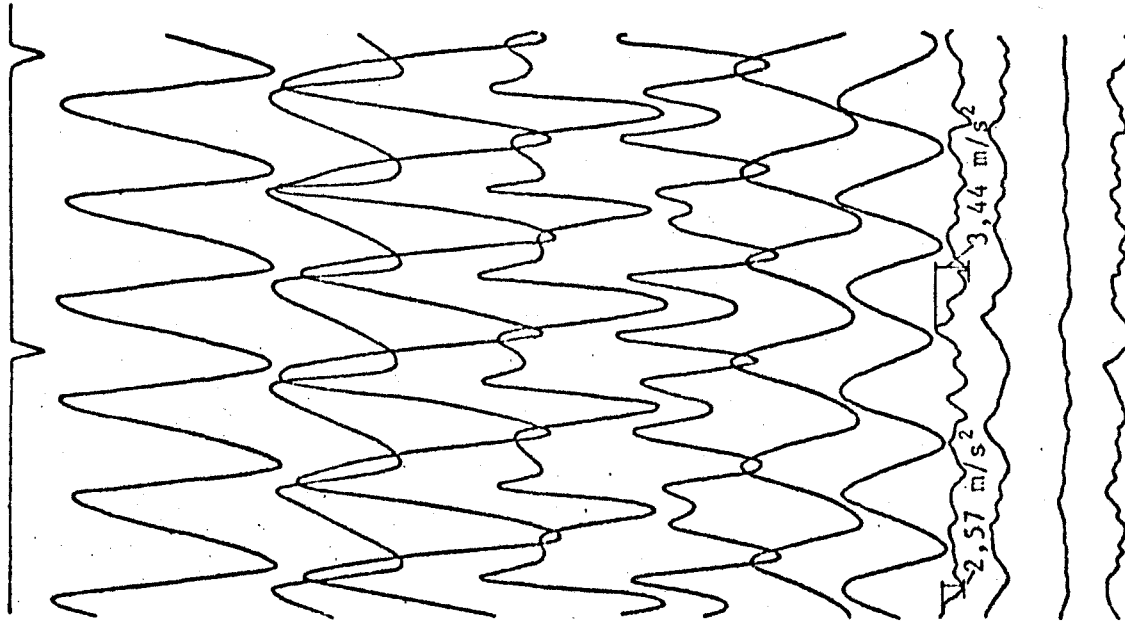


ABB. 1



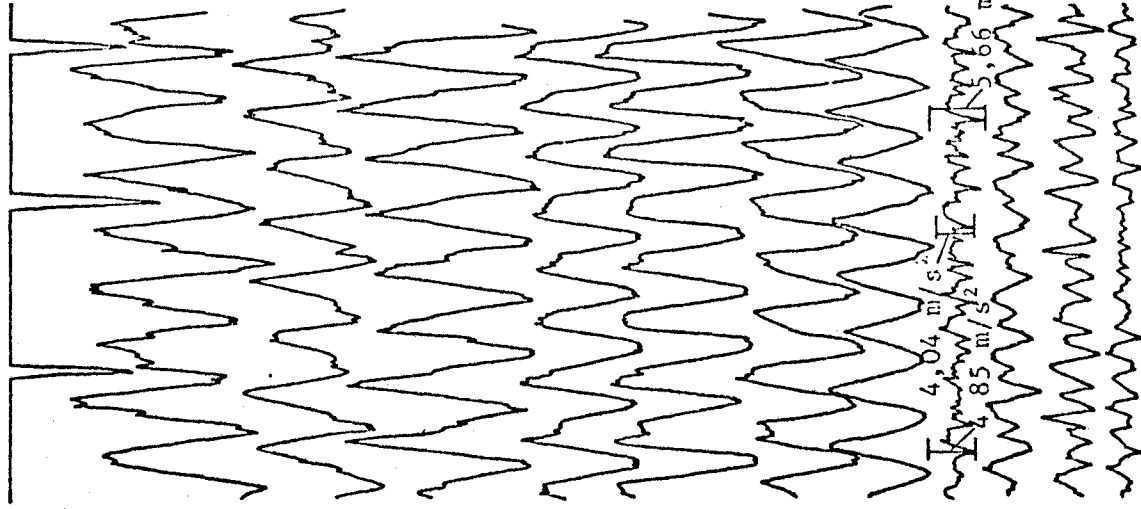
ANORDNUNG DER MESSTELLEN UND
DES KOORDINATENSYSTEMS

Drehzahl



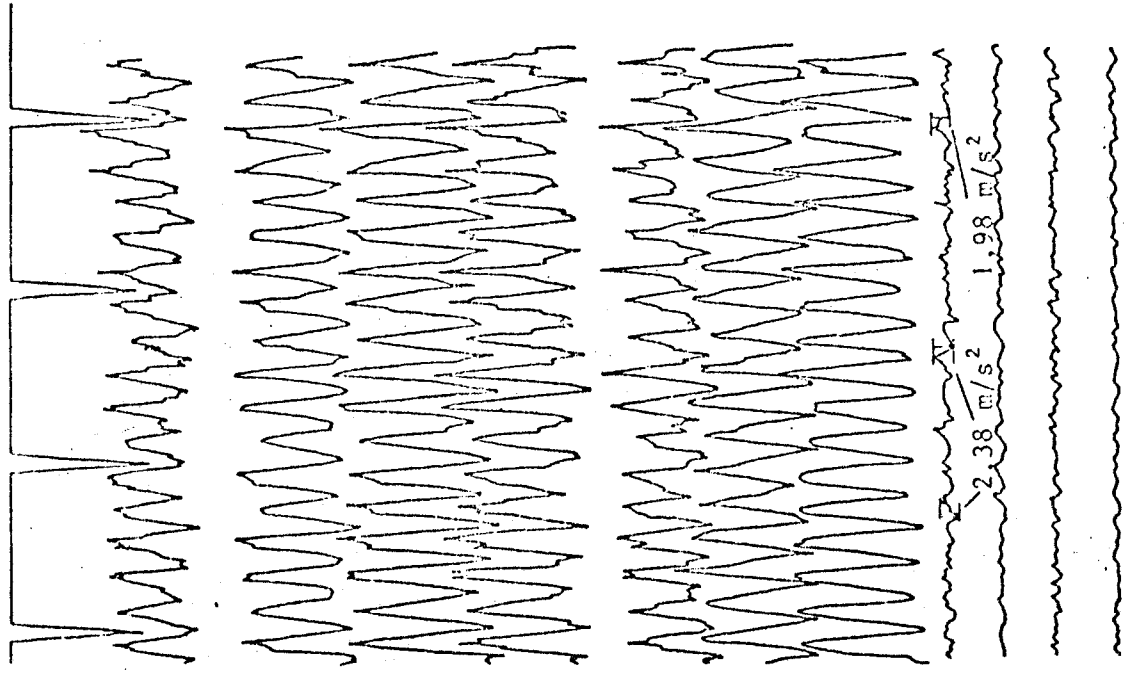
Kav. Vers. Nr. 85
ohne Nachstrom

P 1283; Z = 3; P/D = 1,14; a/R = 0,109
n = 25 Hz; J = 0,72; $\sigma_{VA} = 1,75$



Kav. Vers. Nr. 539
mit Nachstrom

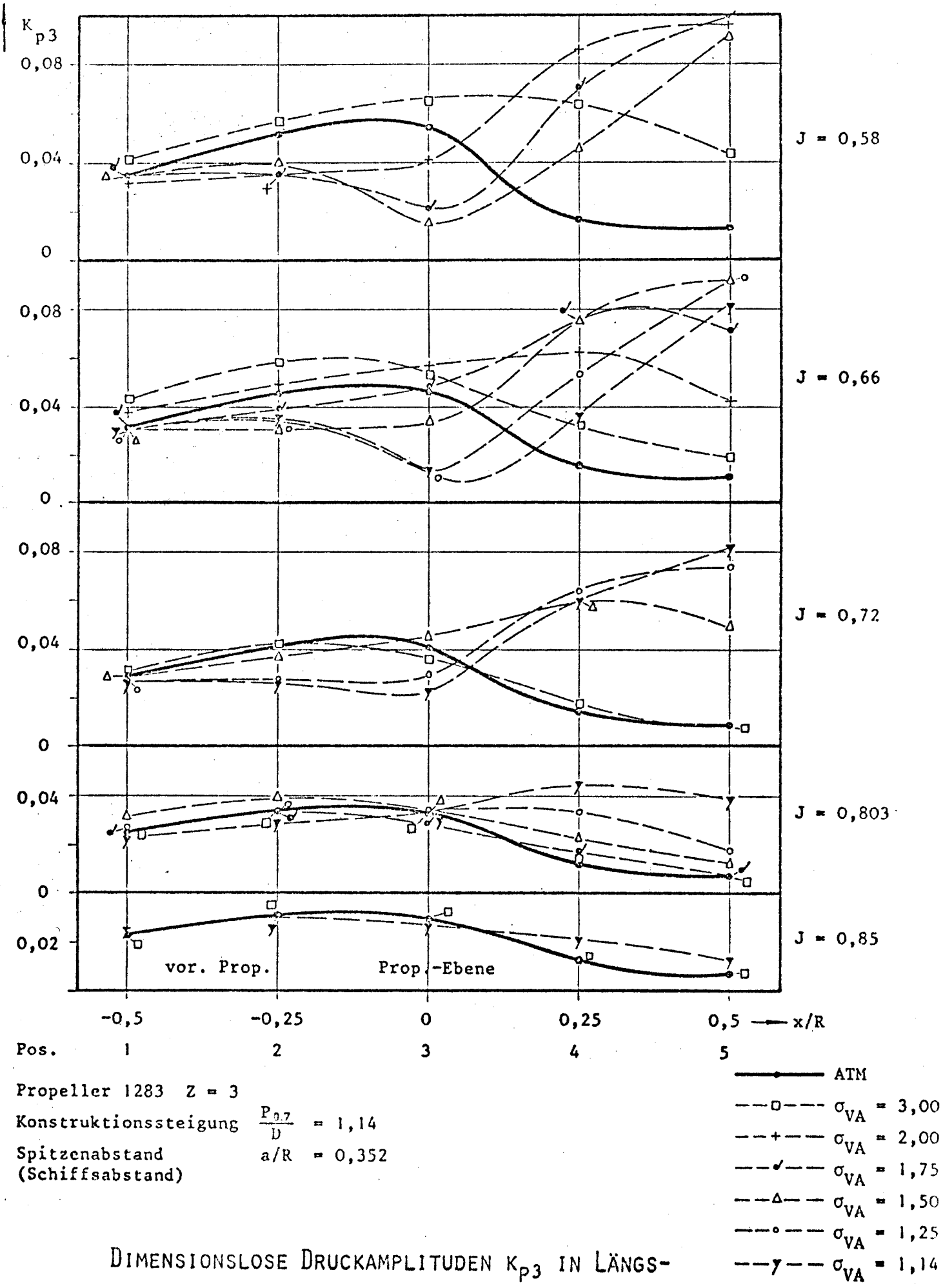
P 1283; Z = 3; P/D = 1,14; a/R = 0,352
n = 22 Hz; J = 0,84; $\sigma_{VA} = 1,15$



Kav. Vers. Nr. 557
mit Nachstrom

P 1242; Z = 5; P/D = 1,115; a/R = 0,352
n = 22 Hz; J = 0,76; $\sigma_{VA} = 1,25$

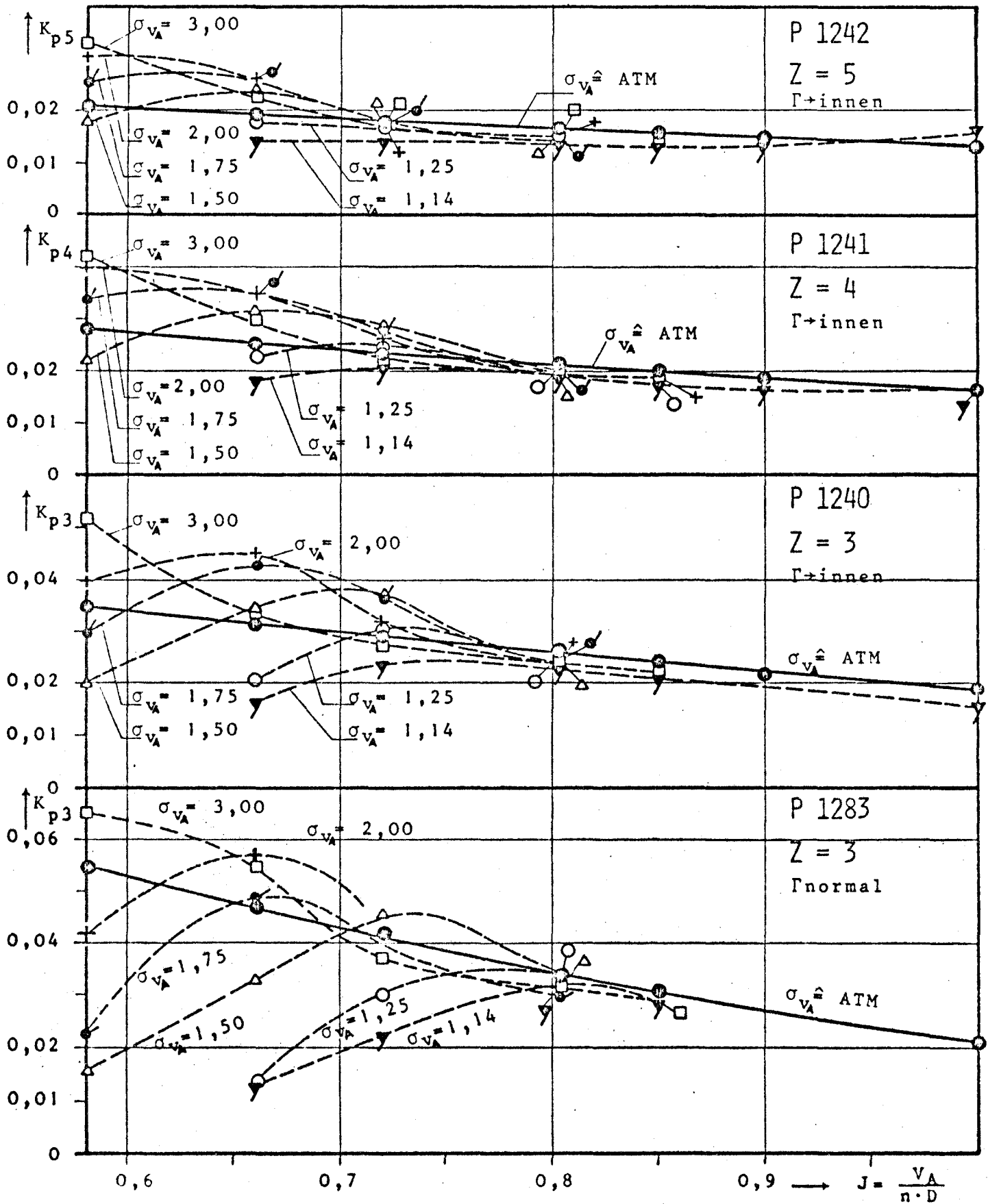
ABB. 3 MESSCHRIEBE VON DRUCKSCHWANKUNGSMESSUNGEN IM KAVITATIONSTUNNEL



Propeller 1283 $Z = 3$
 Konstruktionssteigung $\frac{P_{0,7}}{D} = 1,14$
 Spitzenabstand (Schiffsabstand) $a/R = 0,352$

- ATM
- $\sigma_{VA} = 3,00$
- +--- $\sigma_{VA} = 2,00$
- ✓--- $\sigma_{VA} = 1,75$
- △--- $\sigma_{VA} = 1,50$
- $\sigma_{VA} = 1,25$
- γ--- $\sigma_{VA} = 1,14$

