

321A | September 1975

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

A.Keller, E.-A.Weitendorf

**Der Einfluss des ungelösten
Gasgehaltes auf die
Kavitationserscheinungen an einem
Propeller und auf die von ihm
erregten Druckschwankungen**

**Teil A: Gasgehalts- und
Druckschwankungsmessungen**

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

**Der Einfluss des ungelösten Gasgehaltes auf die Kavitationserscheinungen an einem Propeller
und auf die von ihm erregten Druckschwankungen**

Teil A: Gasgehalts- und Druckschwankungsmessungen

A.Keller, E.A.Weitendorf, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1975

© Technische Universität Hamburg-Harburg
Schriftenreihe Schiffbau
Schwarzenbergstraße 95c
D-21073 Hamburg

<http://www.tuhh.de/vss>

Institut für Schiffbau der Universität Hamburg

Bericht Nr. 321A

Der Einfluss des ungelösten Gasgehaltes auf die
Kavitationserscheinungen an einem Propeller und
auf die von ihm erregten Druckschwankungen

Teil A: Gasgehalts- und Druckschwankungsmessungen

von

A. Keller und E.-A. Weitendorf

Hamburg, September 1975

Teil A: Gasgehalts- und Druckschwankungsmessungen

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	i
Abstract	iii
Bezeichnungen	v
1. Einleitung	1
2. Messung des ungelösten Gasgehaltes	3
2.1. Messverfahren	3
2.2. Gemessene Keimspektren und Gasgehalte	6
3. Messung der vom Propeller erregten Druckschwankungen	9
3.1. Messeinrichtungen und Daten zu den benutzten Propellern	9
3.2. Ergebnisse bei homogener Zuströmung	10
3.3. Ergebnisse im Nachstromfeld	12
3.4. Diskussion der Druckschwankungsergebnisse	13
3.4.1. Diskussion der Ergebnisse anhand von Photographien	13
3.4.2. Diskussion der Ergebnisse in bezug auf Messunsicherheit, Reproduzierbarkeit und intermittierende Kavitation	14
3.5. Umrechnung des gemessenen freien Gasvolumens und umgerechnete Darstellung der Druckschwankungsergebnisse	17
4. Schlussfolgerungen	19
5. Anmerkung	21
6. Literaturverzeichnis	22
7. Tabellen	24
8. Abbildungen	

Teil B (Stereometrie-Vorhaben)

Bericht IfS 321B

Zusammenfassung

Aus Veröffentlichungen war bekannt, dass für gleiche dimensionslose Belastungszustände im Kavitationstunnel, aber unterschiedliche absolute Drehzahlen (z.B. $n = 20$ und 30 Hz) sich unterschiedliche dimensionslose Druckamplituden ergeben hatten. Bezüglich dieser Unterschiede wurden zwei Einflüsse bei den vorliegenden Untersuchungen berücksichtigt: Zunächst der Einfluss des Froude'schen Ähnlichkeitsgesetzes durch Drehzahlvariation und weiter vor allem der Einfluss des freien Gasgehaltes des Tunnelwassers.

Der freie Gasgehalt wurde mittels der Streulichtmethode gemessen. Die Kavitationsausdehnung auf den Propellerblättern wurde durch Stereometrie bestimmt, während die Druckschwankungsmessungen an einer ebenen Platte über dem Propeller mit Druckdosen vorgenommen wurden.

Durch Be- und Entgasung des Tunnelwassers war es möglich, den freien Gasgehalt in einem ziemlich weiten Bereich zu ändern. Dabei konnten mit der Streulichtmethode Abhängigkeiten des relativen freien Gasgehaltes α vom vorgegebenen Tunneldruck p festgestellt werden. Diese hingen ausserdem vom totalen Gasgehalt (d.h. vom freien und gelösten Gasgehalt), den Tunneleinbauten (teils Siebe für die Simulation des axialen Nachstromes, teils freie Anströmung) und weiteren Tunnelzuständen (Belüftungshahn "offen" oder "geschlossen") ab.

Für den Fall eines stark kavitierenden Fregatten-Propellers in freier Anströmung waren die dimensionslosen Druckamplituden K_p bei unbehandeltem Wasser und drei Drehzahlen ($n = 30, 25$ und 22 Hz) bei jeweils sechs vorgegebenen Kavitationszahlen gleich. Auch bei starker Begasung änderten sich die Druckamplituden und Kavitationsausdehnungen nicht. Das bedeutete, dass bei voll entwickelter Kavitation die Druckamplituden nicht vom freien Gasgehalt beeinflusst werden.

Im Gegensatz hierzu hat der freie Gasgehalt auf die einsetzende Kavitation im Nachstromfeld und dementsprechend auf die Druckamplituden an der Schiffsaussenhaut einen massgebenden Einfluss. Nach einem kavitationsfreien Passieren des mehr oder weniger nachstromfreien Strömungsfeldes durch den Propellerflügel steuert der jeweilige freie Gasgehalt den früheren oder späteren Kavitationseinsatz im Gebiet höheren Nachstromes. Die Versuche zeigen, dass vor allem bei den Drehzahlen von $n = 15$ und $n = 20$ Hz die Druckamplituden vom freien Gasvolumen abhängen. Der zunächst widerspruchsvolle Unterschied zwischen den dimensionslosen Druckamplituden K_p von $n = 15$ und $n = 30$ Hz bei konstantem, gemessenem freien Gasgehalt lässt sich dadurch klären, dass man eine Umrechnung des gemessenen relativen freien Gasvolumens α vornimmt. Dazu wird die Zustandsänderungsgleichung für lufthaltiges Wasser

$$\alpha_1 = \alpha \left(\frac{p}{p_1} \right)^{1+\lambda}$$

benutzt.

Hierbei werden die zu verschiedenen Drehzahlen gehörigen unterschiedlichen absoluten Drücke p in der Teststrecke auf einen Bezugsdruck p_1 reduziert. Dann lassen sich alle Druckamplituden drehzahlunabhängig auf einer Kurve über dem umgerechneten relativen freien Gasvolumen α_1 auftragen.

Die aufgenommenen Photographien untermauern die vorliegenden Ergebnisse.

Influence of undissolved air content on cavitation phenomena
at the propeller blades and on induced hull pressure amplitudes

A b s t r a c t

It is known from publications that in a cavitation tunnel the nondimensional pressure amplitudes are different for equal nondimensional flow conditions but different absolute revolutions (e.g. $n = 20$ and 30 Hz). Two possible influences were taken into account in the present work: the influence of the Froude law of similarity by varying the propeller revolutions and more importantly the free air content of the tunnel water.

The free air content was measured by the scattered light technique. The extension of cavitation on the propeller blades was determined by stereometric photography. Inside the test section, pressure pick-ups were installed on a flat plate above the propeller.

The free air content was varied in a rather wide range by gassing and degassing. By means of the scattered light technique dependencies of the free air content α on the chosen pressure p in the test section were detected. Moreover the α -values depended on the total air content (i.e. dissolved and undissolved), on the tunnel installations (e.g. grids for axial wake simulation) and on the tunnel conditions (e.g. the state of a valve for ventilation).

For the case of a heavily cavitating frigate propeller in open water condition and in not artificially gassed water it was shewn that the nondimensional pressure amplitudes K_p of the blade frequency were equal for the six cavitation numbers used. Furthermore in heavily gassed water the K_p -values were identical to those in "normal" water. This means that for fully developed cavitation the pressure amplitudes are not affected by the free air content or the chosen propeller revolutions. In contrast to the case of fully developed cavitation, the free air content

has an extreme influence on the pressure amplitudes K_p in a wake. The inception of the cavitation, sooner or later, at points of high wake concentration in conjunction with the free air content controls the pressure amplitudes in a decisive way. The tests show clearly this result, especially for revolutions $n = 15$ and 20 Hz. The difference between the K_p -values at $n = 15$ and $n = 30$ Hz with constant measured relative free gas volume α can be explained by a reduction of the measured α -values. For this purpose the equation of state for water with air content

$$\alpha_1 = \alpha \left(\frac{p}{p_1} \right)^{1+\lambda}$$

was used.

Proceeding in this way, the different absolute pressures p in the test section, corresponding to different revolutions, are referred to a reduced pressure p_1 . Then all measured K_p -values can be united in a curve plotted against the reduced relative free gas volume α_1 .

The stereometric photographs underline the results found.

Bezeichnungen

A_E/A_O	Flächenverhältnis des Propellers
A_E	Abgewickelte Flügelfläche
A_O	Propellerkreisfläche
D	Durchmesser der Gasblasen
D	Propellerdurchmesser
$J = \frac{V_A}{n D}$	Fortschrittsziffer des Propellers
$J_{KT} = \frac{V_A}{n D}$	Fortschrittsziffer aufgrund der Schubidentität, d.h. aufgrund des K_T -wertes des Freifahr-Diagramms
$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^2}$	Schubbeiwert des Propellers
$K_{pz} = \frac{\Delta p}{\rho n^2 D^2}$	Dimensionslose Druckamplitude der Blattfrequenz
R	Propellerradius
T	Propellerschub
V_A	Mittlere Anströmgeschwindigkeit in der Propellerebene
V	Strömungsgeschwindigkeit in m/s
V	Meßvolumen im Laserstrahl in cm^3
Z	Flügelzahl des Propellers
a	Propellerspitzenabstand (vgl. Abb. 9)
c_o	Gelöste Gasmenge in Volumen pro mille
c_s	Größstmögliche Lösungsmenge bzw. Sättigungskonzentration bei vorliegender Temperatur des Tunnelwassers und atmosphärischem Druck ($p = 760$ mm Hg)
n	Propellerdrehzahl

Δp	Druckamplitude
p	Druck
x, y, z	Koordinatensystem
$\alpha_{BL} = c_s$	Bunsen'scher Lösungskoeffizient
α	Relatives freies Gasvolumen = Verhältnis aller gemessenen freien Gasblasen pro Volumeneinheit zur Volumeneinheit des strömenden Mediums
α_1	Auf einen Bezugsdruck p_1 umgerechnetes rel. freies Gasvolumen
$\epsilon = \frac{c_o}{c_s} = \frac{\text{gelöste Menge des Gases}}{\text{größtmögliche Lösungsmenge}}$	Gassättigungsgrad bei vorliegendem Druck
ϵ_{ATM}	Gassättigungsgrad bei atmosphärischem Druck ($p = 760 \text{ mm Hg}$) und vorliegender Temperatur
λ	Polytropenexponent in der Gleichung $\alpha_1 = \alpha \left(\frac{p}{p_1}\right)^{1+\lambda}$
ρ	Dichte des Wassers
$\sigma_{VA} = \frac{p - p_v}{(\rho/2)V_A^2}$	Kavitationszahl bezogen auf mittlere Propelleranströmgeschwindigkeit
$\sigma_n = \frac{p - p_v}{(\rho/2)(\pi n D)^2}$	Kavitationszahl bezogen auf Propellerspitzenumfanggeschwindigkeit

Der Einfluss des ungelösten Gasgehaltes auf die Kavitationserscheinungen an einem Propeller und auf die von ihm erregten Druckschwankungen.

Teil A: Gasgehalts- und Druckschwankungsmessungen

1. Einleitung

Propellererregte Druckamplituden bilden bei der Vibrationserregung im Hinterschiff neben den Propeller-Lagerlasten die zweite Art der Erregung durch den Propeller. Einer diesbezüglichen Veröffentlichung von van Oossanen und van der Kooy aus dem Jahre 1972 /1/ war zu entnehmen, dass für gleiche dimensionslose Belastungszustände im Kavitationstunnel, aber ungleiche absolute Modelldrehzahlen (z.B. $n=20$ Hz und $n=30$ Hz) sich um ca. 50 bis 80 % unterschiedliche dimensionslose Druckamplituden ergeben hatten. Das bedeutete, ganz abgesehen von den Unsicherheiten durch den Masstabeffekt des Nachstromes, dass die im Projektstadium durch Kavitationsversuche festgestellten Druckamplituden im Nachstromfeld, die u.a. zur Beurteilung der Vibrationsgefahr herangezogen werden, unsicher sind.

Als Ursache hierfür kommen zwei Einflüsse in Frage, nämlich

1. der Einfluss des vernachlässigten Froude'schen Ähnlichkeitsgesetzes auf die Modelldrehzahl und
2. der Einfluss der freien Gasblasen bzw. des freien Gasgehaltes des Versuchsmediums, die neben dem Dampfdruck den Kavitationseinsatz mitbestimmen.

Bei der Einhaltung des Froude'schen Ähnlichkeitsgesetzes ist der richtige Druckverlauf in Längsrichtung des Propellerflügels gewährleistet. Normalerweise kann die Froude'sche Drehzahl bei Kavitationsversuchen jedoch nicht eingehalten werden, da sie ausserhalb der möglichen Betriebsdrehzahl und des dafür notwendigen Betriebsdruckes konventioneller Kavitationstunnel liegt.

Was den ungelösten Anteil des in einer Flüssigkeit vorhandenen Gases, d.h. dessen freie Gasblasen oder nicht vollständig benetzte Schwebstoffteilchen betrifft, so sind diese für den Einsatz der Kavitation verantwortlich. Das wurde u.a. durch experimentelle Kavitationsuntersuchungen an Modellkörperfamilien in Verbindung mit der Messung der sogenannten Kavitationskeime nachgewiesen /2/. Da es sich bei einem Frachtschiffpropeller im Nachstrom ebenfalls um einsetzende Kavitation handelt, ist es naheliegend, den Einfluss des Keimspektrums des Wassers auf die Kavitationerscheinungen und die dadurch erregten Druckschwankungen zu untersuchen.

Bei den unter diesen Aspekten konzipierten Versuchen im mittleren Kavitationstunnel (Abb.1a und 1b) der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt (HSVA) wurden im November und Dezember 1974 simultan drei Arten von Messungen vorgenommen:

1. die Messung des ungelösten Gasgehaltes bzw. des Keimspektrums des Tunnelwassers mit der Laser-Streulichtmethode,
2. die Bestimmung der vom Propeller erregten Druckamplituden mit 7 Druckdosen an einer ebenen Platte und
3. das Aufmessen der Kavitationerscheinungen an einem Propellerflügel mittels Stereometrie.

Die unter 1. und 2 genannten Untersuchungen werden in Teil A des vorliegenden Berichtes dargestellt, während das Stereometrie-Vorhaben den Teil B umfasst. Die unter Punkt 3 genannte Stereometrie wurde vor allem deshalb eingesetzt, um genaue Angaben über die Ausdehnung und Dicke von Kavitationsschichten auf den Propellerflügeln zu erhalten.

2. Messung des ungelösten Gasgehaltes

2.1. Messverfahren

Nachdem die vom ITTC-Cavitation Committee angeregten Vergleichsuntersuchungen von drei optischen Verfahren zur Keimgehaltsbestimmung ergeben haben /3/, dass das mit Unterstützung der DFG an der Versuchsanstalt für Wasserbau der TU München entwickelte sog. Streulichtverfahren genaue Messergebnisse liefert, konnte diese Messtechnik bei der im vorliegenden Bericht beschriebenen Untersuchung eingesetzt werden. Weitere Vorteile dieser Methode bestehen darin, dass sie verglichen mit anderen Methoden leicht einsetzbar ist und dass die Resultate direkt nach der Messung zur Verfügung stehen.

Beim Streulichtverfahren wird das optische Verhalten der Keime zu deren Registrierung herangezogen. Wenn Teilchen oder Blasen einen Lichtstrahl passieren, streuen sie einen von der Grösse, Form und optischen Brechungsindex abhängigen Teil des Lichtes. Durchsetzt ein Keim ein optisch abgegrenztes Messvolumen von hoher Beleuchtungsstärke, so sendet er einen Lichtblitz aus. Die Zahl der streuenden Keime in einer gegebenen Zeitspanne ist eine Funktion der Durchsatzgeschwindigkeit durch das Messvolumen, der Keimkonzentration, und der Messvolumengrösse, die bestimmt wird durch den Lichtstrahldurchmesser und der Optik des Streulicht-Empfangssystems.

Als Lichtquelle dient ein He-Ne-Laser und als Streulichtdetektor ein Photomultiplier. Die Amplituden der Photomultiplierimpulse sind proportional der Streulichtintensität und damit proportional der Keimgrösse. Die Impulse werden verstärkt und mittels Impulshöhendetektor, Signalspeicher und Rechner ausgewertet, d.h. ihrer Grösse nach sortiert und gezählt. Nach einer bestimmten Messzeit liegt das Ergebnis dann in Form eines Keimgrössenhistogramms vor. Die prinzipielle Messanordnung zeigt Abb. 1c.

Die Wahl der Grösse des Messvolumens V ist von grosser Bedeutung, da es optisch so definiert werden muss, dass es einerseits klein genug ist, um einzelne Keime zu isolieren, andererseits gross genug, um die grössten vorkommenden Keime ganz zu erfassen. Wie gross das Volumen V sein darf, damit der Koinzidenzfehler einen bestimmten Prozentsatz, z.B. 5% nicht übersteigt, lässt sich abschätzen. Danach müsste bei einer vorhandenen Keimkonzentration von 100 Keimen pro cm^3 das Messvolumen auf 1 mm^3 beschränkt werden. Mit der optischen Abgrenzung ist dies leicht zu verwirklichen, denn sie lässt eine Verringerung von V auf etwa 10^{-3} mm^3 zu, womit die messbare Maximalkonzentration bei 10^5 Keimen pro cm^3 liegt, wobei allerdings in diesem Beispiel die grössten messbaren Keime in der Grössenordnung von etwa $30 \mu\text{m}$ liegen würden.

Ein Nachteil, der aus der optischen Abgrenzung des Messvolumens erwächst, sind die Randzonen, die einmal durch die nur mit endlicher Schärfe mögliche Abbildung, zum anderen durch das teilweise Hinausreichen der Keime über den Rand der scharfen Abbildung entstehen. Die beiden so verursachten Messfehler kann man abschätzen und durch statistische Überlegungen korrigieren.