DIMENSIONSLOSE DRUCKAMPLITUDEN K_{p3} IN LÄNGS-
 RICHTUNG BEI HOMOGENER ZUSTRÖMUNG

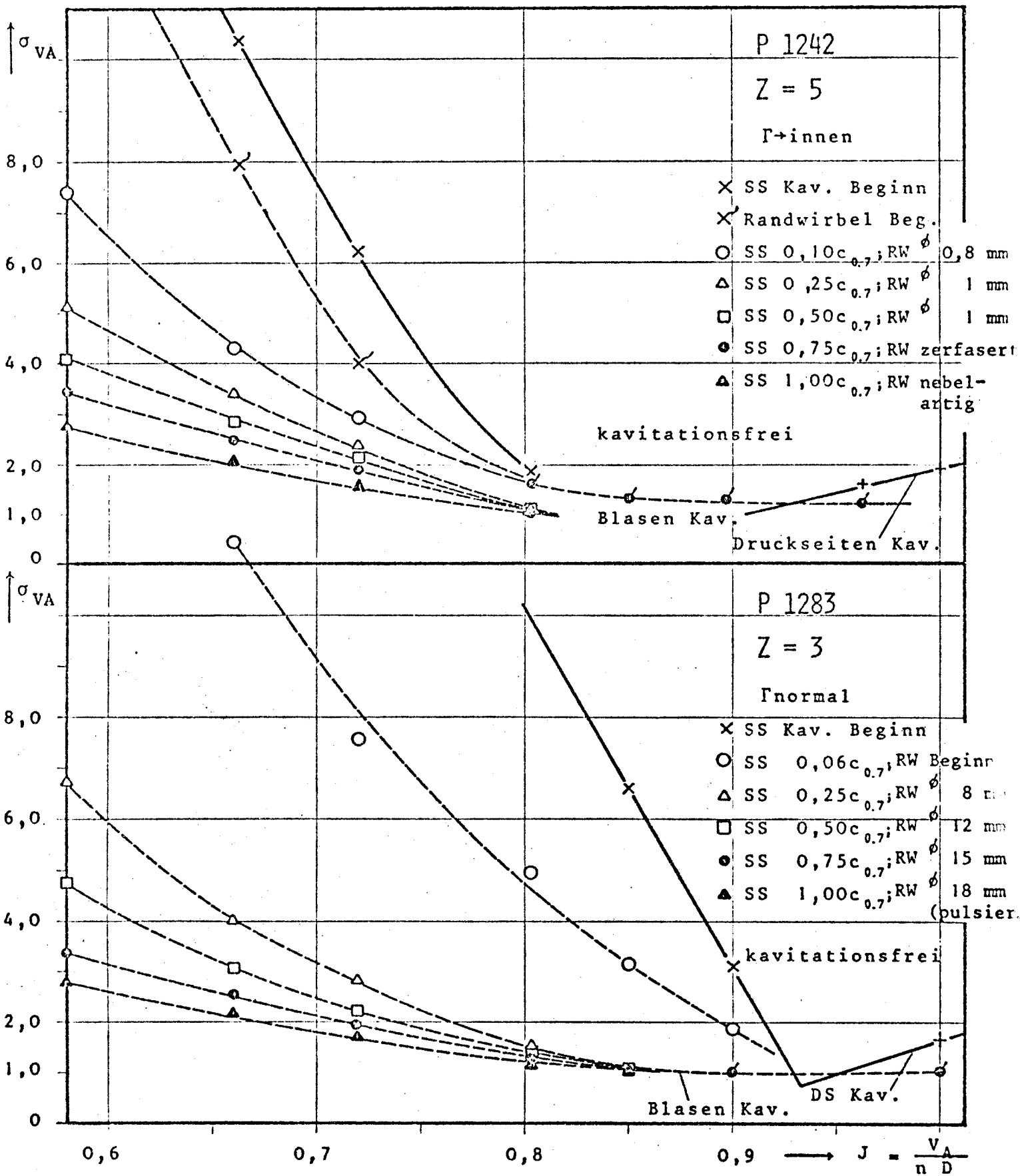


Spitzenabstand
 $a/R = 0,352$
 (Schiffsabstand)
 Meßstelle direkt
 üb. d. Propeller
 (Position 3)
 Konstante Drehzahl
 $n = 25 \text{ Hz}$

DIMENSIONSLOSE DRUCKAMPLITUDEN

$$K_{pz} = \frac{\Delta p}{\rho n^2 D^2}$$

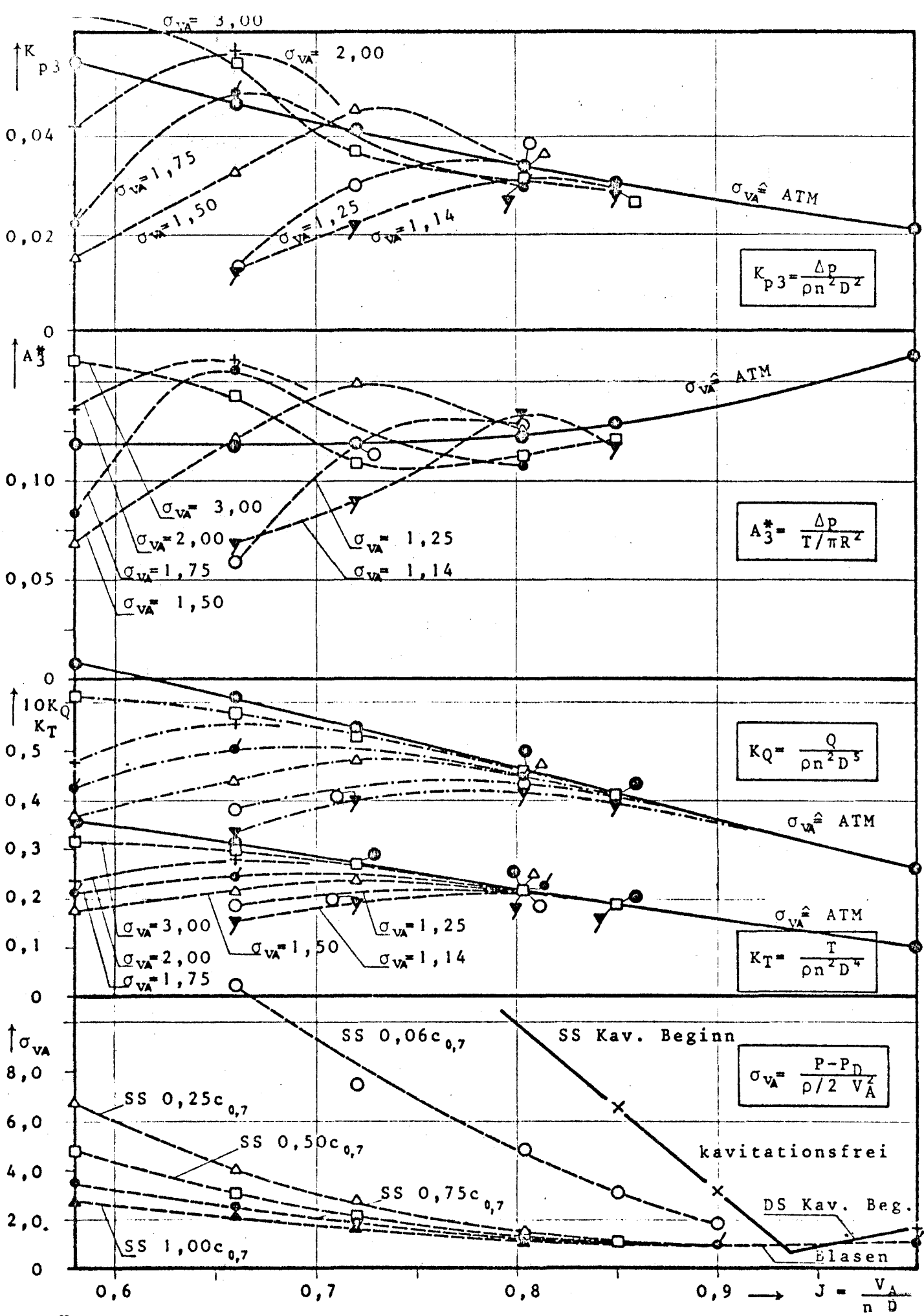
IN HOMOGENER ZUSTRÖMUNG UND BEI KAVITATION



Plattenabstand:
 $a/R = 0,352$
 (Schiffsabstand)
 Beide Propeller auf
 Entwurfssteigung
 eingestellt.