Aufgrund von Voruntersuchungen über die im benutzten mittleren Tunnel der HSVA vorkommenden Blasengrössen während der Versuche wurde das Messvolumen auf $1,3 \text{ mm}^3$ festgelegt, d.h. der Laserstrahldurchmesser betrug $1,43 \text{ mm}$, die Messvolumenhöhe $0,83 \text{ mm}$. Die Laserstrahlbreite am Ort des Messvolumens wurde durch Photographie durch das vergrössernde Linsensystem der Streulichtempfangseinrichtung ermittelt, die Messvolumenhöhe wurde durch die Höhe des Messpalts vor dem Photomultiplier bestimmt. Dieses optisch abgegrenzte Messvolumen wurde in der Teststrecke des Kavitationstunnels vor dem Propeller angeordnet, und zwar in der Entfernung eines Propellerdurchmessers nach vorn und $1/2$ -durchmessers nach Steuerbord auf der Höhe der Schraubenwelle. An dieser Stelle war kaum noch eine Beeinflussung der Strömung durch induzierte Geschwindig-

keiten des Propellers zu erwarten. Unmittelbar hinter dem Messvolumen wurde die Strömungsgeschwindigkeit, die zur Ermittlung der Gaskeimkonzentration benötigt wird, mit einem Prandtlrohr bestimmt.

Mit den gewählten Messvolumendimensionen, der zur Verfügung stehenden Laserleistung sowie der eingestellten Photomultiplierspannung von 2 kV war es möglich, einen Messbereich des Keimdurchmessers von 22 - 350 μm zu überspannen. Bei den grössten gemessenen Keimkonzentrationen in diesem Bereich betrug der maximale Koinzidenzfehler etwa 5 %. Der Randzonenfehler für die Keime von 350 μm betrug rund 30 %.

Um die absolute Grösse der Keime aus dem gemessenen Streulicht zu erhalten, ist eine Eichung notwendig. Nachdem Untersuchungen über das Streuverhalten einiger Teilchen in Wasser gezeigt haben, dass Latexteilchen eine ganz ähnliche Streucharakteristik zeigen wie Blasen /4/, wurden Latexteilchen der Grössen 45,4 und 90,7 μm als Eichkeime verwendet. Diese wurden in das Messvolumen gespritzt. Die dann gemessenen Photomultiplierspannungen für die beiden Teilchengrössen lagen ausgezeichnet auf der theoretischen Kurve der Streulichtintensität.

Weitere Einzelheiten über die Streulichtmesstechnik können aus /2,3,5/ entnommen werden.

Die Auswertung der Streulichtimpulse, von denen jeweils 2000 bei jedem einzelnen Test registriert wurden, wurde im on-line-Verfahren mit dem HP-Rechner im Messcontainer des Sonderforschungsbereichs 98 vorgenommen. Dieser war zu diesem Zweck im Kavitationsgebäude der HSVA abgestellt. Durch einen derartigen Geräteaufbau konnte unmittelbar nach jeder Messung ein Blasengrössenhistogramm ausgedruckt werden.

2.2. Gemessene Keimspektren und Gasgehalte

Um den Einfluss des Keimgehaltes bzw. des freien Gasgehaltes des Testwassers auf die propellerinduzierten Druckschwankungen festzustellen, wurde der totale Gasgehalt des Tunnelwassers variiert. Durch Belüften konnte das Tunnelwasser bis zur Gassättigung mit Luft angereichert werden, während die Entgasung des Wassers durch Umwälzen des Tunnelwassers bei Vakuum erreicht wurde. Der Gassättigungsgrad ist dabei definiert als

$$\epsilon = \frac{c_o}{c_s} = \frac{\text{gelöste Menge des Gases}}{\text{grösstmögliche Lösungsmenge}}$$

oder

$$\epsilon = \frac{c_o \times 760 \text{ [mm Hg]}}{\alpha_{BL} \cdot p}$$

Der Gassättigungsgrad ϵ ist ferner eine Funktion des Druckes und der Temperatur. Die Konzentration c_o , die neben der gelösten Menge der Luft auch die um Grössenordnungen kleinere ungelöste Menge enthält, wurde mit einem Van-Slyke-Apparat bestimmt. Der Bunsen'sche Absorptionskoeffizient α_{BL} kann aus Tabellen entnommen werden /6/.

Die Tunnelfüllung bestand aus gefiltertem Leitungswasser, d.h. der Gehalt an Schwebstoffteilchen war gering. Dies zeigen die Keimgrössenhistogramme von entgastem Wasser bei langsamen Umlaufgeschwindigkeiten und atmosphärischem Druck, wobei nahezu keine freien Blasen auftraten. Folglich waren dann die bei höheren Gassättigungsgraden, höheren Geschwindigkeiten und niedrigeren Absolutdrücken gemessenen Keime zu fast 100 % Blasen. Diese Folgerung wird auch durch die Arbeit von Peterson /7/ (S.1141 oben und Fig.13) bestätigt.

Für ein Beispiel entgastem Wassers zeigt die Abb.2 ein Histogramm über dem gemessenen Keimdurchmesser D . Die gestrichelte Kurve stellt das Keimgrössenhistogramm dar, das aus den 2000 registrierten Blasen erstellt wurde. Hieraus wurde ferner ein Diagramm berechnet (ausgezogene Kurve in Abb.2), das den jeweiligen Anteil eines Blasengrössenbereiches (z.B. zwi-

schen $D=20$ und $69,9 \mu\text{m}$) am relativen freien Gasgehalt α enthält.

Der relative freie Gasgehalt α ist das Verhältnis des Volumens aller gemessenen freien Gasblasen pro Volumeneinheit zur Volumeneinheit des strömenden Mediums.

Bei dem ausgezogenen Kurvenzug handelt es sich um die Summen der Volumina der Blasen eines Durchmesserbereiches. Summiert man die einzelnen relativen freien Gasgehalte eines jeden Durchmesserbereiches auf, so erhält man den gemessenen relativen freien Gasgehalt α , der in Abb.2 mit $\alpha = 0,112 \cdot 10^{-5}$ angegeben ist. Durch den Vergleich dieses Wertes $\alpha = 0,112 \cdot 10^{-5}$ mit der ausgezogenen Kurve in Abb.2 sieht man sofort, dass die vereinzelt grossen Blasen (z.B. die bei $D = 350 \mu\text{m}$) relativ mehr zum relativen freien Gasvolumen beitragen als die grössere Anzahl der kleinen.

In einem weiteren hier gezeigten Beispiel sind für den Fall begasteten Wassers in der Abb.3 eine grössere Anzahl von Blasen innerhalb der einzelnen Durchmesserbereiche vorhanden. Das relative freie Gasvolumen steigt dann auf $\alpha = 0,992 \cdot 10^{-4}$.

Weiterhin konnten mit der Streulichtmethode verschiedene Abhängigkeiten des freien Gasgehaltes von dem vorgegebenen Druck in der Teststrecke bestimmt werden. In der Abb.4 sind derartige Ergebnisse des freien Gasvolumens α für drei Wasserqualitäten, nämlich für zwei Arten von entgastem und für begastetes Wasser, über dem Tunnelndruck p aufgetragen. In diesem Falle waren in den Kavitationstunnel vor dem Propeller Siebe zur Simulation einer schiffsähnlichen Nachstromverteilung eingebaut. So wie sich in dieser Abbildung entsprechend der Zustandsänderungsgleichung für lufthaltiges Wasser /16,17/

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1+\lambda}$$

verschiedene Polytropen-Exponenten λ für verschiedene Wasserarten, z.B. $\lambda = 0,5$ und $\lambda = 2,5$ für entgastem und $\lambda = 5$ für begastetes Wasser, ergeben hatten, konnten noch

weitere Exponenten für weitere Zwischenzustände der Begasung bestimmt werden. Diese werden später bei der Umrechnung der gemessenen Gasgehalte und damit bei der umgerechneten Darstellung der Druckschwankungsergebnisse (vgl. Tab. 1 - 3) berücksichtigt. Wie stark die Exponenten λ von der spezifischen Eigenart der Tunneleinbauten, der Vorgeschichte des Wassers und der Art der Versuchsdurchführung abhängen, geht aus dem Vergleich der Abb.4 mit der folgenden Abb.5 hervor. Letztere gilt für einen Tunnelzustand ohne Sieb-Einbauten und mit geschlossenem Hahn, der zwischen der Teststrecke und dem Unterdruckkessel angeordnet ist (vgl. Abb.1a). Die Exponenten λ sind hierbei trotz unterschiedlicher Gassättigungsgrade $\epsilon_{ATM} = \frac{c_0}{\alpha_{B1}}$ für atmosphärischen Zustand nahezu konstant, nämlich $\lambda = 1$.