KAVITATIONS DIAGRAMME FÜR
 PROPELLER 1283 U. 1242

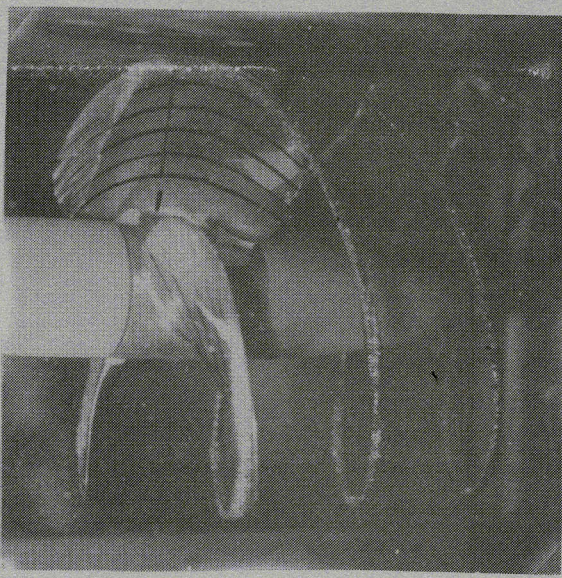
Homogene
 Zuströmung



Für K_{p3} u. A_3^* Pos.3
 $a/R = 0,352$
 (Schiffsabstand)
 homogene Zuströmung

DIMENSIONSLOSE BEIWERTE FÜR P 1283

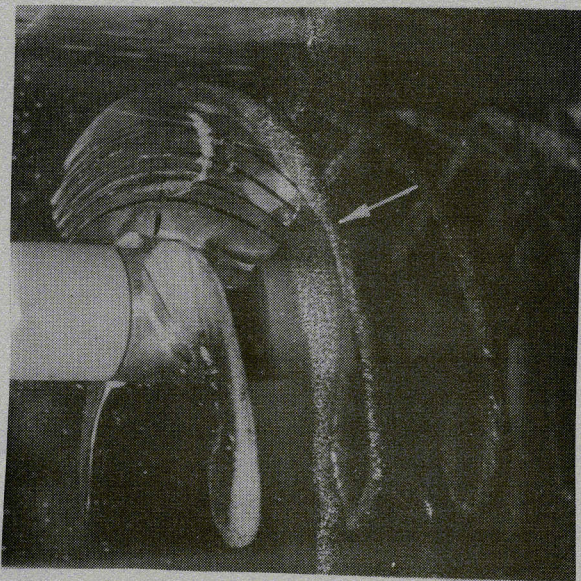
ABB. 8



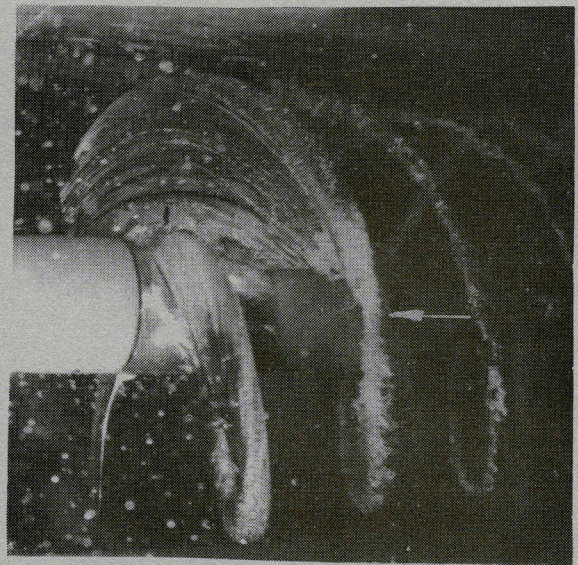
A) Foto 18; $\sigma_{VA} = 3,00$



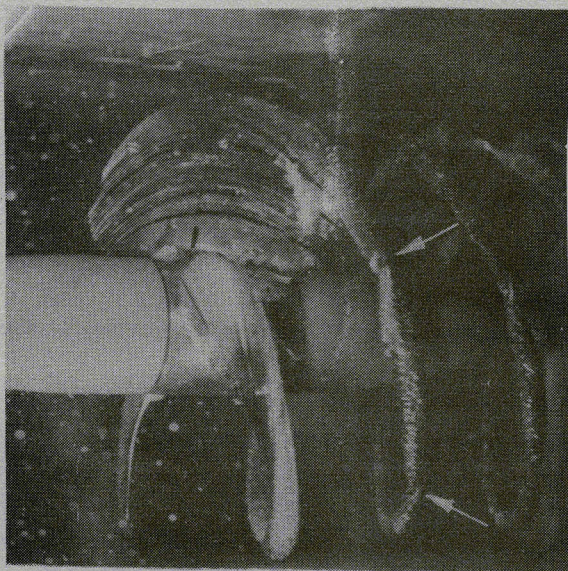
D) Foto 21; $\sigma_{VA} = 1,50$



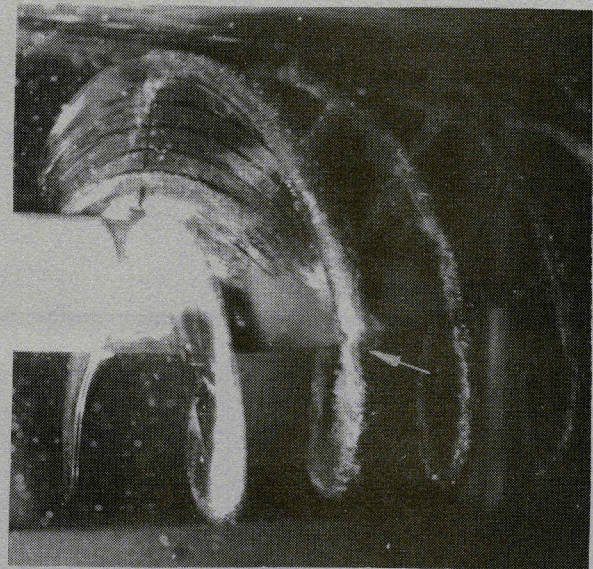
B) Foto 19; $\sigma_{VA} = 2,00$



E) Foto 22; $\sigma_{VA} = 1,25$



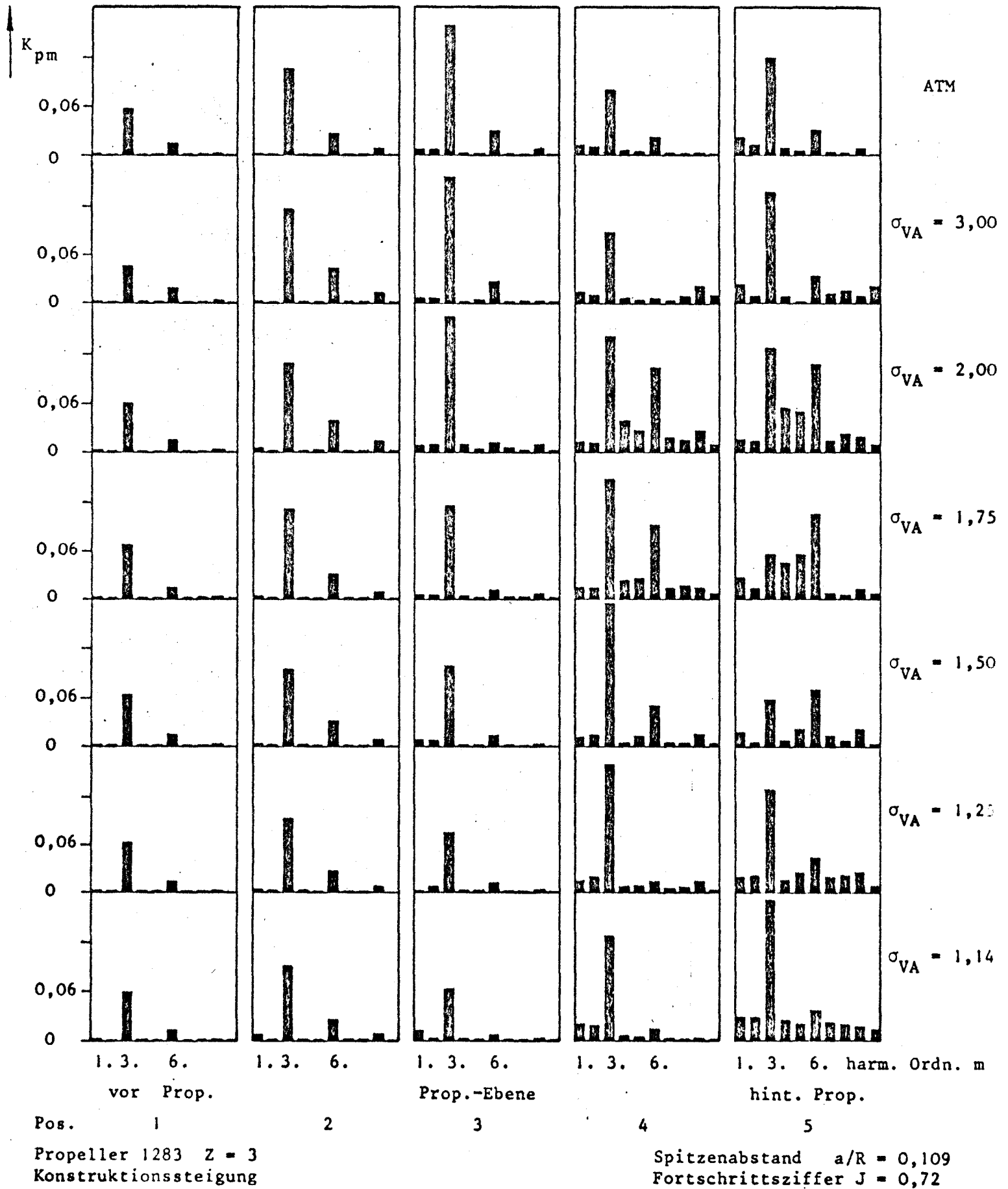
C) Foto 20; $\sigma_{VA} = 1,75$



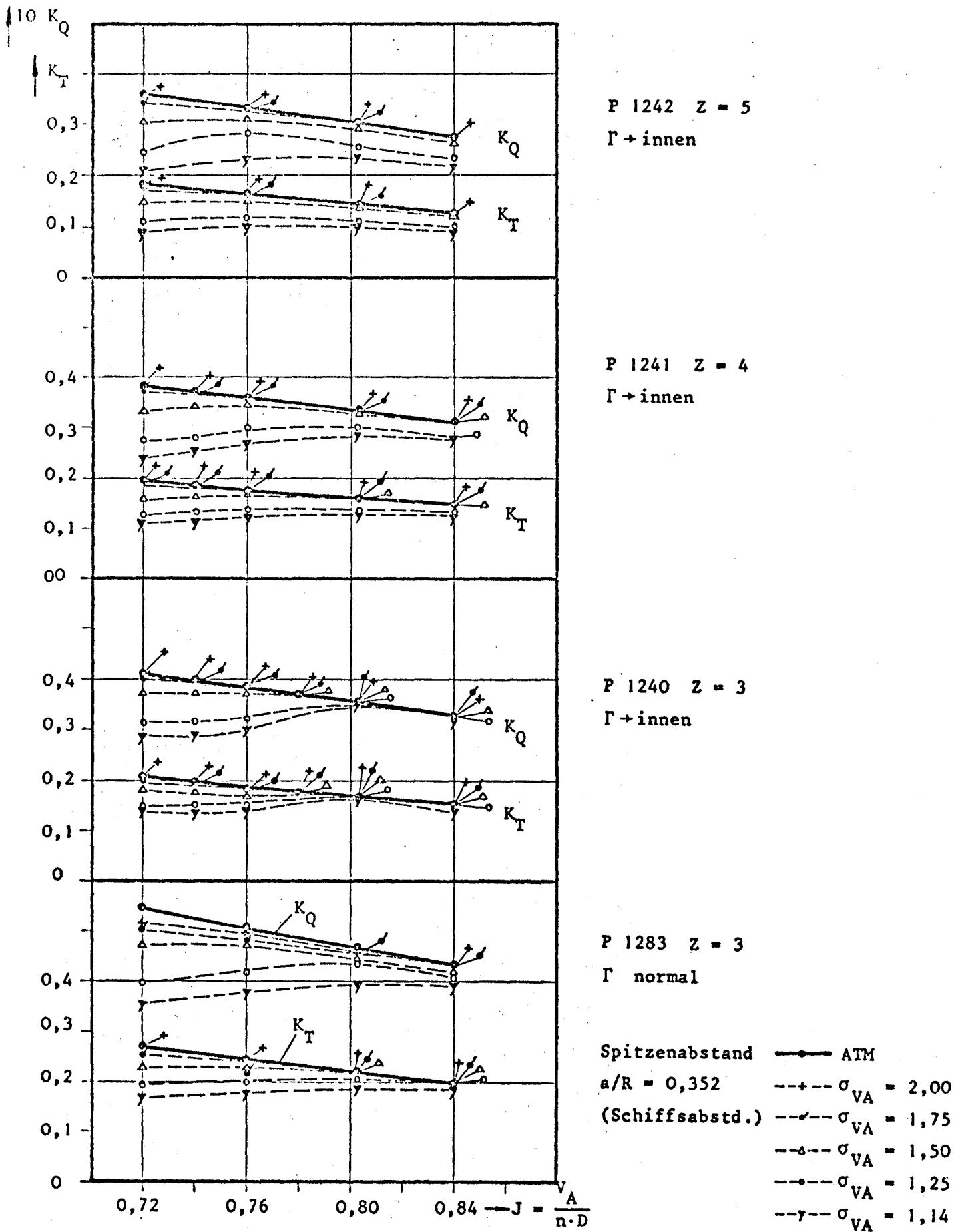
F) Foto 23; $\sigma_{VA} = 1,14$

SPITZENABSTAND $\alpha/R = 0,109$ u. FORTSCHRITTSZIFFER $J = 0,72$

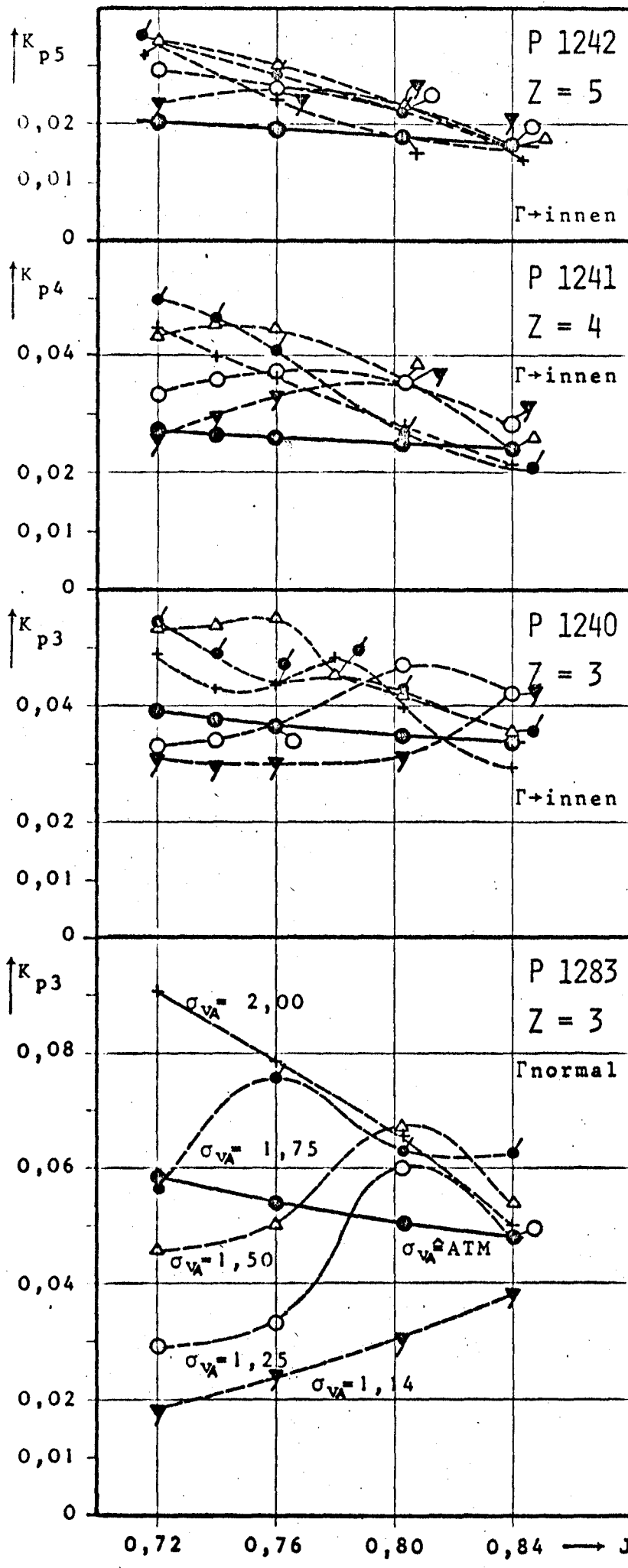
PROPELLER 1283 IN HOMOGENER ZUSTRÖMUNG



DIMENSIONSLOSE DRUCKAMPLITUDEN BIS ZUR 10. HARMONISCHEN
 ORDNUNG MIT UND OHNE KAVITATION BEI HOMOGENER ZUSTRÖMUNG



SCHUB- UND DREHMOMENTBEIWERTE
 BEI NACHSTROM UND KAVITATION



- $\sigma_{VA} = \text{ATM}$
- + $\sigma_{VA} = 2,00$
- ◐ $\sigma_{VA} = 1,75$
- △ $\sigma_{VA} = 1,50$
- $\sigma_{VA} = 1,25$
- ▽ $\sigma_{VA} = 1,14$

Spitzenabstand
 $a/R = 0,352$
 (Schiffsabstand)

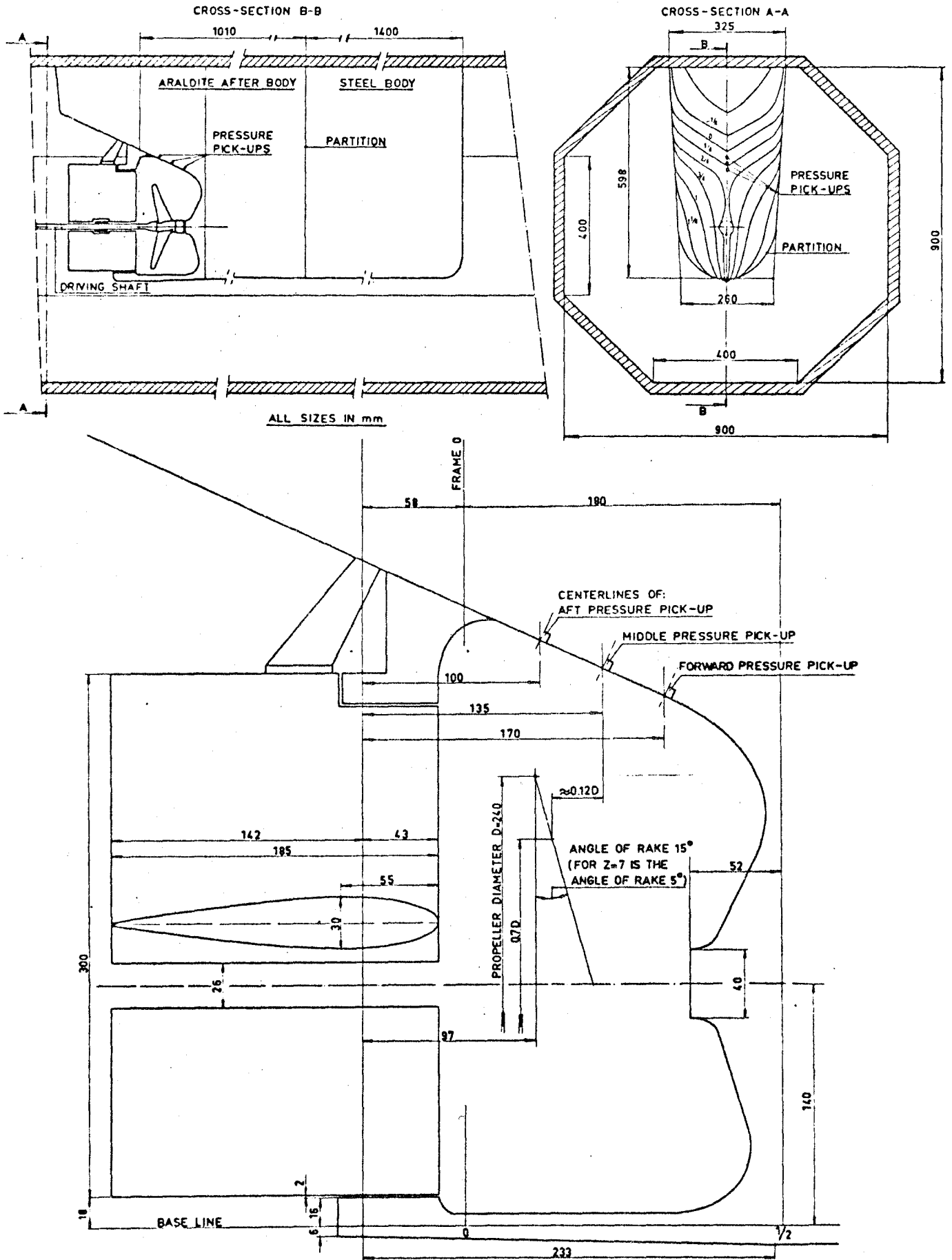
Druckmeßstelle direkt
 über dem Propeller
 (Position 3)

Alle Propeller auf
 Entwurfssteigung
 eingestellt.

DIMENSIONSLOSE DRUCK-
 AMPLITUDEN K_{pz} IN AXIALEM
 EINGEREGETEM NACHSTROM
 BEI KAVITATION

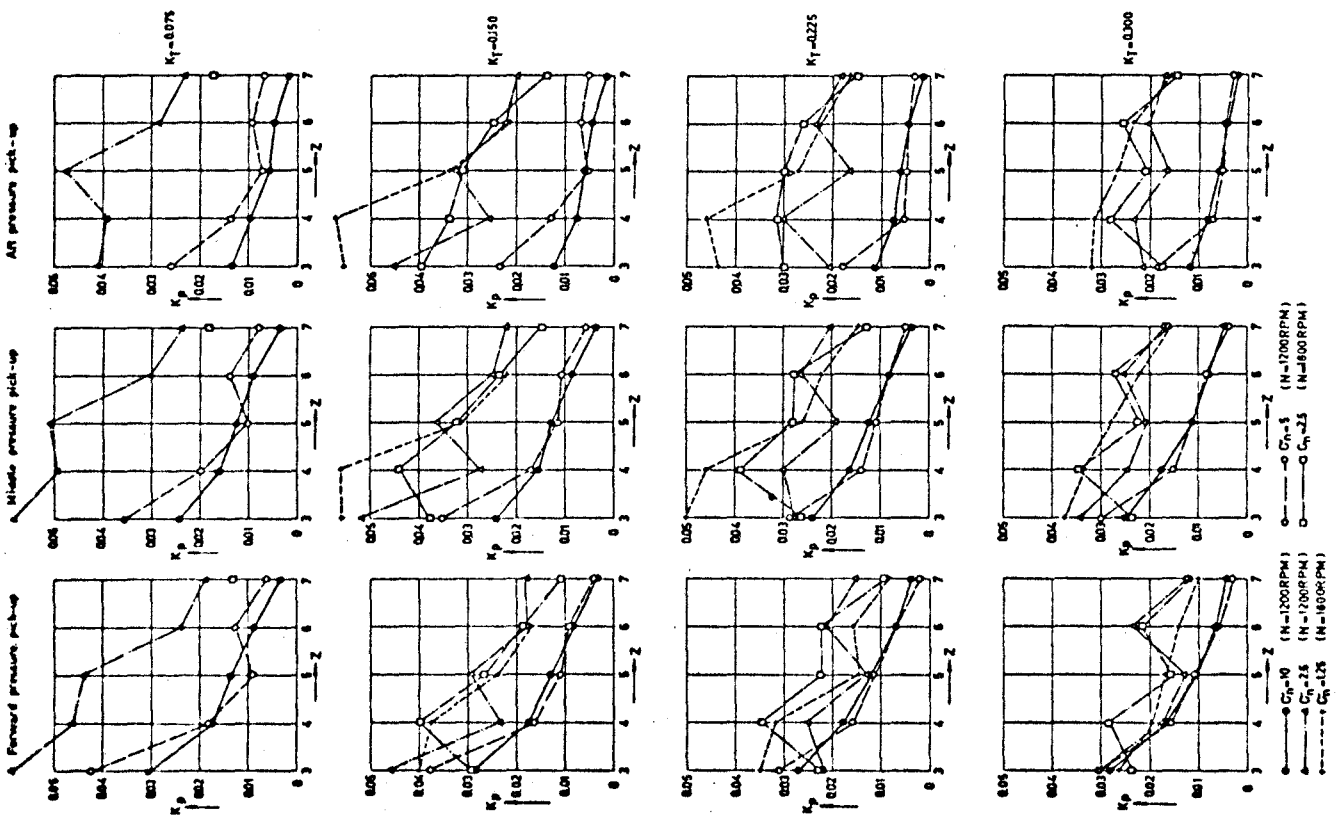
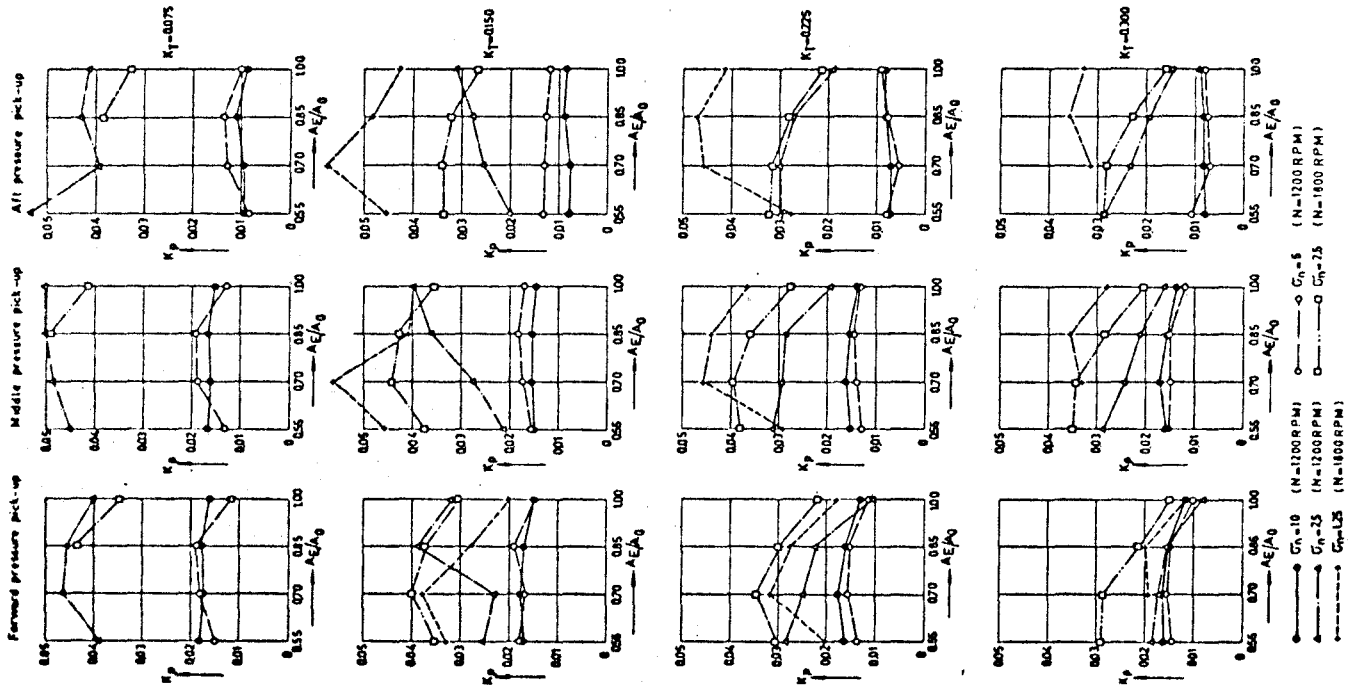
ABB. 12