In der folgenden Abb.6 sind die Ergebnisse des Exponenten λ , der in der Zustandsänderungsgleichung für lufthaltiges Wasser steht, für verschiedene Gassättigungsgrade ϵ_{ATM} wiedergegeben. Deutlich geht daraus hervor, dass der Polytropenexponent von den Tunneleinbauten und von dem Tunnelzustand (Hahn offen - Hahn geschlossen) abhängt. In dem Zustand "Hahn offen" konnte bei atmosphärischem Druck zusätzlich Luft in die Teststrecke gesaugt werden. Mit ziemlicher Sicherheit dürfte diese zum Teil gelöste Luft durch die Unterdrücke an den umströmten Sieben in den freien Gaszustand übergeführt werden, was zu den hohen λ -Exponenten führt. Der umgekehrte Fall, dass bei Unterdruck durch den offenen Hahn Gas abgesaugt wird, erscheint auch möglich. Dann müssten negative λ -Exponenten auftreten, was in der Tat bei zwei einzelnen Messreihen der Fall war. Es muss zugegeben werden, dass der Tunnelzustand "Hahn offen" auf einem Bedienungsfehler beruht. Er zeigt jedoch, von welchem massgebenden Einfluss eine Luftzufuhr auf die Polytropenexponenten λ und damit auf die Kavitationserscheinungen ist. Etwas Ähnliches geht auch aus der Veröffentlichung von Albrecht und Björheden hervor /8/, in der ein Luftblasen-Generator zur Erzeugung eines höheren Gasgehaltes im Tunnelwasser beschrieben wird. Dieses wäre zunächst die Richtung, in der man bei einer möglichen Steuerung des freien Gasgehaltes bei Kavitationsversuchen weiterarbeiten sollte.

Die λ -Werte aus Abb.6 werden, wie schon angedeutet, bei der Umrechnung der gemessenen relativen Gasgehalte α auf einen gemeinsamen Druckzustand p_1 berücksichtigt (vgl. Tab. 1 - 3). Als Druck p_1 wurde derjenige gewählt, der zu der mittleren Drehzahl $n=20$ Hz gehört. Mit den umgerechneten relativen freien Gasvolumina α_1 lassen sich die Druckschwankungsergebnisse besonders gut ordnen (vgl. Abschnitt 3.5).

3. Messung der vom Propeller erregten Druckschwankungen

3.1. Messeinrichtungen und Daten zu den benutzten Propellern

Die vorliegenden Versuche wurden im mittleren Kavitations-tunnel der HSVA durchgeführt, dessen Teststrecke einen Querschnitt von 570 x 570 mm (Abb. 1a, 1b) hat. Es wurden zwei Propeller benutzt, und zwar ein Fregatten-Propeller (HSVA-Propeller Nr. 1283) mit $Z=3$ Flügeln, einem Flächenverhältnis von $\frac{A_E}{A_0} = 0,77$ und einem Durchmesser von $D = 240$ mm. Weitere Daten dieses Propellers, der nur bei homogener Zuströmung benutzt wurde, sind im Anhang von /8/ angegeben.

Ausserdem wurde der für die vorliegenden Versuche angefertigte Modellpropeller des Container-Schiffes "Sydney-Express"¹⁾ (HSVA-Propeller 1917) eingesetzt. Einige Propellerdaten und die Ergebnisse des Freifahrtversuches, der extra im Rahmen des hier beschriebenen Vorhabens vorgenommen wurde, sind in Abb.7 angegeben.

Dieser fünfzügige Modellpropeller ($D=250$ mm) wurde vor allem im einregulierten axialen Nachstromfeld des Modelles der "Sydney-Express" verwendet. Die schiffsähnliche Verteilung des Nachstromes wurde durch das teilweise Versperren

1) Den Firmen Th. Zeise, Spezialfabrik für Schiffsschrauben, Hamburg-Altona, Blohm + Voss und HAPAG-Lloyd, Hamburg, sei für die Zurverfügungstellung der Propeller-Zeichnungen besonders gedankt.

des Tunnelquerschnittes mit Sieben erreicht (Abb. 1b). Da bei den eigentlichen Druckschwankungsversuchen konstante dimensionslose Propellerkennwerte der Belastung (K_T -Wert) und konstante dimensionslose Anströmverhältnisse (J -Wert) bei unterschiedlichen absoluten Drehzahlen ($n=15, 20$ und 30 Hz) eingestellt wurden, war zu überprüfen, ob die Verteilungen der axialen Nachstromgeschwindigkeiten bei den o.g. gefahrenen Drehzahlen unverändert blieben. Durch das bei den Versuchen hinter dem Messvolumen befindliche Prandtl-Rohr konnten die gefahrenen Grundgeschwindigkeiten im Tunnel, die zu den gefahrenen Drehzahlen bei vorgegebenen K_T - und J -Werten gehörten, bei den Nachstromverteilungsmessungen wieder eingestellt werden. Die Ergebnisse dieser Messung der Verteilung des axialen Nachstromes sind in Abb.8 zu sehen. In der Legende sind die gefahrenen Grundgeschwindigkeiten angegeben. Für diese ergeben sich im Rahmen einer gewissen Messunsicherheit keine Abweichungen. Die später zu erklärenden Unterschiede der dimensionslosen Druckschwankungsamplituden bei konstantem J_{KT} -Wert und konstanter Kavitationszahl σ_n , aber unterschiedlichen Drehzahlen (vgl. Abb.15 bis 18) können also nicht auf andersartige Verteilungen des Nachstromes bei den Drehzahlen $n=15, 20$ und 30 Hz zurückgeführt werden.

Wie bereits einleitend erwähnt, wurden die vom Propeller induzierten Druckschwankungen mit sieben Druckdosen gemessen, die auf einer ebenen Platte oberhalb des Propellers installiert waren (Abb. 1b). Eine Skizze dieser Platte und das benutzte Koordinatensystem zeigt die Abb.9. Die Auswertung der Signale der Druckdosen erfolgte im on-line-Verfahren auf einem Honeywell-Prozessrechner. Weitere Einzelheiten über das Verfahren der Auswertung finden sich in /9/ und /10/.

3.2. Ergebnisse bei homogener Zuströmung

Eine Reihe von Messungen mit dem stark kavitierenden Fregatten-Propeller (HSVA-Propeller 1283) wurden freifahrend, d.h. ohne Nachstromsimulation, vorgenommen, wobei der Gasgehalt nicht künstlich beeinflusst wurde. Der Gasgehalt stellte sich viel-

mehr so sein, wie es sonst bei länger dauernden Kavitationsversuchen von 8 bis 10 Stunden Dauer üblich sein dürfte. Die Absicht bei dieser Art der Versuchsdurchführung war, den Zusammenhang zu den Versuchsergebnissen des Jahres 1972 /10/ herzustellen. Damals war die Versuchsdurchführung genauso wie bei den hier beschriebenen Versuchen. Die Ergebnisse, die auf diese Weise erzielt wurden, sind in den drei oberen Diagrammen von Abb.10 enthalten. Der Gassättigungsgrad

$$\epsilon_{ATM} = \frac{c_o}{\alpha_{BL}} \text{ für } p = 760 \text{ mm Hg,}$$

d.h. für atmosphärischen Druck des Tunnelwassers für die vorliegende Temperatur kann neben jedem Diagramm unter der Bemerkung "Unbehandeltes Wasser" gefunden werden. Die dimensionslose Druckamplitude $K_{p3} = \frac{\Delta p}{\rho n^2 D^2}$ der Blattfrequenz ist über der Strömungslängsrichtung (x-Richtung) aufgetragen. Es ist offenbar, dass bei den drei vorgegebenen Drehzahlen $n = 30, 25$ und 22 Hz die K_p -Werte für die sechs gefahrenen Kavitationszahlen $\sigma_{VA} = \frac{p - p_v}{(\rho/2)V_A^2}$ bei $J = 0,72$ gleich sind.

Ausserdem wurden drei Versuche mit stark begastem Wasser ausgeführt, deren Ergebnisse in dem untersten Diagramm von Abb.10 zu finden sind. Das relative freie Gasvolumen stieg hierbei bis auf $\alpha = 1 \cdot 10^{-4}$ an. Diese und weitere relative freie Gasvolumina α , die zu den Messungen in Abb.10 gehören, waren schon in Abb.5 gezeigt. In der folgenden Abb.11 sind die dimensionslosen Druckamplituden K_{p3} der mittleren Druckdose (Position 3) für die beiden Kavitationsziffern $\sigma_{VA} = 3,0$ und $\sigma_{VA} = 1,5$ gezeigt. Die Abszisse ist hierbei das gemessene relative freie Gasvolumen α . Die beiden Abbildungen 10 und 11 zeigen ganz klar, dass ohne Nachstrom im Falle voll entwickelter Schichtkavitation - sie ist hierbei in allen Flügelstellungen gleich - die dimensionslosen Druckamplituden weder vom freien Gasgehalt noch von den gewählten Drehzahlen beeinflusst werden. Dieses Ergebnis wird durch die Photographien (Abb.12 und 13) der Ausdehnung der Kavitation des Propellers 1283 bestätigt. In Abb.12 zeigen die Bilder eine fast gleiche Ausdehnung der Schichtkavitation, egal ob es sich um unbehandeltes oder starkbegastetes Wasser handelt. Diese Bilder unterstreichen für $\sigma_{VA} = 3,0$ die Ergebnisse der Abb.10 und 11. Die Unabhängigkeit der Kavitationsausdehnung von der vorgegebenen Drehzahl geht aus der Photo-

zusammenstellung der Abb.13 hervor, die für den Fall stärkerer Kavitation mit $\sigma_{VA} = 1,25$ gilt.

3.3. Ergebnisse im Nachstromfeld

Im Gegensatz zu den Ergebnissen des Propellers mit voll entwickelter Kavitation hat das relative freie Gasvolumen α einen eminenten Einfluss auf den Einsatz der Kavitation und damit auf die dimensionslosen Druckamplituden K_p im Schiffsnachstrom. In Abb.14 sind einige Ergebnisse von Druckamplituden K_{p5} der Blattfrequenz ($Z=5$) des Modellpropellers der "Sydney-Express" (HSVA-Propeller 1917) gezeigt. Die Abbildung enthält drei Diagramme, die sich durch den Grad der Begasung des Wassers unterscheiden: begastetes, entgastetes und stark entgastetes Wasser. Der konstante Betriebspunkt des Propellers ist durch die Fortschrittsziffer $J_{KT} = 0,61$, die also aufgrund der Schubidentität erreicht wird, und die gleichfalls für die gesamte Abbildung geltende Drehzahl von $n=15$ Hz gekennzeichnet. Die Ergebnisse für die kavitierenden Zustände sind durch die gestrichelten Kurven angegeben. Die vier gefahrenen Kavitationszahlen sind auf die Drehzahl des Propellers bezogen:

$$\sigma_n = \frac{p - p_v}{(\rho/2) (\pi n D)^2} .$$

Vergleicht man die Abstände zwischen den kavitationsfreien und den kavitierenden Zuständen in den drei Diagrammen, so stellt man den grossen Einfluss des freien Gasvolumens auf die Druckamplituden fest. Auf die Tatsache, dass im Falle starker Entgasung des Tunnelwassers die Druckamplituden K_p bei Kavitation kleiner werden als ohne Kavitation, wird später bei den Ausführungen über Messunsicherheiten noch einzugehen sein (Kap. 3.4.2).

Da die Verteilung der Druckamplituden in Strömungsrichtung (x -Richtung) fast immer gleich ist, genügt es, bei den folgenden Betrachtungen sich mit der mittleren Druckdose zu befassen.

In den Abbildungen 15 bis 18 sind die dimensionslosen Druckamplituden K_{p5} der Blattfrequenz über dem gemessenen relativen freien Gasvolumen α aufgetragen. Die Abb. 15 und 16 gelten für $J_{KT} = 0,61$ bei $\sigma_n = 0,185$ und $\sigma_n = 0,211$. Die beiden Bilder 17 und 18 beziehen sich auf die gleichen Kavitationszahlen, jedoch bei $J_{KT} = 0,70$. Diese Fortschrittsziffer von $J_{KT} = 0,70$ soll für den Arbeitspunkt des Propellers der Grossausführung unter Berücksichtigung gewisser Erfahrungswerte für die Masstabskorrektur des Nachstromes gelten. Parameter in den vier Diagrammen sind die gewählten Drehzahlen von $n = 15, 20$ und 30 Hz, was bedeutet, dass für jedes Diagramm bei Einhaltung der Versuchsvorschrift für konstante Kavitationszahlen $\sigma_n = \frac{p - p_v}{(\rho/2)(\pi n D)^2}$ in der Teststrecke unterschiedliche absolute Drücke einzustellen waren. Hauptsächlich für die Drehzahlen von $n = 15$ und 20 Hz wird der starke Einfluss des relativen freien Gasvolumens auf die Druckamplituden deutlich. Die Bereiche für ent- und begastes Wasser sind in die vier Bilder ebenso eingetragen, wie ein "Bereich üblicher Versuche", der den Versuchen mit dem freifahrenden Propeller 1283 entnommen wurde, bei denen keine künstliche Beeinflussung des Wassers vorgenommen wurde. Innerhalb dieses Bereiches können die Unterschiede der K_p -Werte zwischen den Werten für $n = 15$ und $n = 30$ Hz durchaus den Faktor 2 bis 3 annehmen. Das sind Grössenordnungen, die mit den Unterschieden der K_p -Werte für gleiche Kavitationszahlen in der Veröffentlichung von Oossanen und van der Kooy /1/ vergleichbar sind. Naturgemäss sind die Unterschiede zwischen den K_p -Werten für verschiedene Drehzahlen für den Fall der Grossausführung ($J_{KT} = 0,70$, d.h. Abb. 17 und 18) geringer als bei stärkerer Propellerbelastung ($J_{KT} = 0,61$, d.h. Abb. 15 und 16).

3.4. Diskussion der Druckschwankungsergebnisse

3.4.1. Diskussion der Ergebnisse anhand von Photographien

Für die Abb. 19 und 20 sind Zusammenstellungen von Photos für die Drehzahl $n = 15$ Hz bei gleichfalls konstanter Fortschrittsziffer $J_{KT} = 0,61$ angefertigt worden. Abb. 19 gilt

für die Kavitationszahl $\sigma_n = 0,185$, Abb. 20 für $\sigma_n = 0,211$. Das beobachtete Propellerblatt wird dabei in fünf Positionen gezeigt, die in der Mitte der Abbildungen angegeben sind. Die oberen Reihen (Test 138 in Abb. 19¹⁾, Test 139 und 140 in Abb. 20) gelten für die höheren relativen freien Gasgehalte, die unteren (Test 148 auf Abb. 19, Test 150 auf Abb. 20) für die niedrigeren α -Werte, welche mit $\alpha = 0,28 \cdot 10^{-5}$ bzw. $\alpha = 0,25 \cdot 10^{-5}$ die jeweils tiefsten Punkte auf den Kurven der K_p -Werte für $n = 15$ Hz in den Abb. 15 und 16 darstellen. Vergleicht man zunächst auf der Abb. 19 - auf der Abb. 20 ist der entsprechende Vergleich gleichfalls möglich - die Flügelpositionen 15° und 0° der oberen Reihe (Test 138) mit der unteren (Test 148), so stellt man in der unteren einen späteren Einsatz der Kavitation im Nachstromfeld fest. Ausserdem ergeben sich für gleiche Flügelpositionen, z.B. 0° und 345° , jeweils für die oberen Reihen in Abb. 19 und 20 grössere Kavitationsausdehnungen bei höheren relativen freien Gasvolumina α als für die entsprechenden Positionen der unteren Photoreihen bei niedrigem α -Wert. Das Ansteigen der K_p -Werte in den Abb. 15 und 16 wird also bei der konstanten Drehzahl $n = 15$ Hz eindeutig durch den früheren Einsatz und die stärkere Ausdehnung der Kavitationsschicht bestimmt, die in massgebender Weise vom freien Gasgehalt beeinflusst werden.

3.4.2. Diskussion der Ergebnisse in bezug auf Messunsicherheit, Reproduzierbarkeit und intermittierende Kavitation

Die tiefsten und die zweithöchsten Punkte der für $n = 15$ Hz geltenden Kurve der K_p -Werte in den beiden Abbildungen 15 und 16 - ebenso die links aussen liegenden Punkte der $n = 30$ Hz-Kurve beider Abbildungen - sind durch vertikale Linien unterschiedlicher Länge gekennzeichnet. Diese sollen jeweils die Messunsicherheiten angeben, die durch mehrmalige Druckschwankungsmessungen während einer Tunneleinstellung erhalten wurden.

1) Bei den Doppelbildern des Tests 138 (0° und 330°) handelt es sich um Wiederholungen von Aufnahmen, die der Überprüfung der Reproduzierbarkeit des Kavitationszustandes dienten.

In Abb. 21 sind die reproduzierten Messungen der drei o.g. Punkte der Abb. 15 ($J_{KT} = 0,61$, $\sigma_n = 0,185$) eingetragen. Die Abb. 21 gilt wiederum für die fünf Druckdosen in Strömungslängsrichtung (x-Richtung). Auffällig ist, dass die Abweichungen der K_p -Werte bei niedrigem freiem Gasvolumen α (Test 144 und 148) gering sind, während sie bei begastem Wasser (Test 138) beträchtlich sein können. Die letzte Tatsache ist dadurch zu erklären, dass bei begastem Wasser derart viel Gas aus dem Wasser ausgeschieden wird, dass der notwendige vorzugebende Tunnelndruck nur schwer gehalten werden kann, wobei ein ständiges Nachregulieren des Druckes erforderlich ist. Das wirkt sich in der unterschiedlichen Höhe der Druckamplituden und auch in der Ausdehnung der Kavitation aus. So zeigen in Abb. 19 die beiden Photos von Test 138 in der 0° -Position auch einen gewissen Unterschied in der Kavitationsausdehnung. Die Streuung der K_p -Werte, die für Test 138 in Abb. 21 an allen Druckdosen gleichsinnig (vgl. Test 138 bis 138-3 in Abb. 21) auftritt, entspricht der Länge der vertikalen Linie in Abb. 15 bei $\alpha = 0,74 \cdot 10^{-4}$. Sie dürfte der Grund für das Überschneiden der $n = 20$ und $n = 30$ Hz-Kurve durch die $n = 15$ Hz-Kurve in den Abbildungen 15 bis 18 sein.