VIBRATORY HULL FORCES INDUCED BY CAVITATING PROPELLERS



Drawing showing the adaptation of model of ship afterbody to the cavitation tunnel and details of the propeller position relative to the pressure pick-ups

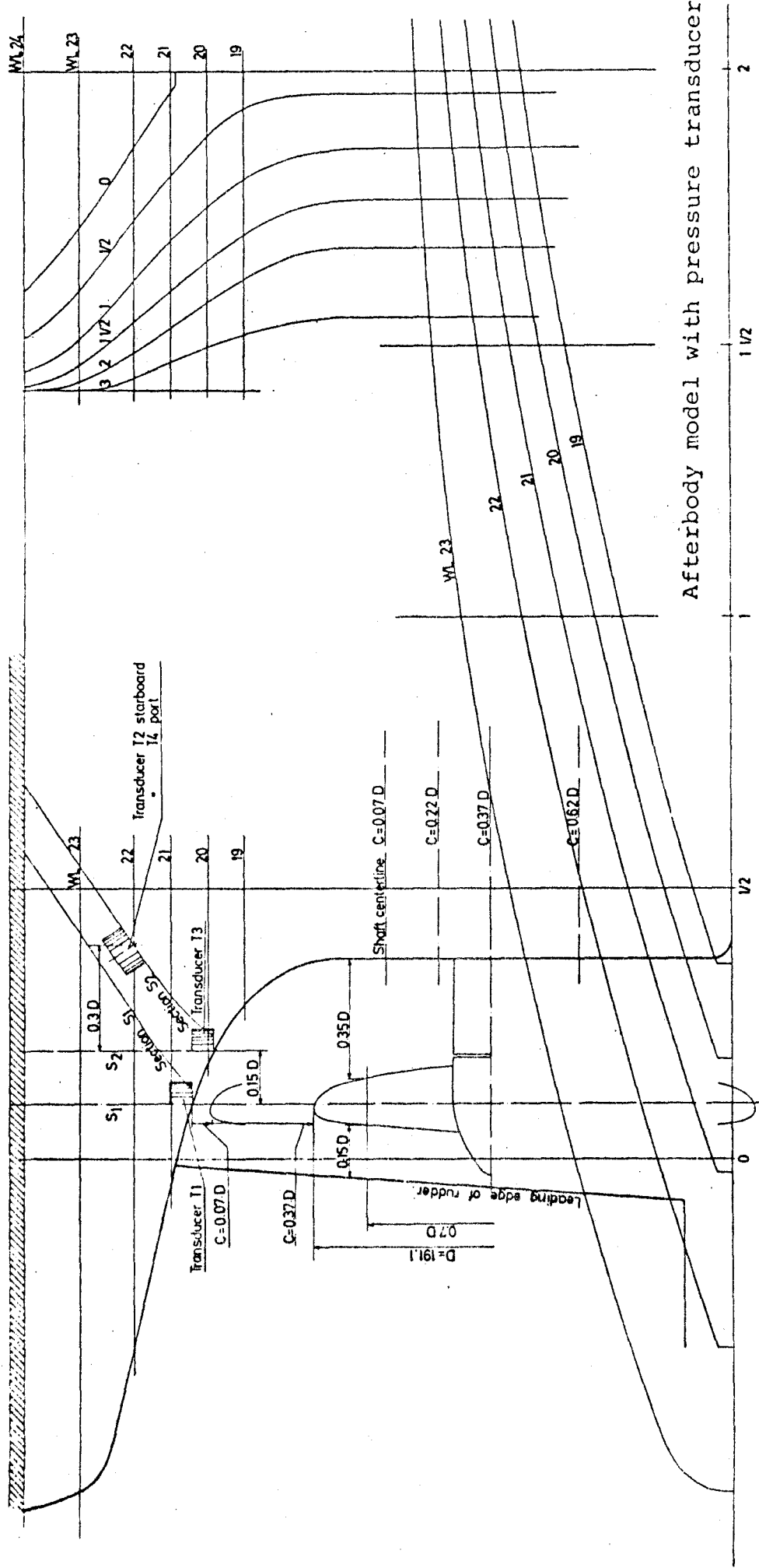
ABB. 13 (NACH OOSSANEN UND VAN DER KOOY AUS [8])



Effect of blade area on dimensionless pressure component based on amplitude of first harmonic

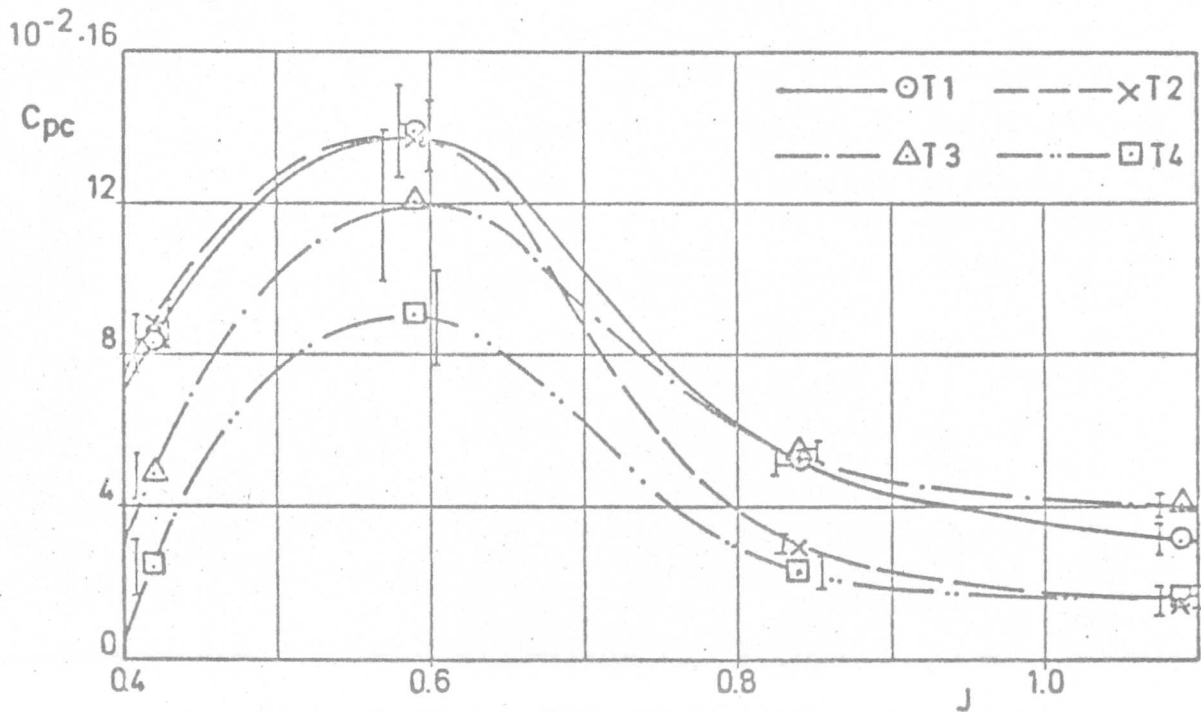
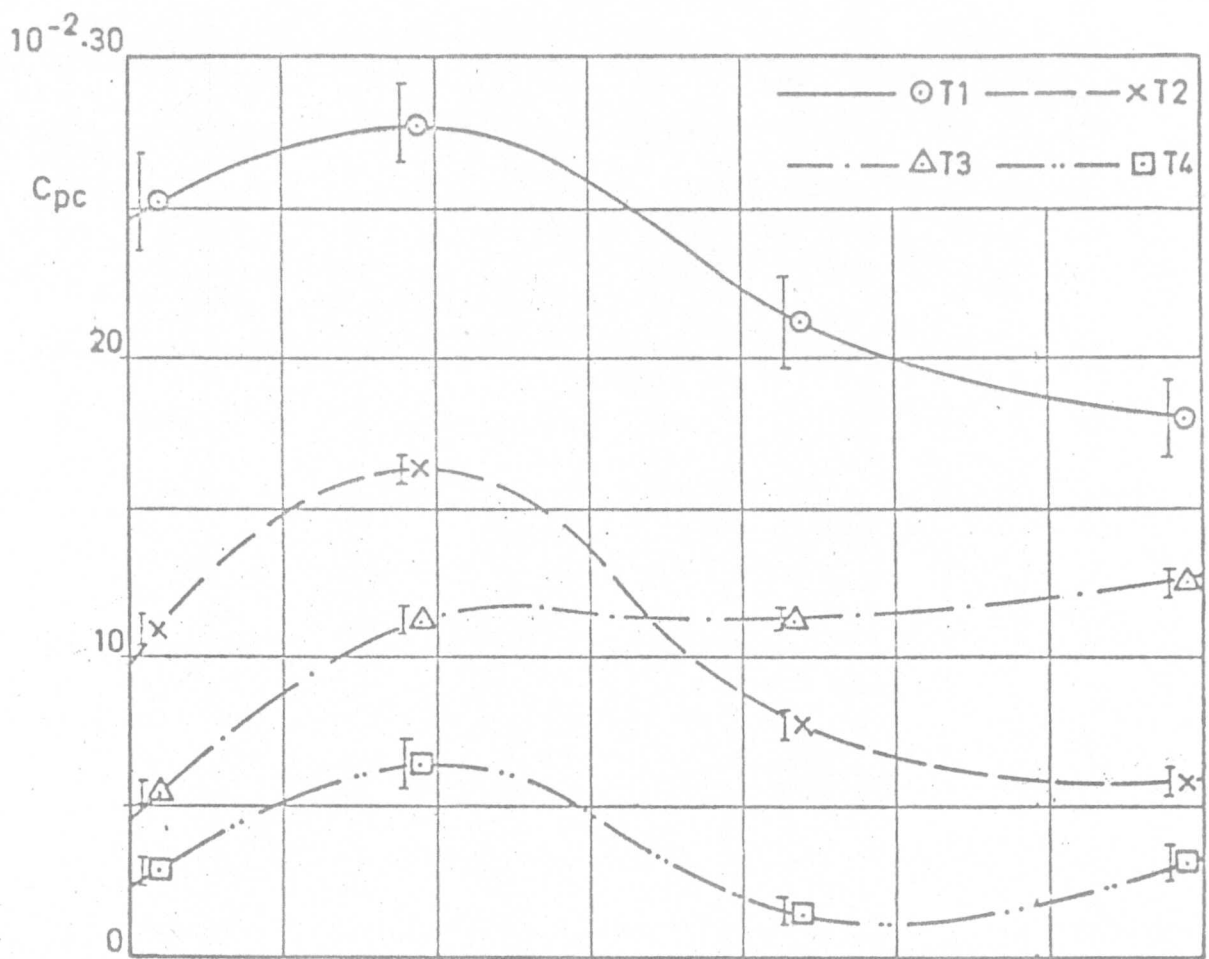
Effect of blade number on dimensionless pressure component based on amplitude of first harmonic

ABB. 14 (NACH OOSSANEN UND VAN DER KOOY AUS [8])

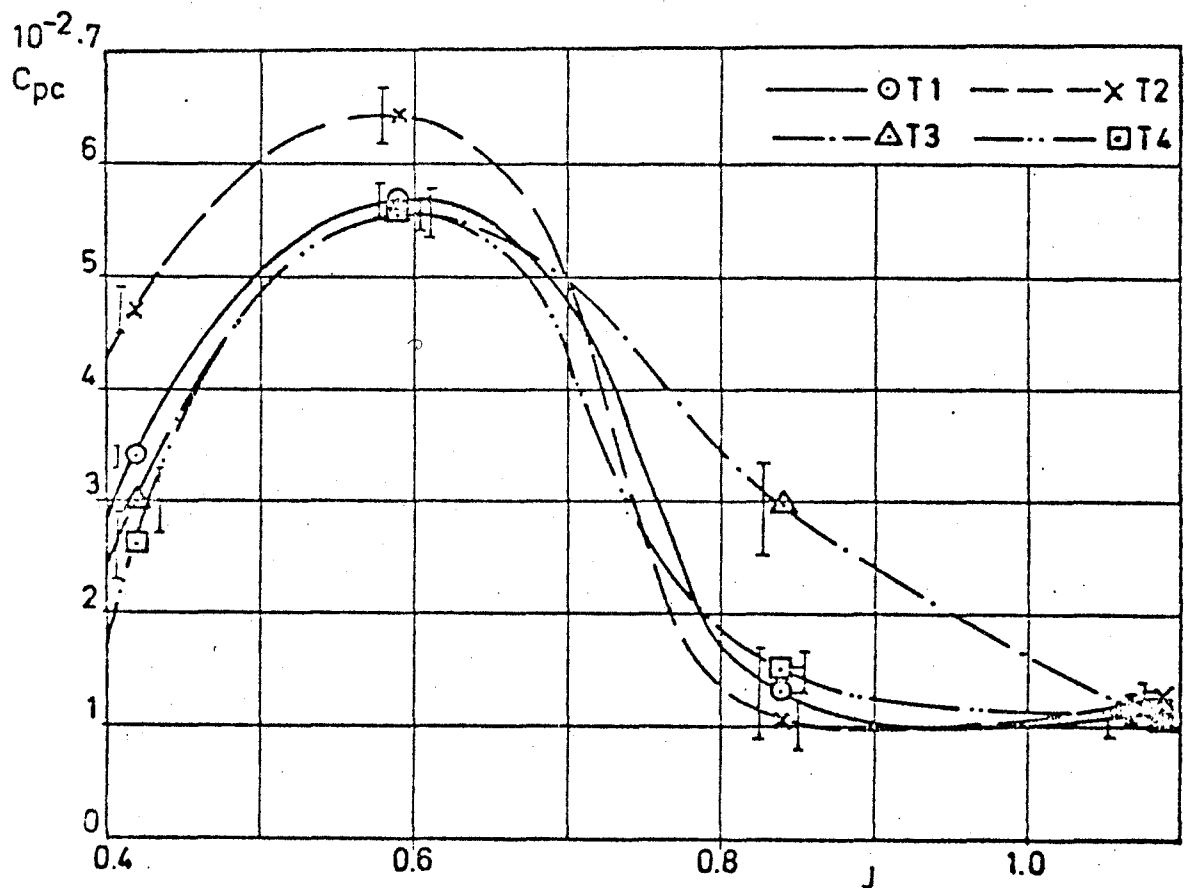
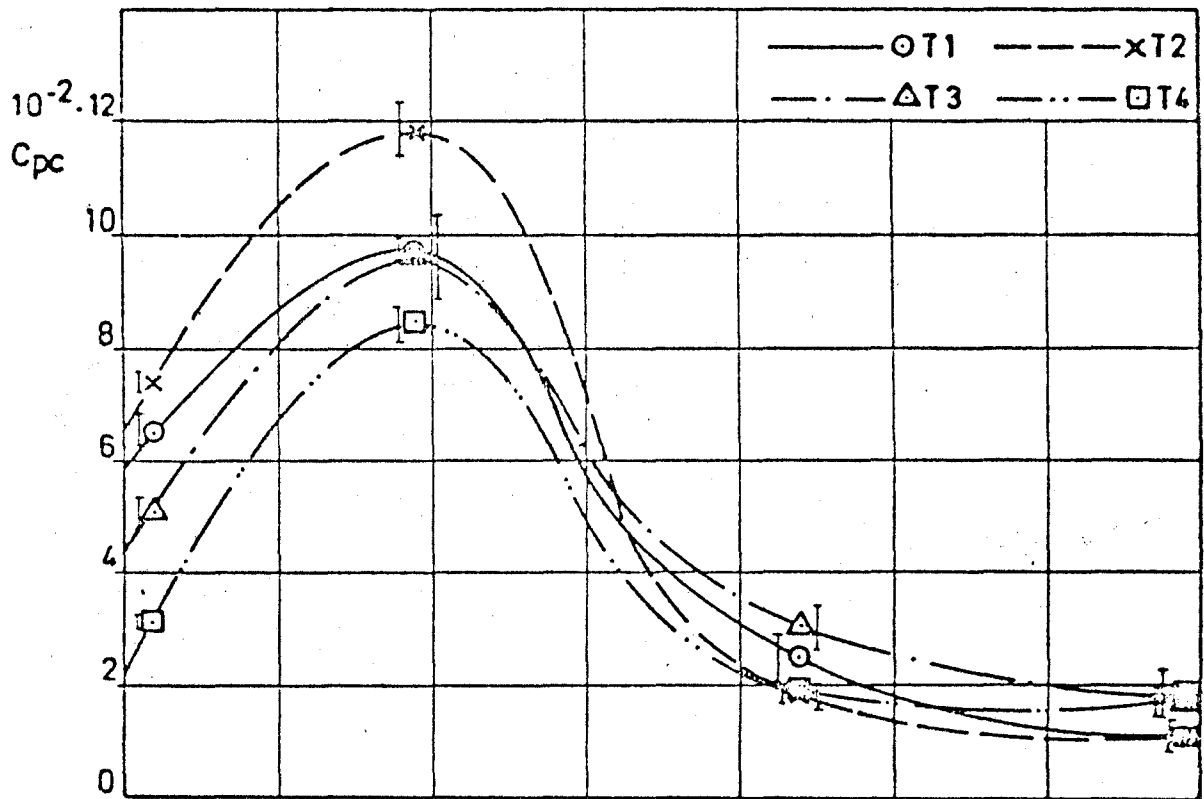


Afterbody model with pressure transducers.