Um ausserdem einen Überblick über die Veränderung der Signale einer Druckschwankungsmessung während der Registrierzeit zu erhalten, - für die Auswertung wird meistens eine grössere Anzahl (hier 64) von Umdrehungen digitalisiert, woraus eine "Repräsentative Umdrehung" gebildet wird (vgl. Abs. 2.3 in /10/)- wurden einige der parallel auf Magnetband aufgenommenen Messungen noch einmal auf eine andere Art ausgewertet. Dabei wurde jede zweite Umdrehung ausgewertet und ohne vorhergehende Mittelwertbildung (Sampelung) der digitalisierten Werte harmonisch analysiert. Derartige Ergebnisse sind in Abb. 22 wiedergegeben. Es zeigt sich für die Versuchs-Nummer 148, dass nur zwei Druckschwankungsamplituden der Blattfrequenz K_{p5} , nämlich die der 42. und der 60. Umdrehung, den Mittelwert der Messung Nr. 147 überschreiten. Messung 147 war kavitationsfrei, denn es herrschte atmosphärischer Druck im Tunnel. Die Messung Nr. 148, die entsprechend $\sigma_n = 0,185$ Unterdruck in der Test-

strecke aufwies, hatte einen niedrigen relativen freien Gasgehalt. Dieser niedrige relative freie Gasgehalt von $\alpha = 0,028 \cdot 10^{-4}$ ist der Grund dafür, dass nicht bei jeder Propellerumdrehung an dem betrachteten Blatt Kavitation auftritt. Das geht aus der unteren Photoreihe der Abb. 23 für Test 148 hervor, die jeweils eine zusätzliche Aufnahme bei gleicher Tunneleinstellung und Flügelposition wiedergibt. Dort sind im Gegensatz zur oberen Reihe von Test 148 keine Kavitationsblasen zu sehen. Diese in bezug auf die Propellerumdrehung unperiodische Fluktuation der Kavitationsblase, - bei einer Umdrehung ist sie vorhanden, bei der nächsten eventuell nicht - die natürlich vom niedrigen relativen freien Gasvolumen abhängt, dürfte im Zusammenwirken mit den Phasen der anderen Druckschwankungsanteile - nämlich der Verdrängungswirkung der Flügel und seines Lastanteiles - die Ursache für die niedrigen Druckamplituden des Versuches 148 in Abb. 22 sein. Ein genauer Nachweis dieser Erklärung dieses Phänomens, das auch aus anderen Versuchsanstalten bekannt ist, wäre wünschenswert.

Weitere Beispiele dieser unperiodischen Fluktuation der Schichtkavitation - in den Versuchsanstalten wird sie als intermittierende Kavitation bezeichnet -, die wie ein zufälliger Vorgang abläuft, den man auch auf dem Messschrieb von Test 148 ausmachen kann, sind in den Abb. 25 und 26 gezeigt. In diesen Abbildungen sind die zu willkürlichen Zeiten aufgenommenen Photos eines Messpunktes nebeneinander angeordnet. Vor allem in Abb. 26 bei den Versuchen 102 und 148 und in Abb. 30 bei den Versuchen 114, 109 und 104 wird diese unperiodische Fluktuation deutlich. Die Abb. 26 bezieht sich auf die vier Messpunkte der $n = 15$ Hz-Kurve in Abb. 15. Aus Abb. 26 geht klar hervor, wie sich die Schichtkavitation stabilisiert, wenn das freie Gasvolumen von niedrigen α -Werten (und dementsprechend intermittierender Kavitation bzw. unperiodischer Fluktuation) zu höheren freien Gasvolumina ansteigt. Demnach ist die intermittierende Kavitation ein reiner Modelleffekt bzw. Effekt in den Versuchsanstalten, der in der Natur bei gesättigtem Wasser nicht auftreten dürfte.

3.5. Umrechnung des gemessenen freien Gasvolumens und umgerechnete Darstellung der Druckschwankungsergebnisse

Bereits in den Abb. 23 und 24 sind Gegenüberstellungen von Photographien für Versuche mit Drehzahlen von $n = 15$ Hz (jeweils unter Flügelstellungsangabe in beiden Abbildungen) mit $n = 30$ Hz gezeigt worden. Dabei gehören zu den unten stehenden Photos (z.B. Test 148 und 150) höhere gemessene Gasvolumina α als zu den oberen (Test 144 und 145). Trotzdem weisen die oberen Photos stärkere Kavitationsausdehnungen als die unteren auf. Das erscheint zunächst unverständlich. Geht man noch einmal zu den Abbildungen 15 bis 18 zurück, so stellt man fest, dass die Diagramme zwar jeweils für eine konstante Fortschrittsziffer J_{KT} und eine konstante Kavitationszahl σ_n gelten, wobei die Propellerdrehzahlen $n = 15, 20$ und 30 Hz Parameter waren. Wegen der konstanten Kavitationszahl

$$\sigma_n = \frac{p - p_v}{(\rho/2)(\pi n D)^2}$$
erforderte das aber unterschiedliche absolute Drücke p in der Teststrecke. Man müsste also die bei unterschiedlichen absoluten Drücken p gemessenen freien Gasvolumina α auf einen gemeinsamen Druck beziehen, um von der Parameterabhängigkeit in den Abb. 15 bis 18 abzukommen. Dazu bietet sich die bereits erwähnte Zustandsänderungsgleichung für lufthaltiges Wasser an:

$$\alpha_1 = \alpha \left(\frac{p}{p_1} \right)^{1+\lambda}$$

Hierbei beziehen sich die Grössen ohne Indices auf den jeweiligen Versuch, während die Grössen mit dem Index 1 sich auf den Bezugsdruck p_1 beziehen. Als Bezugsdruck p_1 ist derjenige gewählt worden, der zu der Drehzahl $n = 20$ Hz gehört. In den Tabellen 1 bis 3 sind derartige Umrechnungen durchgeführt worden, wobei die Abbildungen 4 und 6 berücksichtigt wurden. Es ergibt sich dann aus Abb. 15 unter Benutzung von Tab.1 Abb. 27, aus Abb. 16 mit Tab.2 Abb. 28 und aus Abb.18 mit Tabelle 3 die Abb. 29. Den neuen Abbildungen 27 und 29 ist gemeinsam, dass die dimensionslosen Druckamplituden K_{p5} der Blattfrequenz für einen Tunnelzustand (z.B. "Hahn auf") und für eine konstante Propellerbelastung (gleiches J_{KT} und σ_n)

über dem umgerechneten freien Gasvolumen α_1 in einer Kurve vereinigt werden können. Die gestrichelten Kurven in den Abb. 27 und 28 gelten für den anderen Tunnelzustand "Hahn zu". Die Messpunkte für $n = 15$ Hz bei starker Begasung, bei denen die grosse Messunsicherheit des Versuches 138 aus Abb. 22 übernommen ist, passen sicherlich wegen der o.g. Schwierigkeiten bei der Druckeinstellung des Tunnels nicht so gut auf die Kurven. Die oben erwähnten Unstimmigkeiten zwischen gemessenem freien relativen Gasvolumen und Kavitationsbeginn (bzw. Kavitationsausdehnung) in den Abb. 23 und 24, die doch derart waren, dass bei kleinerem gemessenem α -Wert eine stärkere Kavitationsausbildung als bei grösserem α -Wert zu beobachten war, kommt durch die Umrechnung auf die α_1 -Werte zum Verschwinden. Jetzt haben die Bilder mit stärkerer Ausdehnung und früherem Beginn der Kavitation (z.B. Test 144 verglichen mit 148 in Abb. 23, oder Test 145 verglichen mit 150 in Abb. 24) auch den höheren relativen freien Gasgehalt α_1 (vgl. Tab. 1 und Abb. 27 oder Tab. 2 und Abb. 28).

Zum Abschluss dieses vorliegenden Abschnittes wird mit Abb. 30 noch eine Photozusammenstellung gezeigt, die für die 0° -Flügelstellung alle Aufnahmen aller Messpunkte aus Abb. 29 enthält. Die Unterschiede in der Kavitationsausdehnung - abhängig vom umgerechneten relativen freien Gasvolumen α_1 - lassen sich nur schwer feststellen. Denn bei diesem Belastungszustand des Modellpropellers wurde derjenige eingestellt ($J_{KT} = 0,70$), der der Grossausführung entsprechen soll und der bei diesem anerkannt guten Propellerentwurf keine starken Kavitationserscheinungen aufweist. Die intermittierende Kavitation, die bereits in Abschnitt 3.4.2 angesprochen wurde, wird mit abnehmendem α_1 -Wert zunehmend deutlich. Vielleicht ist sie überhaupt der Grund für die abnehmenden Druckamplituden K_{p5} in Abb. 29.

4. Schlussfolgerungen

Am Schluss der vorliegenden Untersuchung sollte noch darauf hingewiesen werden, dass das Froude'sche Ähnlichkeitsgesetz für den untersuchten Fall der "Sydney-Express" bei dem Modellmasstab von 28 eine Drehzahl von $n = 9,7$ Hz vorschreiben würde. Bei dieser Drehzahl, die entsprechend der weiteren Versuchsvorschrift der einzuhaltenden Kavitationszahl einen nicht mehr einstellbaren Unterdruck in der Teststrecke erfordert hätte, wäre der Einfluss des freien Gasgehaltes nach den Abb. 15 bis 18 bzw. 27 bis 29 eminent gewesen. Es ist offenbar so, dass dieser Einfluss durch die höheren Drehzahlen, die oft bei Kavitationsversuchen gefahren werden, kompensiert wird, und zwar dadurch, dass man entsprechend den Abbildungen 27 bis 29 bei Drehzahlen von $n = 30$ Hz ziemlich hohe umgerechnet freie Gasgehalte α_1 erreicht.