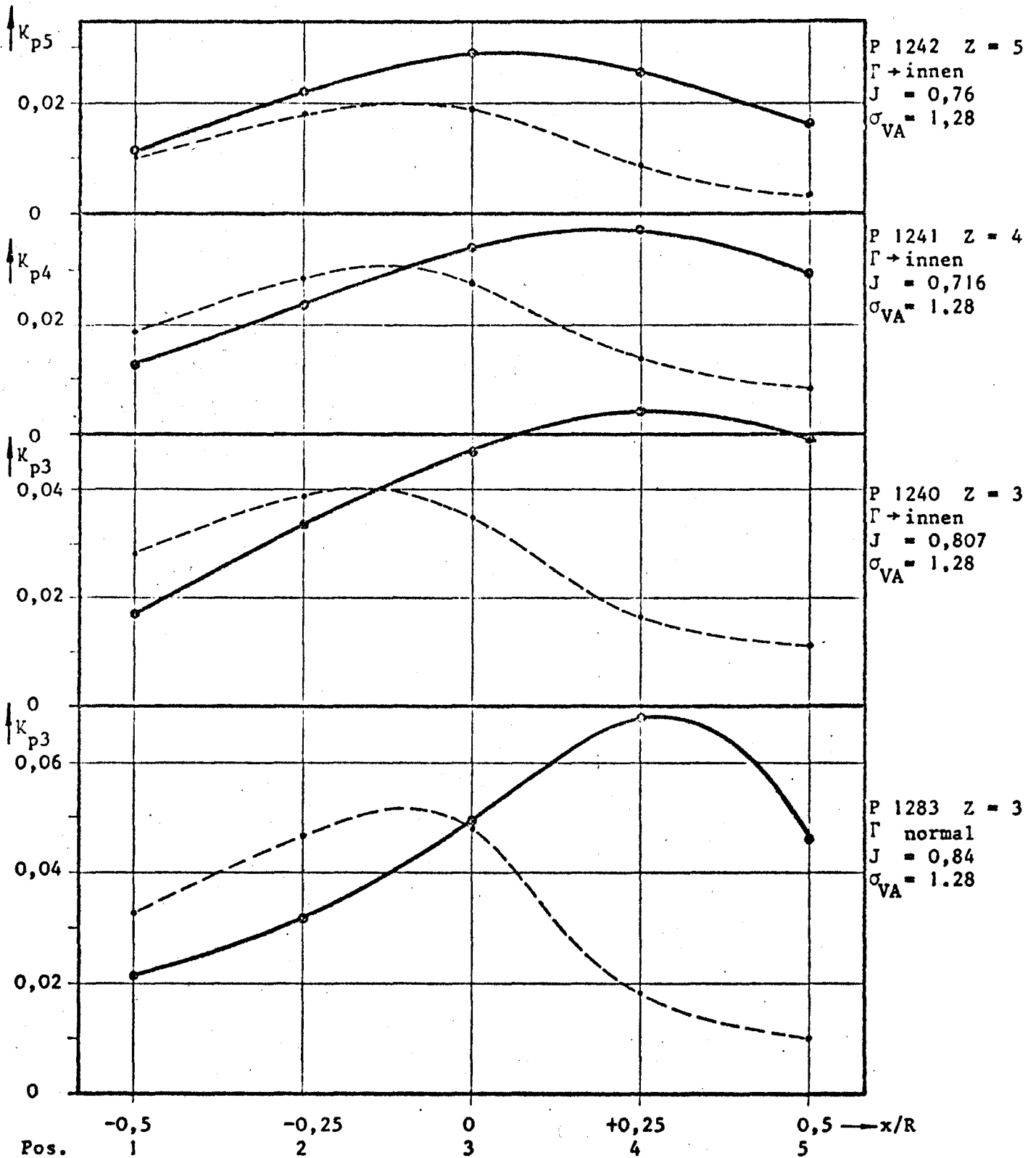
ABB. 15 (NACH HUSE AUS [2])



Experimental single amplitude, blade frequency component, cavitating propeller.
 Upper diagram: $c/D=0.07$, Cavitation pattern Nos. 1-4 (see Fig. 22).
 Lower diagram: $c/D=0.22$, Cavitation pattern Nos. 5-8 (see Fig. 23).



Experimental single amplitude, blade frequency component, cavitating propeller.
 Upper diagram: $c/D=0.37$, Cavitation pattern Nos. 9-12 (see Fig. 24).
 Lower diagram: $c/D=0.62$, Cavitation pattern Nos. 13-16 (see Fig. 25).



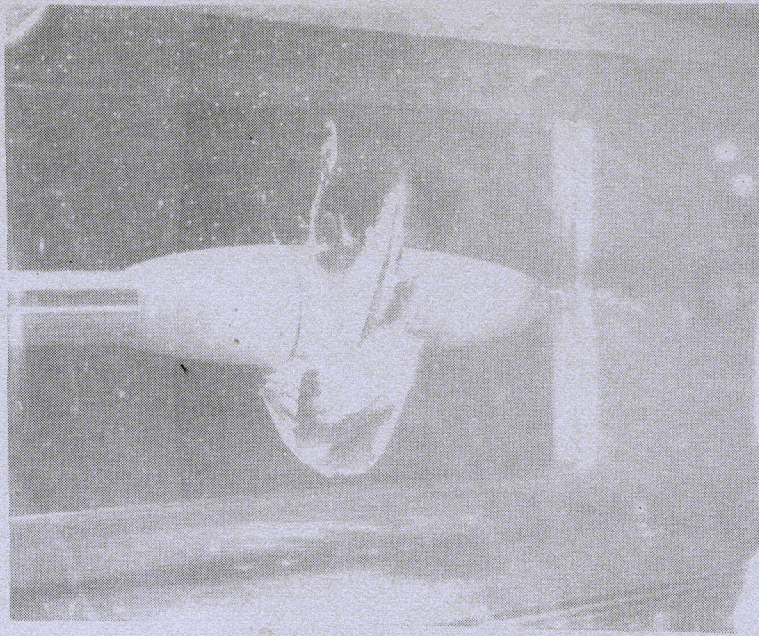
Für kavitierenden Zustand
 $v = 28$ kn eingehalten

Alle Propeller auf Konstruktions-
 steigung eingestellt.

— mit Kavitation
 - - - ohne Kavitation

Spitzenabstand $a/R = 0,352$

DIMENSIONSLOSE DRUCKAMPLITUDEN k_{pz} IN AXIALEM
 EINGEREGETEM NACHSTROM IN SCHIFFSLÄNGSRICHTUNG



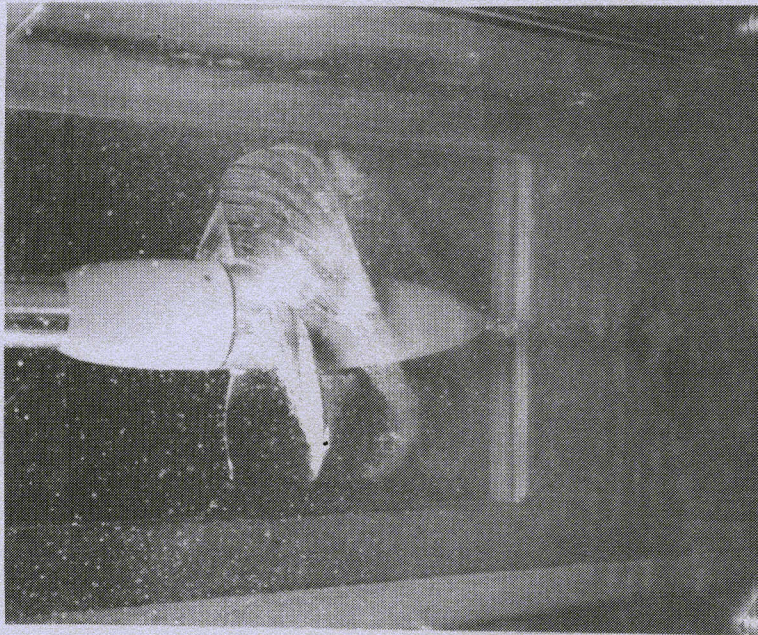
A) FOTO 135

P 1242; Z = 5

ZIRK. N. INNEN

J = 0,76

$\sigma_{VA} = 1,28$



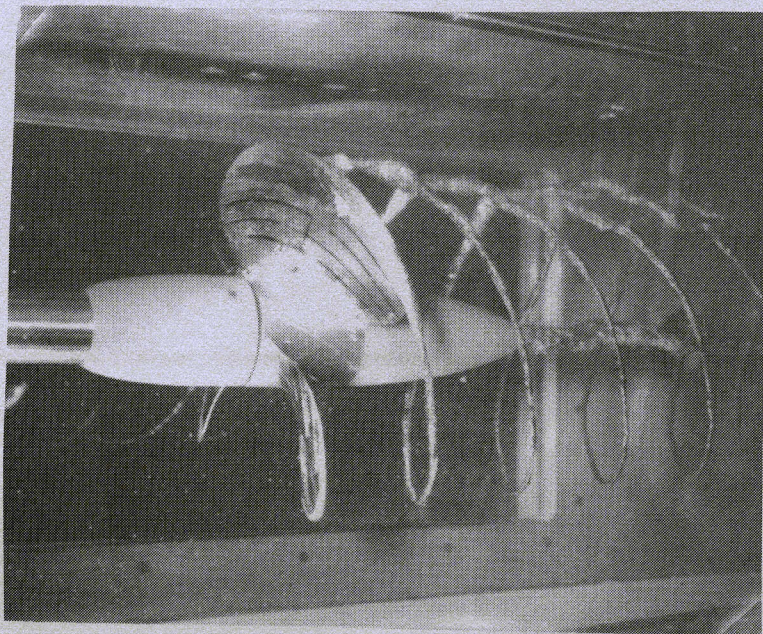
B) FOTO 97

P 1241; Z = 4

ZIRK. N. INNEN

J = 0,72

$\sigma_{VA} = 1,28$



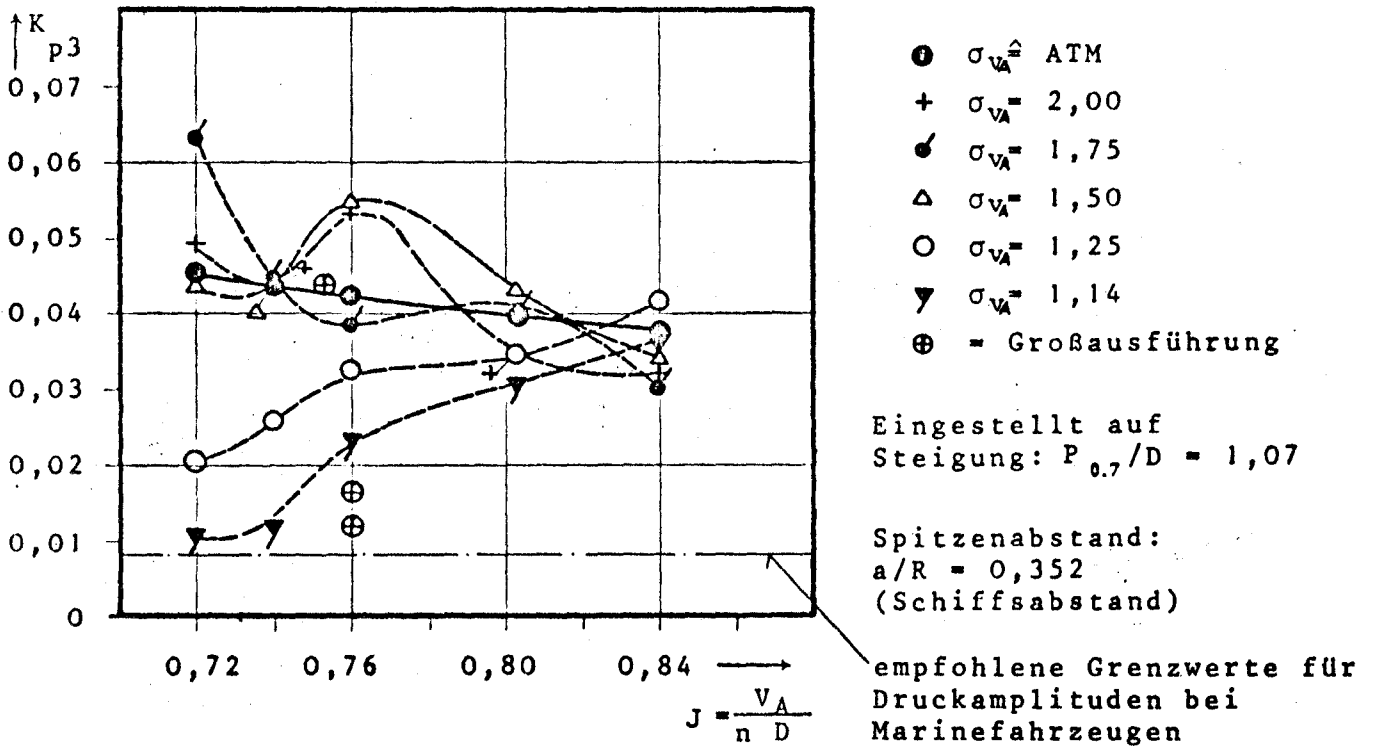
C) FOTO 124

P 1283; Z = 3

OPTIM. ZIRK.

J = 0,84

$\sigma_{VA} = 1,28$

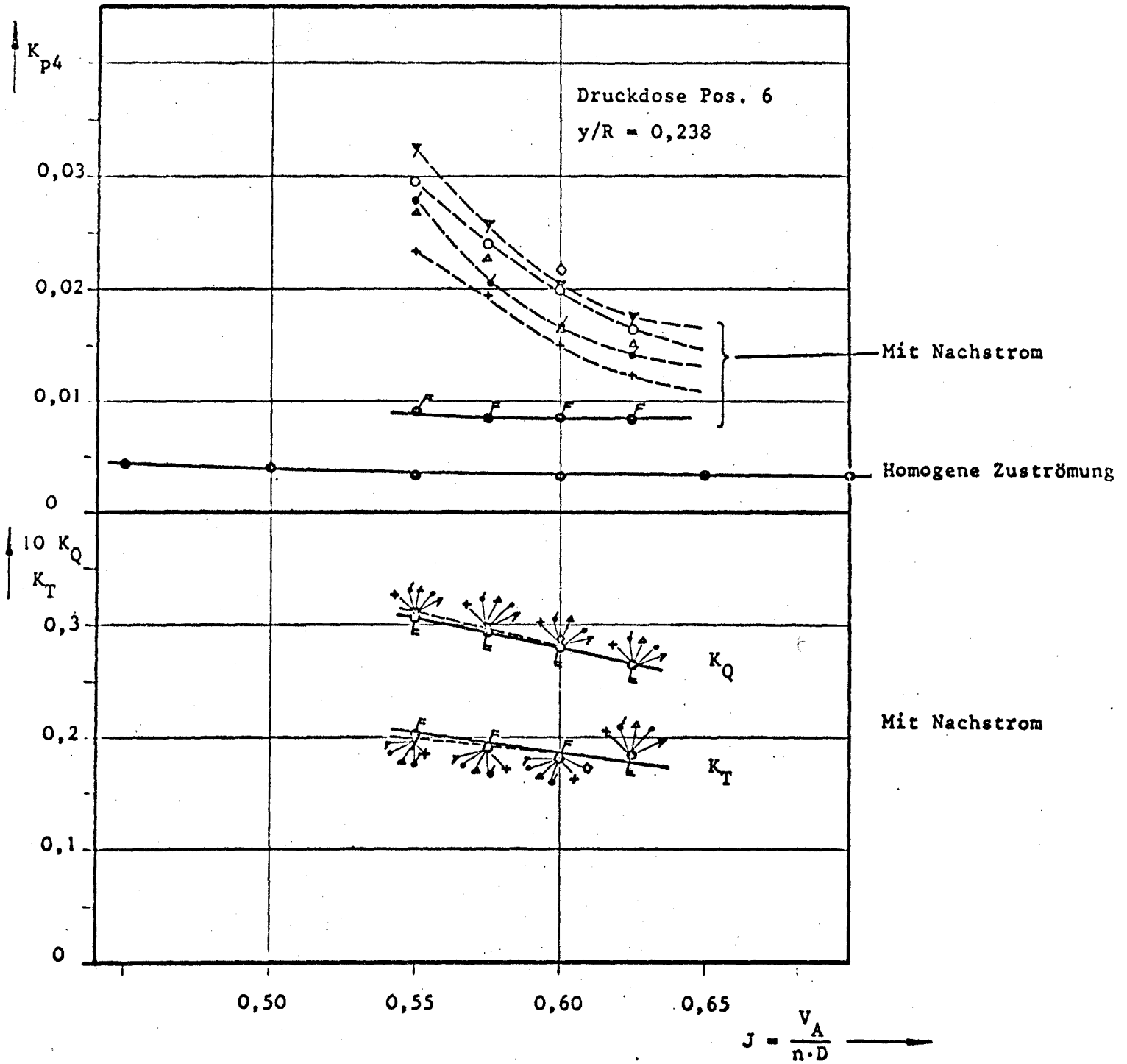


Großausführung nach Batelle - Institut:

$J_G = 0,76$ u. $\sigma_{VG} = 1,26$ $J_G = 0,75$ u. $\sigma_{VG} = 1,14$

DIMENSIONSLOSE DRUCKAMPLITUDEN K_{p3}

VON MODELL UND GROSSAUSFÜHRUNG



Spitzenabstand $a/R = 0,817$
 Flügelzahl $z = 4$

Propeller 1654 M.S. "Hornmeer"

- u. • $\sigma_{VA} \hat{=} \text{ATM}$
- + $\sigma_{VA} = 8,72$
- $\sigma_{VA} = 8,18$
- Δ $\sigma_{VA} = 7,81$
- $\sigma_{VA} = 7,46$
- ▽ $\sigma_{VA} = 7,24$
- ◇ $\sigma_{VA} = 7,03$

DIMENSIONSLOSE DRUCKAMPLITUDEN K_{P4} SOWIE
 SCHUB- UND DREHMOMENTENBEIWERTE K_T UND K_Q

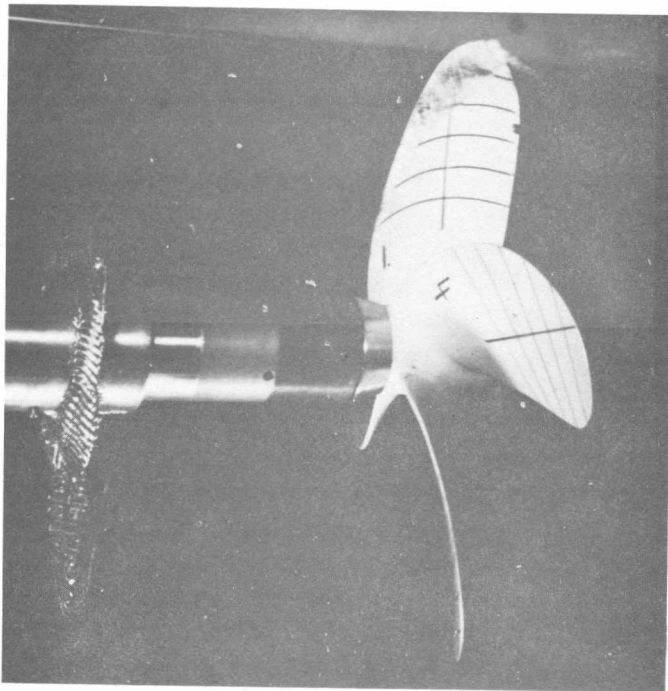


Foto 161 $\sigma_{VA} = 7,46$
 $J = 0,625$

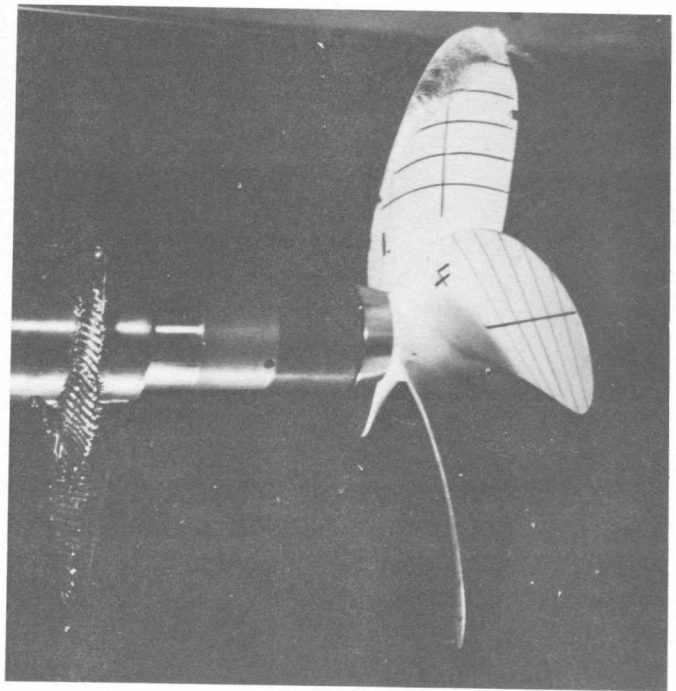


Foto 160 $\sigma_{VA} = 7,24$
 $J = 0,625$

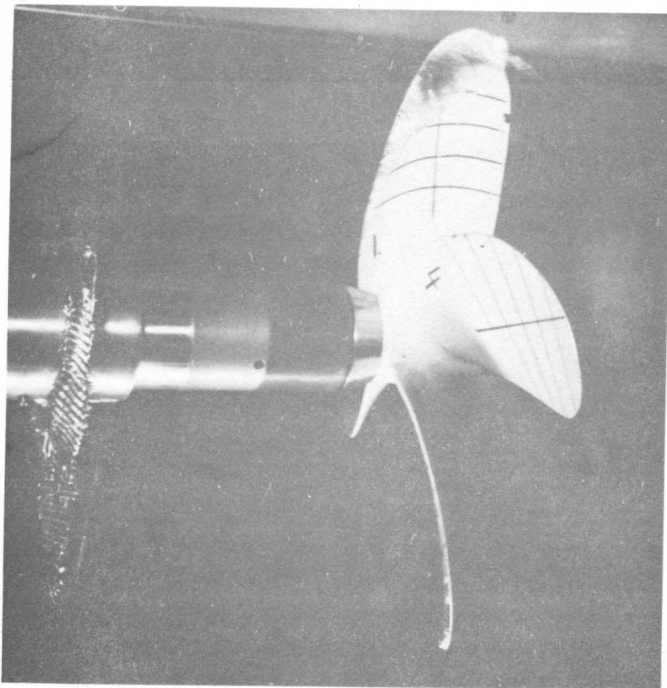
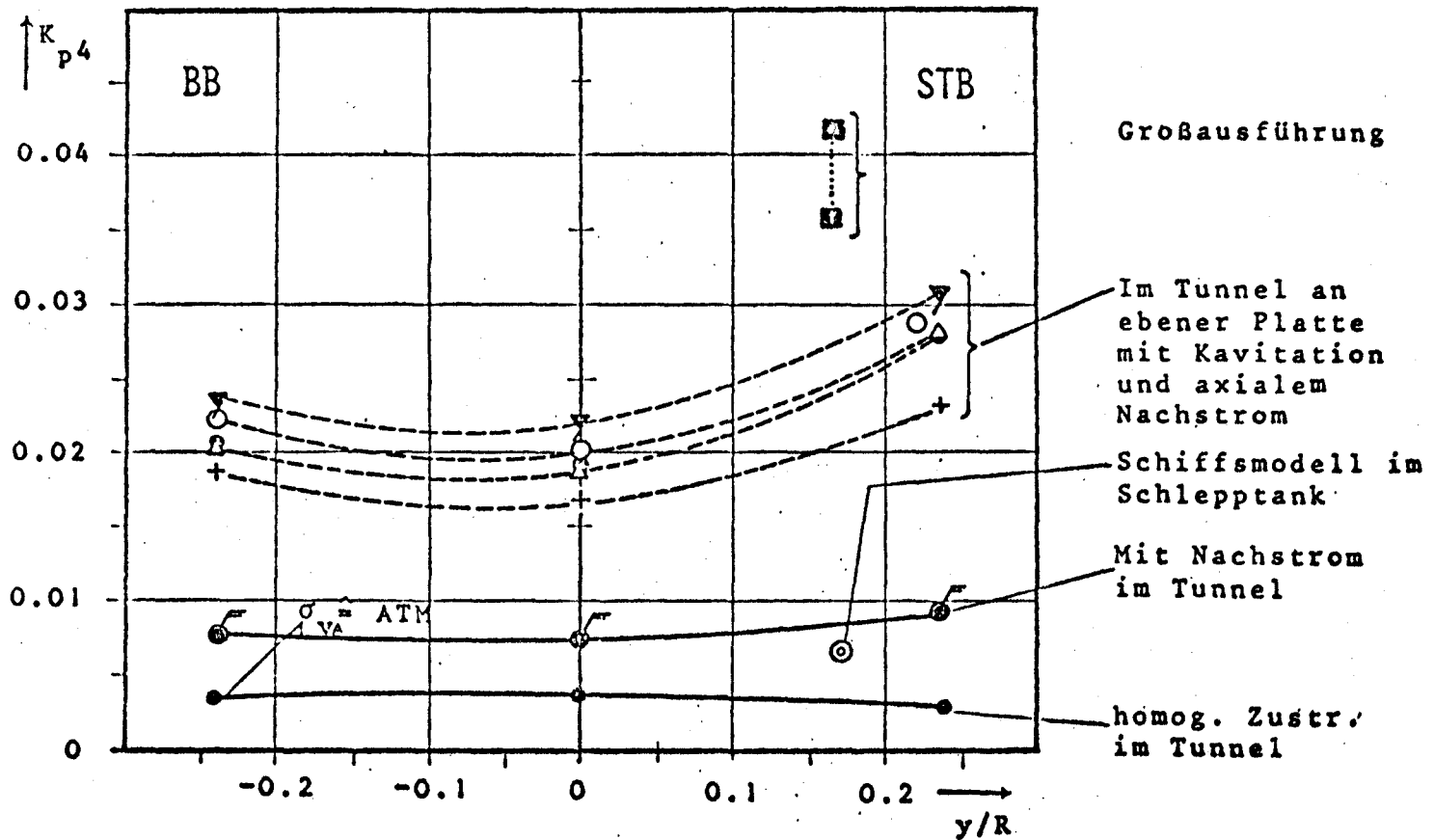


Foto 158

$\sigma_{VA} = 8,72$
 $J = 0,55$

PROPELLER 1654 MIT NACHSTROM
 SPITZENABSTAND $a/R = 0,817$



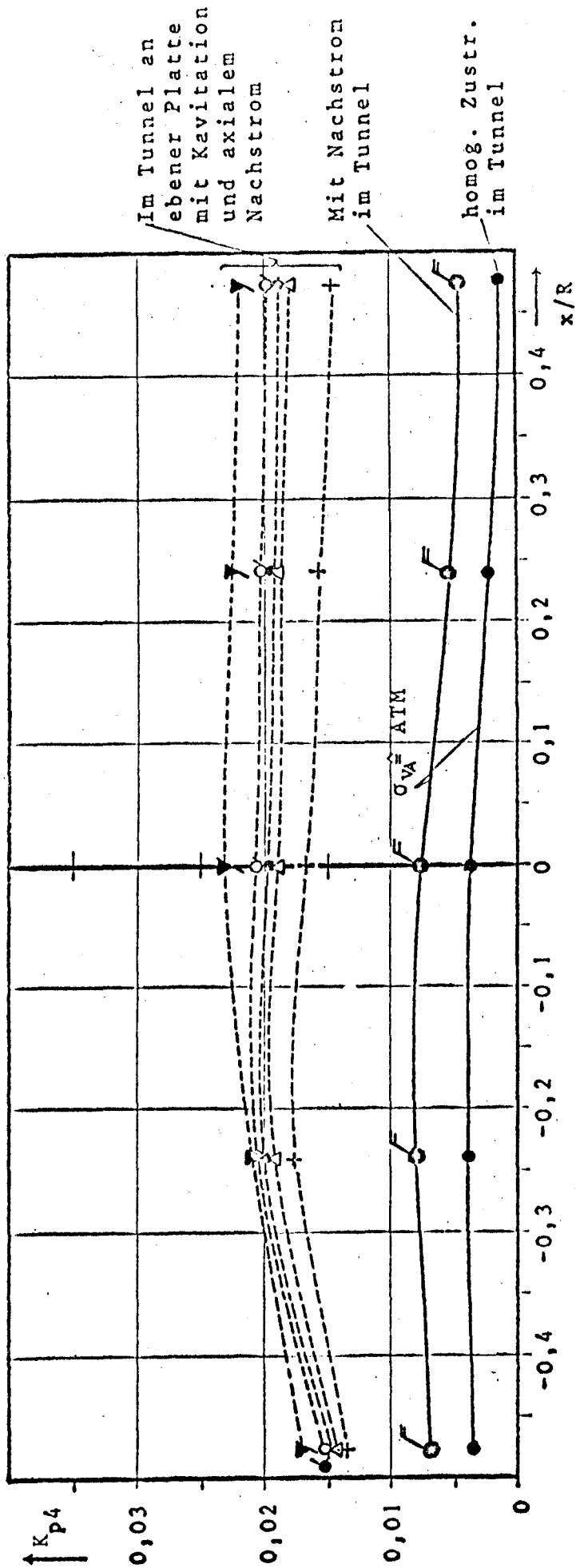
- Großausführung ($\sigma_{VA} = 7.24$)
- + $\sigma_{VA} = 8.72$
- ◊ $\sigma_{VA} = 8.18$
- △ $\sigma_{VA} = 7.81$
- $\sigma_{VA} = 7.46$
- ▽ $\sigma_{VA} = 7.24$

Spitzenabstand:
 $a/R = 0.817$
 (Schiffsabstand)
 Meßstellen für $x = 0$
 (Propellerebene)
 Fortschrittsziffer $J = 0.55$
 Flügelzahl $Z = 4$
 (rechtsdrehend)

PROPELLER 1654

M.S. "HORNMEER"

DIMENSIONSLOSE DRUCKAMPLITUDEN IN SCHIFFSQUERRICHTUNG

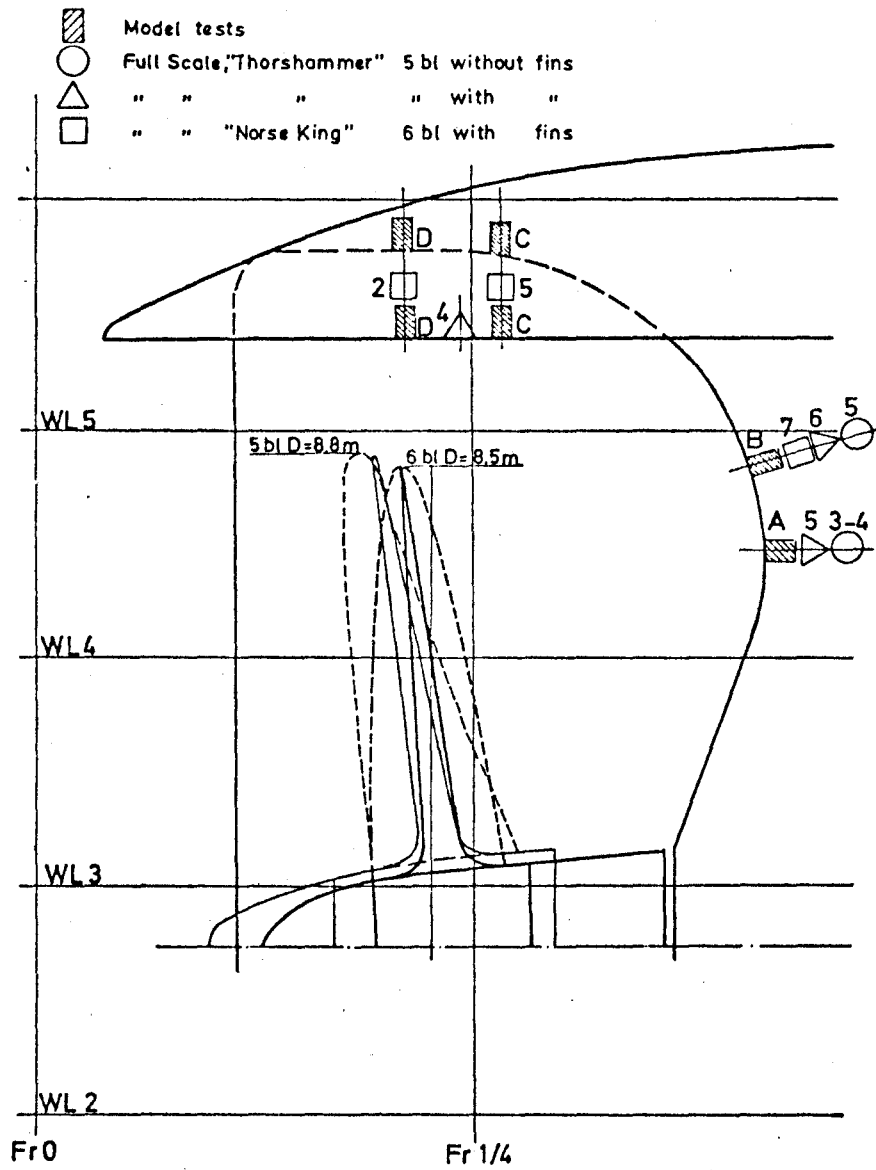


Spitzenabstand:
 $a/R = 0,817$
 (Schiffsabstand)
 Meßstellen für $y = 0$
 Fortschrittsziffer $J = 0.55$