Als wesentlichste Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung kann man festhalten:

- 1) Ansteigender relativer freier Gasgehalt führt bei Kavitationsversuchen mit Nachstromfeld zu früherem Einsatz und stärkerer Ausdehnung der Kavitation und damit zu grösser werdenden dimensionslosen Druckamplituden (z.B. Abb. 15 und 19.)
- 2) Im Gegensatz dazu werden bei voll entwickelter Kavitation freigefahrener Propeller die Ausdehnung der Kavitation (Abb. 12 und 13) und die Druckamplituden (Abb. 10 und 11) nicht vom freien Gasgehalt beeinflusst.
- 3) Kavitationsversuche mit Nachstromfeld zur Messung der propellerinduzierten Druckamplituden sollten die gleichzeitige Bestimmung und möglicherweise später die Regulierung des freien Gasgehaltes der Strömung mit einschliessen.

Aus dieser letzten Feststellung ergibt sich die Frage nach dem richtigen freien Gasgehalt im Modellversuch. Diese Frage, deren Beantwortung sich in der Zustandsänderungsgleichung für lufthaltiges Wasser

$$\alpha_1 = \alpha \left(\frac{p}{p_1} \right)^{1+\lambda}$$

und durch ihre Anwendung bei der Umrechnung von gemessenen freien Gasgehalten (Abb. 27 bis 29) angedeutet, hat in mehreren Hinsichten eine hohe Aktualität. So ist diese Frage bei Kavitationsanlagen mit freier Wasseroberfläche, durch die leicht eine Entgasung vor sich gehen kann, von grösster Wichtigkeit. Das zeigen die mangelhaften Übereinstimmungen von Kavitationsausdehnungen zwischen Grossausführungs- und Modellbeobachtungen im Wageninger Vacuum Tank (Fig. 6 in /13/ und Fig. 13,14 in /14/). Aber auch mit konventionellen Kavitationstanks treten Unterschiede zwischen Grossausführung und Modell mit Schräganströmung auf, wie aus Fig. 9 und 10 bzw. 11 und 12 in /15/ und Fig. 5 in /13/ hervorgeht. Möglicherweise sind hierbei die Unterschiede aber geringer, wie aus dem Vergleich von Fig. 5 mit Fig. 6 in /13/ zu entnehmen ist. Weiterhin ist auf die Ergebnisse von Druckschwankungsversuchen aus /12/ einzugehen. Bei diesen wurde zum Erreichen einer Übereinstimmung der dimensionslosen K_p -Werte von Modell und Grossausführung das Nachstromfeld des Modells korrigiert. Ein Teil der zuvor festgestellten Diskrepanz zwischen dem unkorrigierten Modellwert und dem entsprechenden Grossausführungswert war sicher auf den Einfluss des freien Gasgehaltes zurückzuführen.

Aus diesen letzten Ausführungen und den gezeigten Ergebnissen (Abb. 15 bis 18 bzw. Abb. 27 bis 29) ist also der Schluss zu ziehen, dass der Einfluss des freien Gasgehaltes bei Kavitationsversuchen im Nachstromfeld von mindestens derselben Bedeutung ist wie der Masstabeffekt des Nachstromfeldes. Daher müssten alle weiteren Bemühungen auf diesem Gebiet der

Kavitationsversuche unter Anwendung der hier geschilderten neuen Streulicht-Messtechnik darauf konzentriert werden, welches einerseits der freie Gasgehalt in der Grossausführung ist und wie er andererseits im Modellversuch neben den weiteren Versuchsvorschriften einzustellen ist.

5. Anmerkung

Abschliessend soll noch erwähnt werden, dass bei den langwierigen, umfangreichen und strapaziösen Versuchen im Spätherbst 1974 mehrere Messteams reibungslos zusammenarbeiteten, u.a. das der T.U. München, der T.U. Karlsruhe und der HSVA mit Herrn Hoffmann, Herrn Heinzl und Herrn Ziesemer. Das Teilprojekt B1 des SFB 98 hat das Programm zur on-line-Auswertung des relativen freien Gasgehaltes erstellt.

6. Literaturverzeichnis

- /1/ van Oossanen, P. and van der Kooy, J.:
Vibratory hull forces induced by cavitating propellers.
The Royal Institution of Naval Architects, spring Meeting
1972.
- /2/ Keller, A.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen
zum Problem der modellmässigen Behandlung von Strömungs-
kavitation. Versuchsanstalt für Wasserbau der T.U.
München, Ber. Nr. 26/1973.
- /3/ Peterson, F.B.; Danel, F.; Keller, A. and Lecoffre, Y.:
Determination of Bubble and Particulate Spectra and
Number density in a Water Tunnel with three Optical
Techniques. Bericht an das ITTC Cavitation Committee
zur 14th ITTC Conference, 1975.
- /4/ Keller, A., Yilmaz, E. and Hammit, F.G.: Comparative
Investigations of the Scattered Light Counting Method
for the Registration of Cavitation Nuclei and the
Coulter Counter. Rep. No. UMich 01357-36-T, University
of Michigan, Jan. 1974.
- /5/ Keller, A.: Ein Streulicht-Zählverfahren, angewandt zur
Bestimmung des Kavitationskeimspektrums.
Optik, Band 33, 1970.
- /6/ Hodgman, Ch. D.: Handbook of Chemistry and Physics.
Cleveland USA 1957.
- /7/ Peterson, F.B.: Hydrodynamic cavitation and some considera-
tions of the influence of free gas content. 9th Symposium,
Naval Hydrodynamics, 1972, Paris, Volume 2, pp. 1131-1186.
- /8/ Albrecht, K. and Björheden, O.: "Cavitation testing of
propellers in a free surface tunnel utilizing micro air
bubble control. ASME-Symposium May 1975.

- /9/ Weitendorf, E.A.: Experimentelle Untersuchungen der von Propellern an der Aussenhaut erzeugten periodischen Druckschwankungen. Schiff und Hafen Heft 1/1970, 22. Jg., S. 11-24.
- /10/ Weitendorf, E.A.: Vergleich von propellererregten Druckschwankungen für Modell und Grossausführung am Beispiel des Frachtschiffes "Hornmeer". Schiff und Hafen, Heft 5/1973. 25. Jg. S. 423-428.
- /11/ Weitendorf, E.A.: Experimentelle Untersuchungen der durch kavitierende Propeller erzeugten Druckschwankungen. Schiff und Hafen, Heft 11/1973, 25. Bd. S. 1040-1060.
- /12/ Huse, E.: Cavitation induced pressures, some recent developments of model testing techniques. Symposium on "High powered propulsion of large ships". Wageningen, December 1974.
- /13/ Okamoto, H.; Okada, K.; Saito, Y. and Masai, K.: "Full Scale Cavitation Observation on Tankers Fitted with Ducted Propellers". Wageningen, December 1974, Symposium on "High Powered Propulsion of Large Ships".
- /14/ Narita, H.; Kunitake, Y. and Yagi, H.: "Correlation Results of Model and Full Scale Ducted Propeller Cavitation Observations". Wageningen, December 1974. Symposium on "High Powered Propulsion of Large Ships".
- /15/ Voogd, A.A.: "Some developments in the design of cavitation-erosion free propellers", Wageningen December 1974, Symposium on "High Powered Propulsion of Large Ships".
- /16/ Isay, W.H.; Roestel, Th.: Berechnung der Druckverteilung an Flügelprofilen in gashaltiger Wasserströmung. ZAMM 54 (1974).
- /17/ Isay, W.H.: Zur Berechnung instationärer transsonischer Druckfelder mit Stößen bei gashaltigen Wasserströmungen. Bericht Nr. 322, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg (1975).