+ $\sigma_{VA} = 8,72$
 o $\sigma_{VA} = 8,18$
 Δ $\sigma_{VA} = 7,81$
 ○ $\sigma_{VA} = 7,46$
 ▽ $\sigma_{VA} = 7,24$

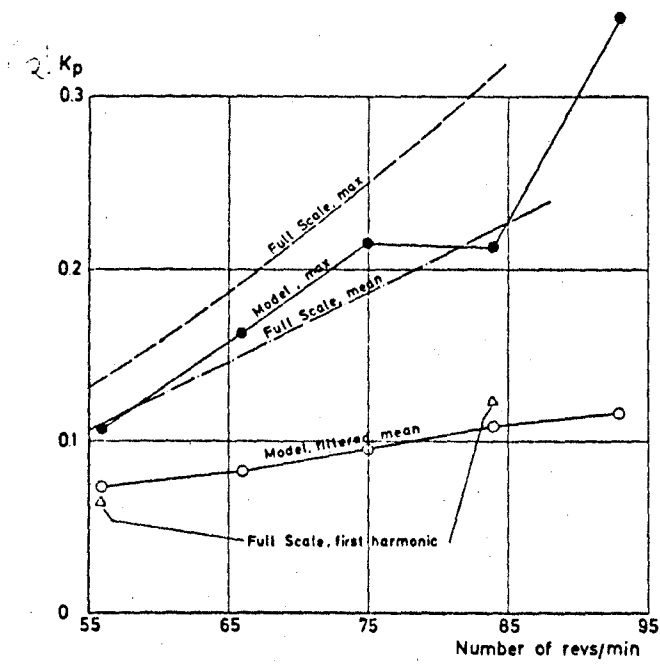
PROPELLER 1654
 M.S. "HORNMEER"

DIMENSIONSLOSE DRUCKAMPLITUDEN IN SCHIFFSLÄNGSRICHTUNG

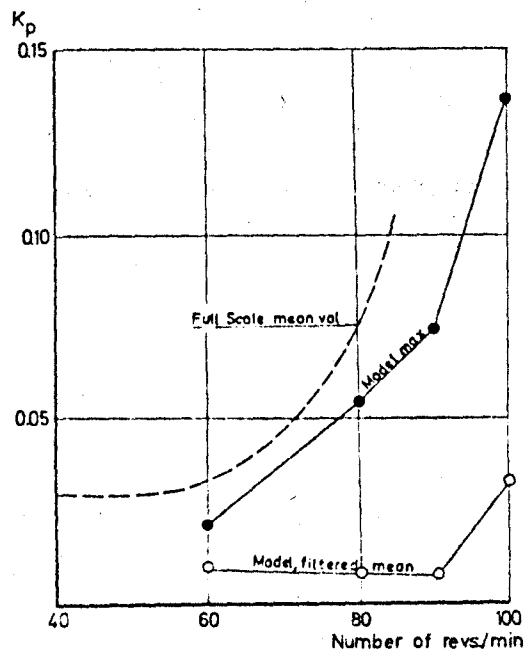


Positions of transducers for measuring pressure fluctuations on the model and full scale ship. For exact positions of transducers in full scale, see Table III. In model tests all transducers in centerline of model.

ABB. 25 (NACH JOHNSON UND SØNTVEDT [3])

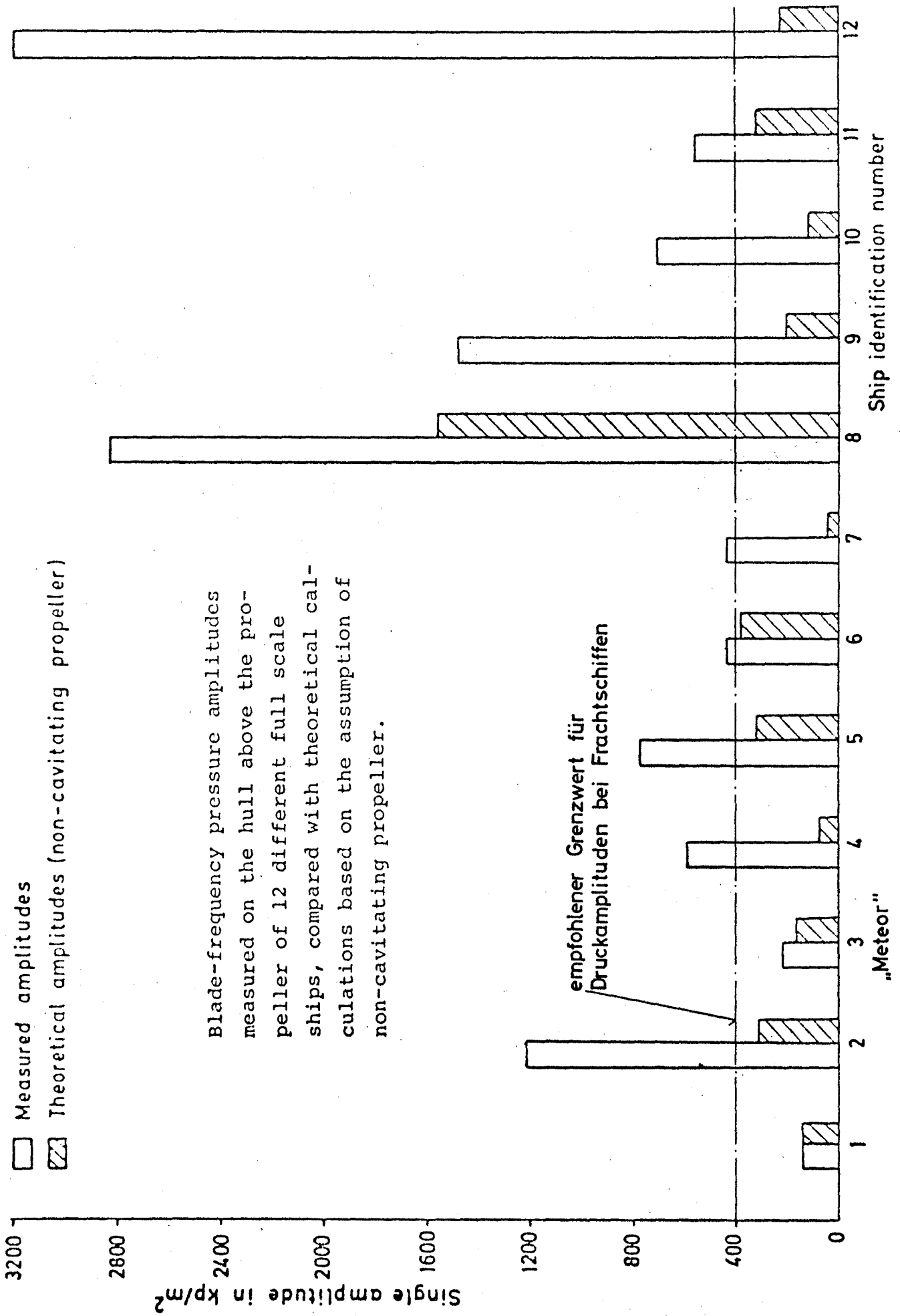


Pressure fluctuations in model and full scale. "Norse King" (with fins, 6-bladed propeller). Measuring point *D*, fully loaded condition.



Pressure fluctuations in model and full scale. "Thorshammer" without fins (5-bladed propeller). Measuring point *A*. Fully loaded condition.

ABB. 26 (NACH JOHANSSON UND SØNTVEDT [3])



Blade-frequency pressure amplitudes measured on the hull above the propeller of 12 different full scale ships, compared with theoretical calculations based on the assumption of non-cavitating propeller.

ABB. 27 (NACH HUSE [2])

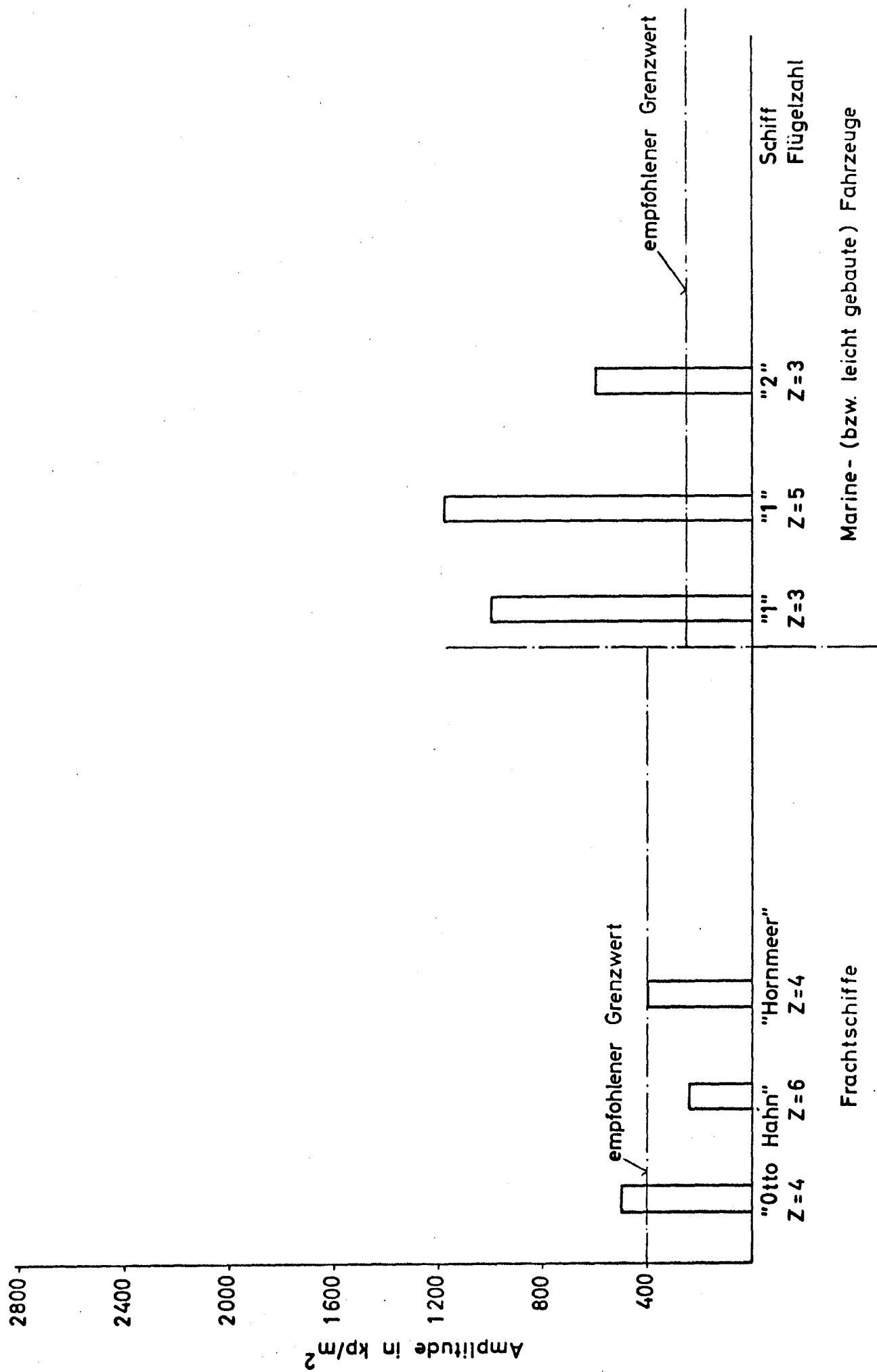
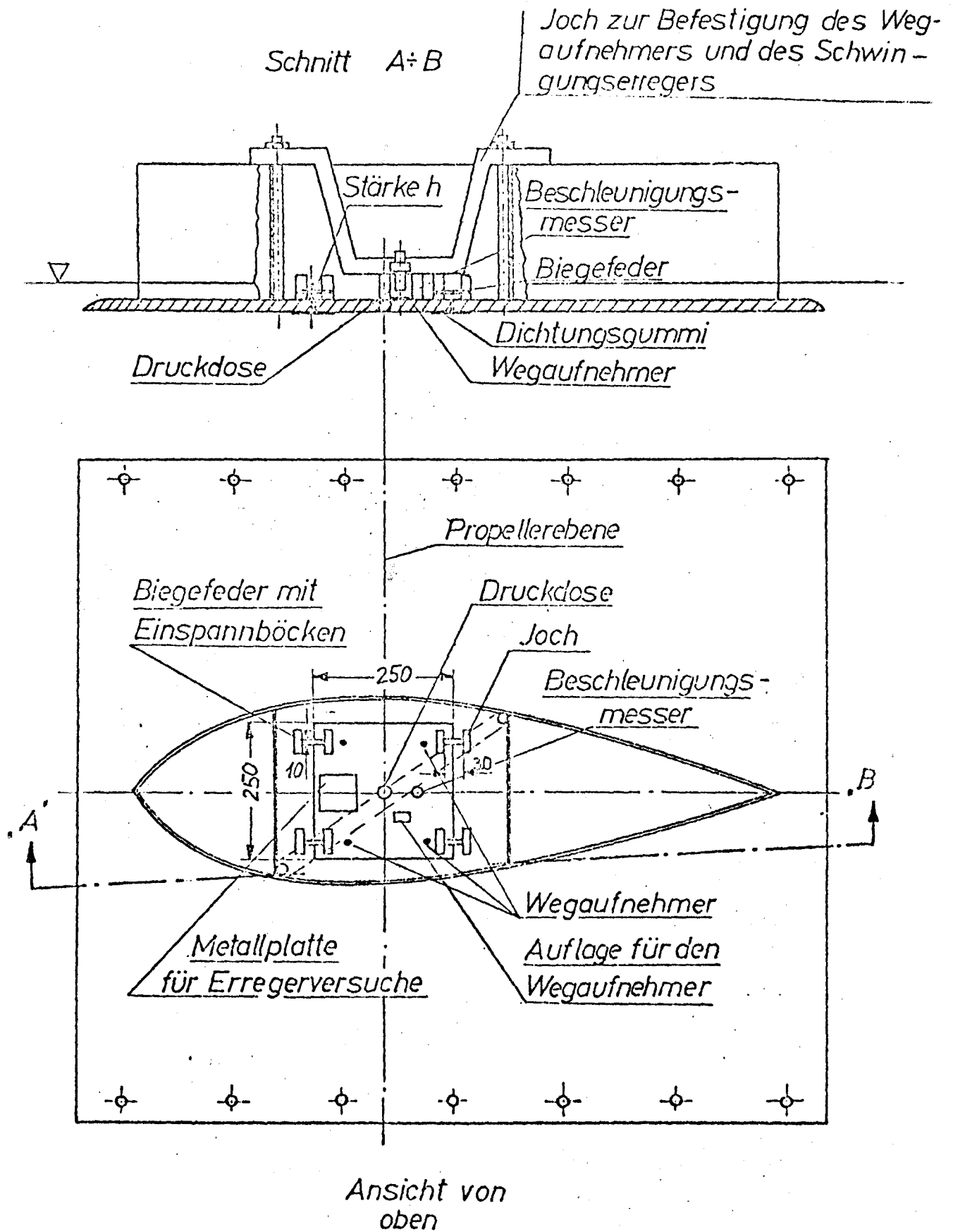
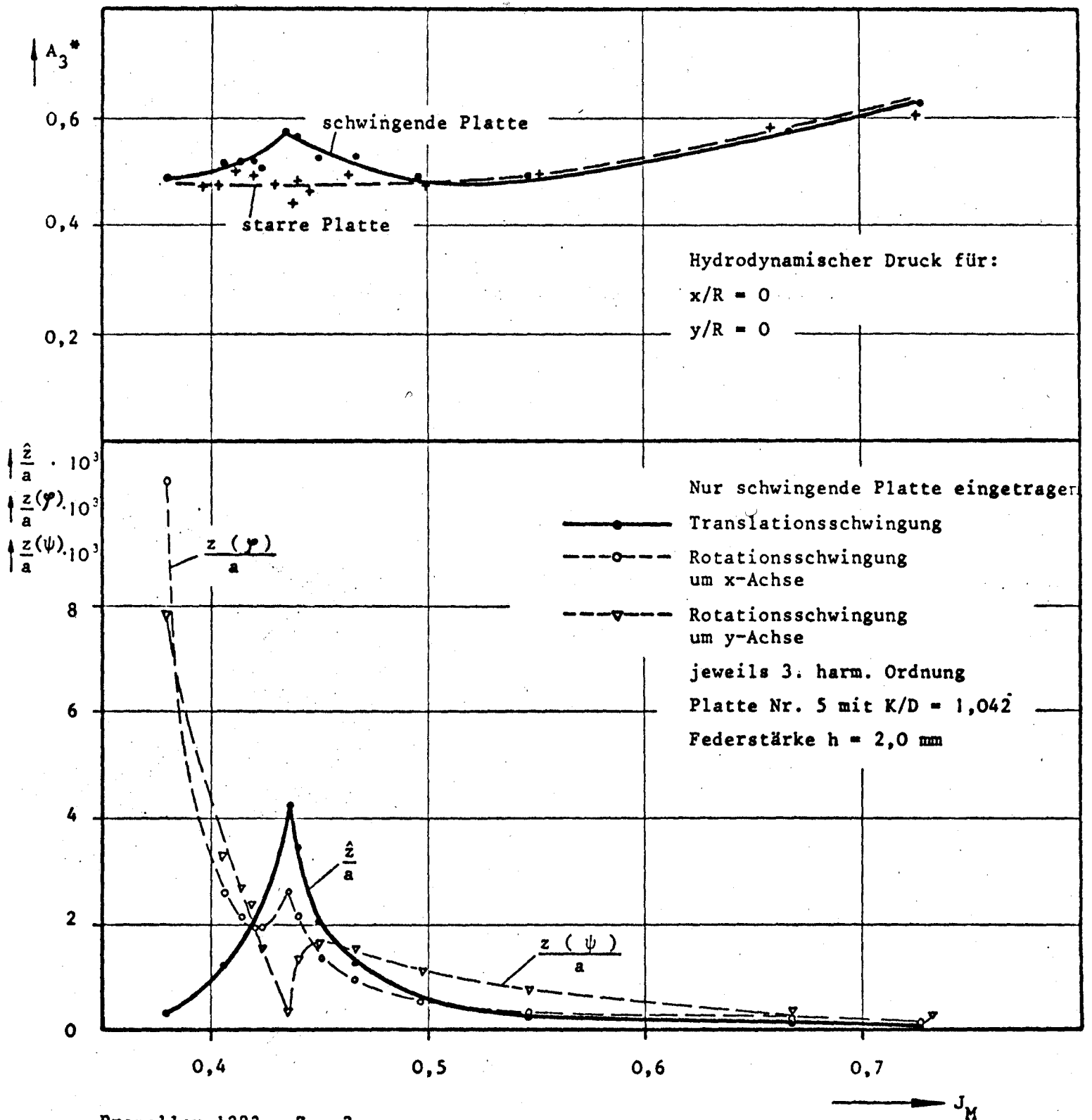


Abb. 28 ERGEBNISSE VON GROSSAUSFÜHRUNGSMESSUNGEN UND EMPFOHLENE GRENZWERTE FÜR DRUCKAMPLITUDEN

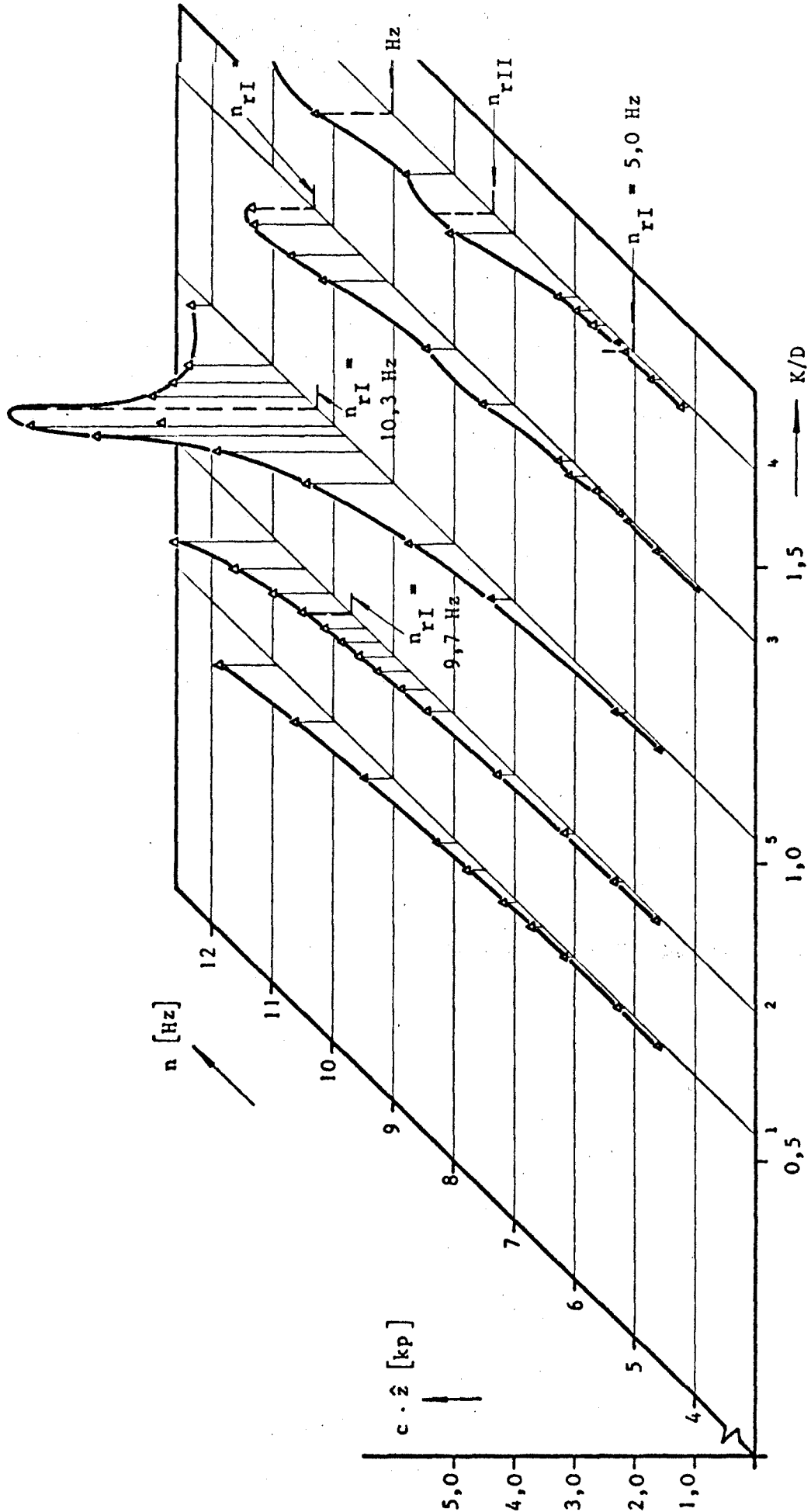


MESSEINRICHTUNG DER ELASTISCH GELAGERTEN PLATTEN



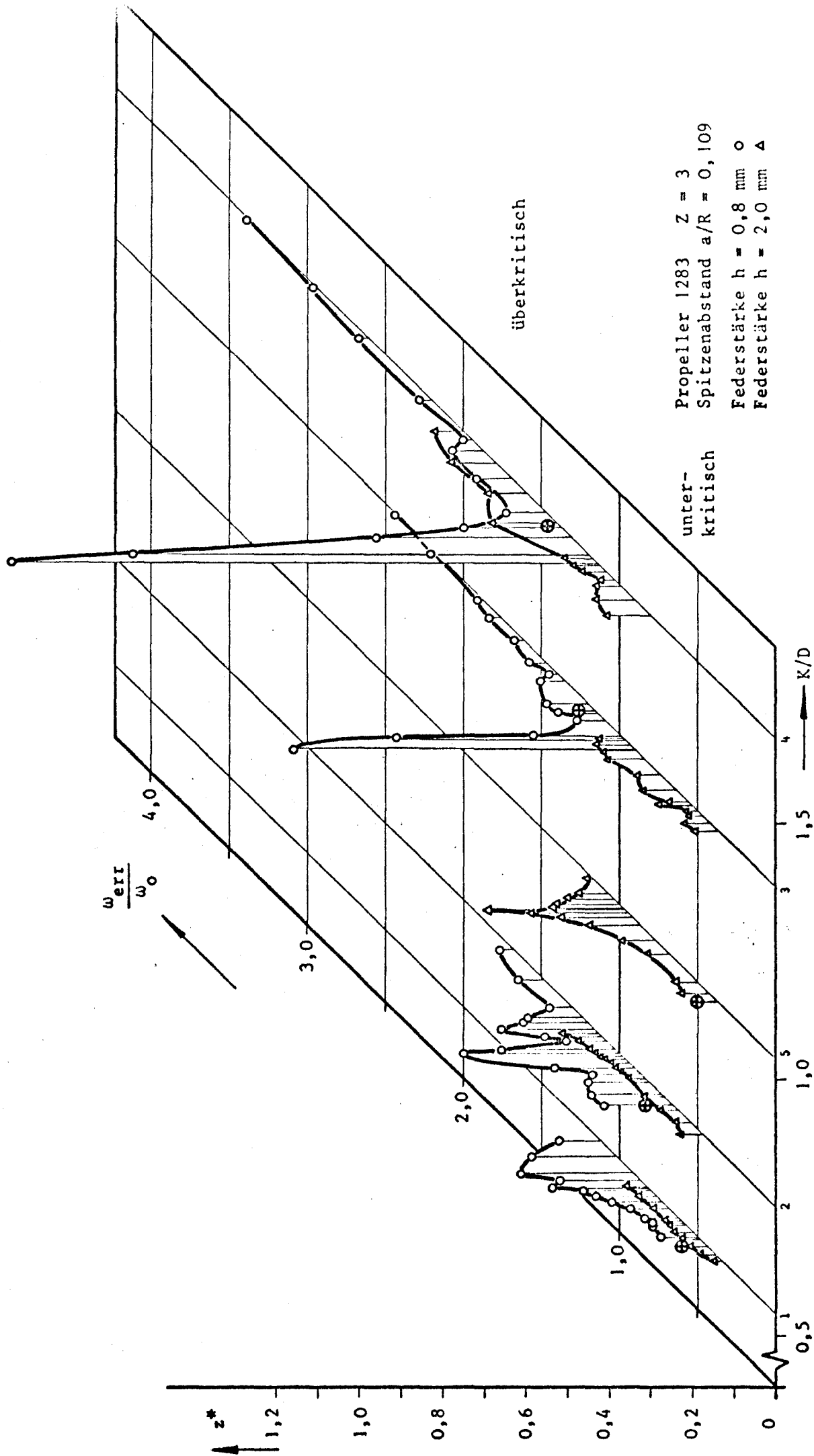
Propeller 1283 $Z = 3$
 Spitzenabstand $a/R = 0,109$

HYDRODYNAMISCHER DRUCK DIREKT ÜBER DEM PROPELLER
 UND BEWEGUNGEN DER AUSSCHNITTPLATTE



Propeller 1283 $Z = 3$ Spitzenabstand $a/R = 0,109$
 Federstärke $h = 2,0$ mm

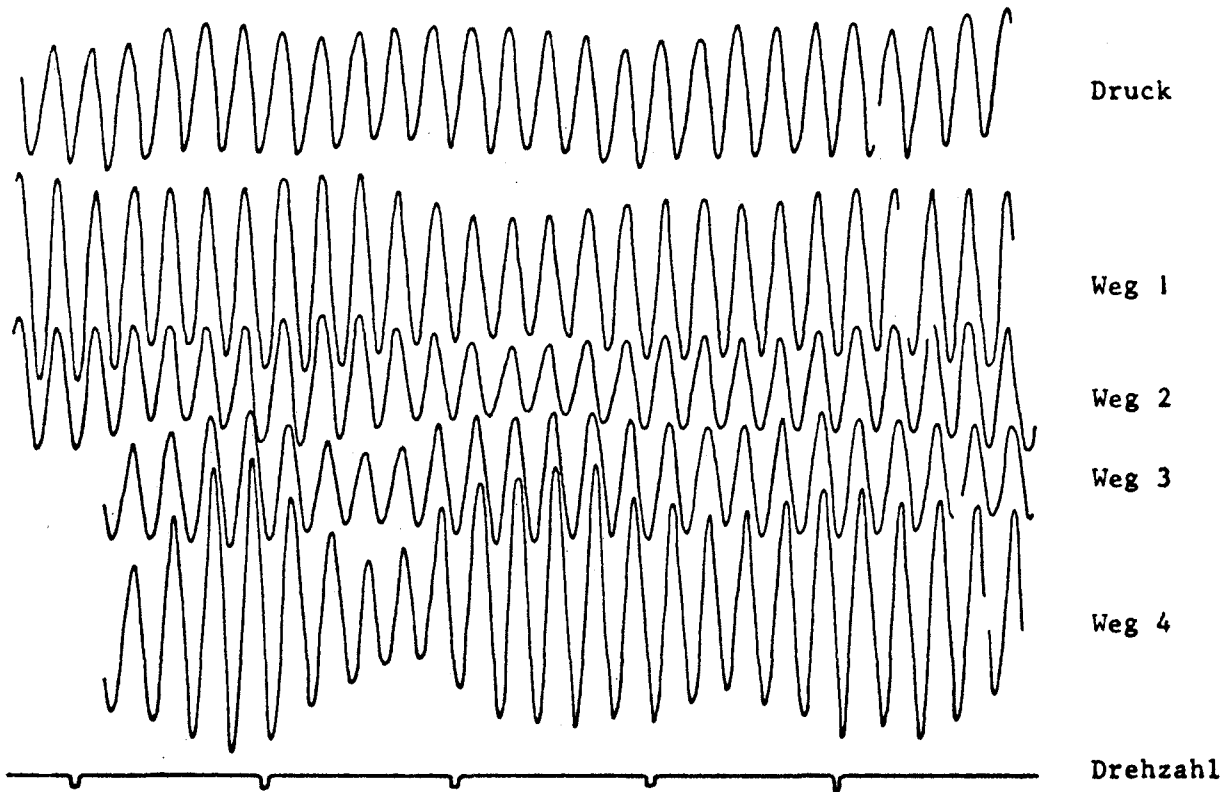
AMPLITUDEN DER FUNDAMENTKRÄFTE DER 3. HARMONISCHEN
 ORDNUNG IN VERTIKALER RICHTUNG



DIMENSIONLOSE AMPLITUDEN DER FUNDAMENTKRÄFTE DER
 3. HARMONISCHEN ORDNUNG IN VERTIKALER RICHTUNG

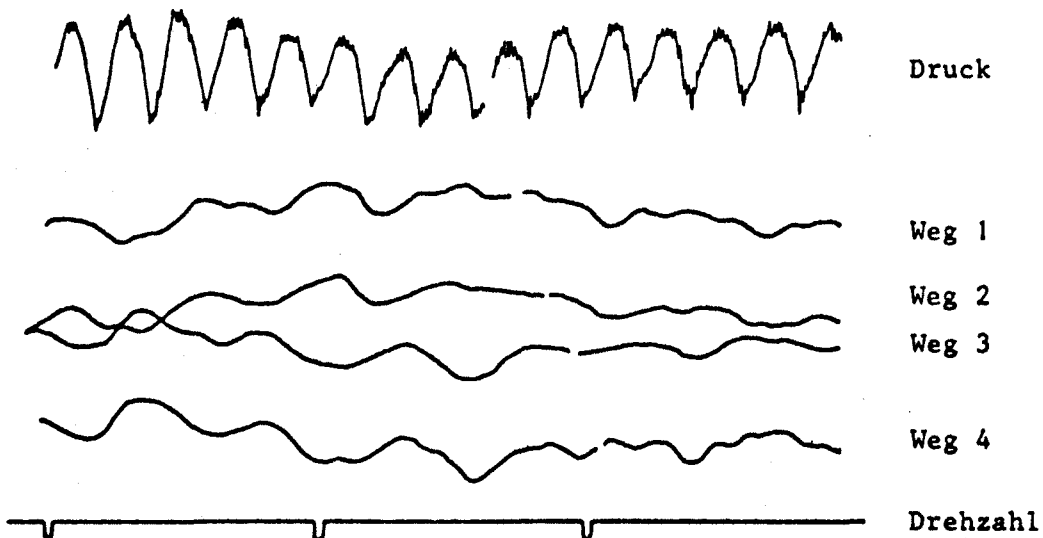
Versuch Nr. 433

(Resonanz)



Versuch Nr. 392

(überkritische Anregung)



Propeller 1242 $Z = 5$
Spitzenabstand $a/R = 0,109$
Federstärke $h = 1,5 \text{ mm}$

Versuch Nr. 433
 $n = 10,07 \text{ Hz}$ Platte 1

Versuch Nr. 392
 $n = 7,03 \text{ Hz}$ Platte 3