HSVA-PROP. 1917

FORTSCHRITTSZIFFER $J_{KT}=0,61$

KAVITATIONSZAHL $\sigma_N=0,185$

ZUR UMRECHNUNG BENUTZTE

ZUSTANDSÄNDERUNGSGLEICHUNG FÜR

LUFTHALTIGES WASSER. $\alpha_1 = \alpha \left(\frac{p}{p_1} \right)^{1+\lambda}$

Lfd. Vers.-Nr.	Drehzahl n [Hz]	p = p _{Tunnel} [kp/cm ²]	gemess. rel. fr. Gas-V. α [-]	Polytr.-Expon. λ	Umger. rel. fr. Gas-V. α_1 [-]	Totaler Gasgeh. C ₀ [‰]	Wasser Temp. t _w [°C]	Sättig. Gasgeh. C _s [‰]	Sättig.-Grad b. atm. Druck ϵ_{ATM}	Bemerkung
144	30	0,553	$0,519 \cdot 10^{-6}$	2,5 ^①	$0,462 \cdot 10^{-4}$	- ^②	22,5°	17,85	0,44 ^①	Bezug-Dr. p ₁ =0,261 kp/cm ² Hahn zu
90	"	0,537	$0,515 \cdot 10^{-5}$	2,0	$0,536 \cdot 10^{-4}$	7,31	21,9°	18,04	0,41	Bezug-Dr. p ₁ =0,246 kp/cm ² Hahn auf
65	"	0,542	$0,196 \cdot 10^{-4}$	3,0	$0,462 \cdot 10^{-3}$	16,12	21,0°	18,34	0,88	" "
133	"	0,558	$0,389 \cdot 10^{-4}$	4,5	$0,352 \cdot 10^{-2}$	18,25	22,3°	17,91	1,02	" "
75	"	0,535	$0,507 \cdot 10^{-4}$	5,0	$0,536 \cdot 10^{-2}$	19,51	21,5°	18,17	1,07	" "
153	20	0,261	$0,148 \cdot 10^{-5}$	-	$0,148 \cdot 10^{-5}$	7,9	22,5°	17,85	-	Bezug-Dr. p ₁ =0,261 kp/cm ²
95	"	0,246	$0,459 \cdot 10^{-5}$	-	$0,459 \cdot 10^{-5}$	8,0	22,3°	17,91	-	Bezug-Dr. p ₁ =0,246 kp/cm ²
80	"	0,246	$0,131 \cdot 10^{-3}$	3,0	$0,131 \cdot 10^{-3}$	12,67	21,7°	18,11	0,70	" "
148	15	0,160	$0,279 \cdot 10^{-5}$	0,5 ^③	$0,134 \cdot 10^{-5}$	7,9	22,5°	17,85	0,44 ^③	Bez.-Dr. p ₁ =0,261 kp/cm ²
102	"	0,144	$0,262 \cdot 10^{-4}$	1,5 ^④	$0,687 \cdot 10^{-5}$	8,75	22,5°	17,85	0,49 ^④	" p ₁ =0,246 kp/cm ²
138	"	0,166	$0,728 \cdot 10^{-4}$	1,8	$0,242 \cdot 10^{-4}$	12,6	23,5°	17,51	0,72	" "
85	"	0,144	$0,884 \cdot 10^{-4}$	1,8 ÷ 2,0	$0,177 \cdot 10^{-4}$	11,82	21,9°	18,04	0,66	" "

① $\lambda = 2,5$ wie bei Messung Lfd. Nr. 145, vgl. Abb. 4

② Nicht gemessen

③ Kurve "Hahn geschlossen" in Abb. 6, ferner vgl. Abb. 4

④ Kurve "Hahn offen" in Abb. 6

TABELLE 1

HSVA-PROP. 1917

FORTSCHRITTSZIFFER $J_{KT}=0,61$
 KAVITATIONSZIFFER $\sigma_N=0,211$

ZUR UMRECHNUNG BENUTZTE
 ZUSTANDSÄNDERUNGSGLEICHUNG
 FÜR LUFTHALTIGES WASSER

$$\alpha_1 = \alpha \left(\frac{p}{p_1}\right)^{1+\lambda}$$

Lfd. Vers.-Nr.	Drehzahl n [Hz]	p = p _{Tunnel} [kp/cm ²]	gemess. rel. fr. Gas-V. α [-]	Polytr.-Expon. λ	Umger. rel. fr. Gas-V. α_1 [-]	Totaler Gasgeh. C ₀ [‰]	Wasser-Temp. t _w [°C]	Sättig. Gasgeh. C _s [‰]	Sättig.-Grad b. atm Druck ϵ_{ATM} [-]	Bemerkung
87	30	0,611	$0,769 \cdot 10^{-5}$	2,0 ^①	$0,808 \cdot 10^{-4}$	7,31	21,9°	18,04	0,41 ^①	Bez.-Dr. p ₁ =0,279
60+62	"	0,616	$0,101 \cdot 10^{-4}$	3,0	$0,240 \cdot 10^{-3}$	15,36	20,1°	18,65	0,82	" .. kp/cm ²
134	"	0,632	$0,191 \cdot 10^{-4}$	4,5	$0,171 \cdot 10^{-2}$	18,25	22,3°	17,91	1,02	" "
70	"	0,608	$0,399 \cdot 10^{-4}$	5,0	$0,427 \cdot 10^{-2}$	20,28	21,0°	18,34	1,11	" "
68	"	0,615	$0,718 \cdot 10^{-4}$	5,0 ^②	$0,824 \cdot 10^{-2}$	27,37	21,0°	18,34	1,49 ^②	" "
92	20	0,279	$0,157 \cdot 10^{-5}$	—	$0,157 \cdot 10^{-5}$	7,31	21,9°	18,0	0,41	" "
77	"	0,280	$0,126 \cdot 10^{-3}$	3,0	$0,128 \cdot 10^{-3}$	18,17	21,5°	18,17	0,86	" "
99	15	0,162	$0,569 \cdot 10^{-5}$	1,5-2,0 ^①	$0,146 \cdot 10^{-5}$	8,75	22,5	17,86	0,45 ^①	" "
139	"	0,184	$0,582 \cdot 10^{-4}$	1,8	$0,181 \cdot 10^{-4}$	12,6	23,5°	17,51	0,72	" "
82	"	0,162	$0,120 \cdot 10^{-3}$	2,0	$0,235 \cdot 10^{-4}$	12,67	21,7°	18,11	0,70	" "
145	30	0,626	$0,116 \cdot 10^{-5}$	2,5 ^③	$0,163 \cdot 10^{-4}$	—	22,5°	17,86	—	Bez.-Dr. p ₁ =0,294
154	20	0,294	$0,118 \cdot 10^{-5}$	0,5 ^④	$0,118 \cdot 10^{-5}$	7,9	22,5°	17,86	0,44	" .. kp/cm ²
150	15	0,177	$0,250 \cdot 10^{-5}$	0,5 ^④	$0,117 \cdot 10^{-5}$	7,9	22,5°	17,86	0,44	" "

- ① Kurve "Hahn offen" in Abb. 6
- ② Exponent λ nicht größer 5,0 - 5,5 gesetzt
- ③ Exponent $\lambda = 2,5$ aus $\alpha = f(p)$ in Abb. 4
- ④ Kurve "Hahn geschlossen" in Abb. 6

TABELLE 2

HSVA-PROP. 1917

FORTSCHRITTSZIFFER $J_{KT} = 0,70$

KAVITATIONSZAHL $\sigma_n = 0,211$

ZUR UMRECHNUNG BENUTZTE
ZUSTANDSÄNDERUNGSGLEICHUNG
FÜR LUFTHALTIGES WASSER

$$\alpha_1 = \alpha \left(\frac{p}{p_1} \right)^{1+\lambda}$$

BEZUGSDRUCK $p_1 = 0,284 \text{ kp/cm}^2$

Lfd. Vers.-Nr.	Drehzahl n [Hz]	p = P _{Tunnel} [kp/cm ²]	gemess. rel. fr. Gas-V. α [-]	Polytr.-Expon. λ	Umger. rel. fr. Gas-V. α_1 [-]	Totaler Gasgeh. C ₀ [%o]	Wasser Temp. t _w [°C]	Sättig.-Gasgeh. C _s [%o]	Sättig. Grad b. atm.-Druck $\frac{E}{E_{ATM}}$ [-]	Bemerkung
104	30	0,616	$0,183 \cdot 10^{-5}$	1,5 ^①	$1,268 \cdot 10^{-5}$	8,28	21,9°	18,04	0,46 ^①	Hahn offen
137	"	0,632	$0,237 \cdot 10^{-4}$	4,5 ^③	$1,93 \cdot 10^{-3}$	15,43 ^②	23°	17,69	0,87 ^③	" "
119	"	0,625	$0,702 \cdot 10^{-4}$	5,5	$5,42 \cdot 10^{-3}$	19,73	22,5°	17,86	1,10	" "
109	20	0,284	$0,162 \cdot 10^{-5}$	—	$0,162 \cdot 10^{-5}$	8,28	21,9	18,04	—	" "
124	"	0,293	$0,808 \cdot 10^{-4}$	4	$9,444 \cdot 10^{-5}$	19,64	22,8°	17,9	1,10	" "
114	15	0,168	$0,766 \cdot 10^{-5}$	4 ^④	$5,549 \cdot 10^{-7}$	8,1	22°	18,01	0,45 ^④	" "
129	"	0,177	$0,874 \cdot 10^{-4}$	2,3	$1,84 \cdot 10^{-5}$	13,00	23°	17,69	0,73	" "

- ① Kurve "Hahn offen" in Abb. 6
- ② Zeitlicher Mittelwert zwischen 18,25 und 12,50 %
- ③ Auftragung $\alpha = f(p)$ für Lfd. Vers.-Nr. 137 ergab $\lambda = 4,5$, offenbar Beeinflussung durch offenen Hahn
- ④ Auftragung $\alpha = f(p)$ für Lfd. Vers.-Nr. 114 ergab $\lambda = 4$, Offenbar Beeinflussung durch offenen Hahn

TABELLE 3

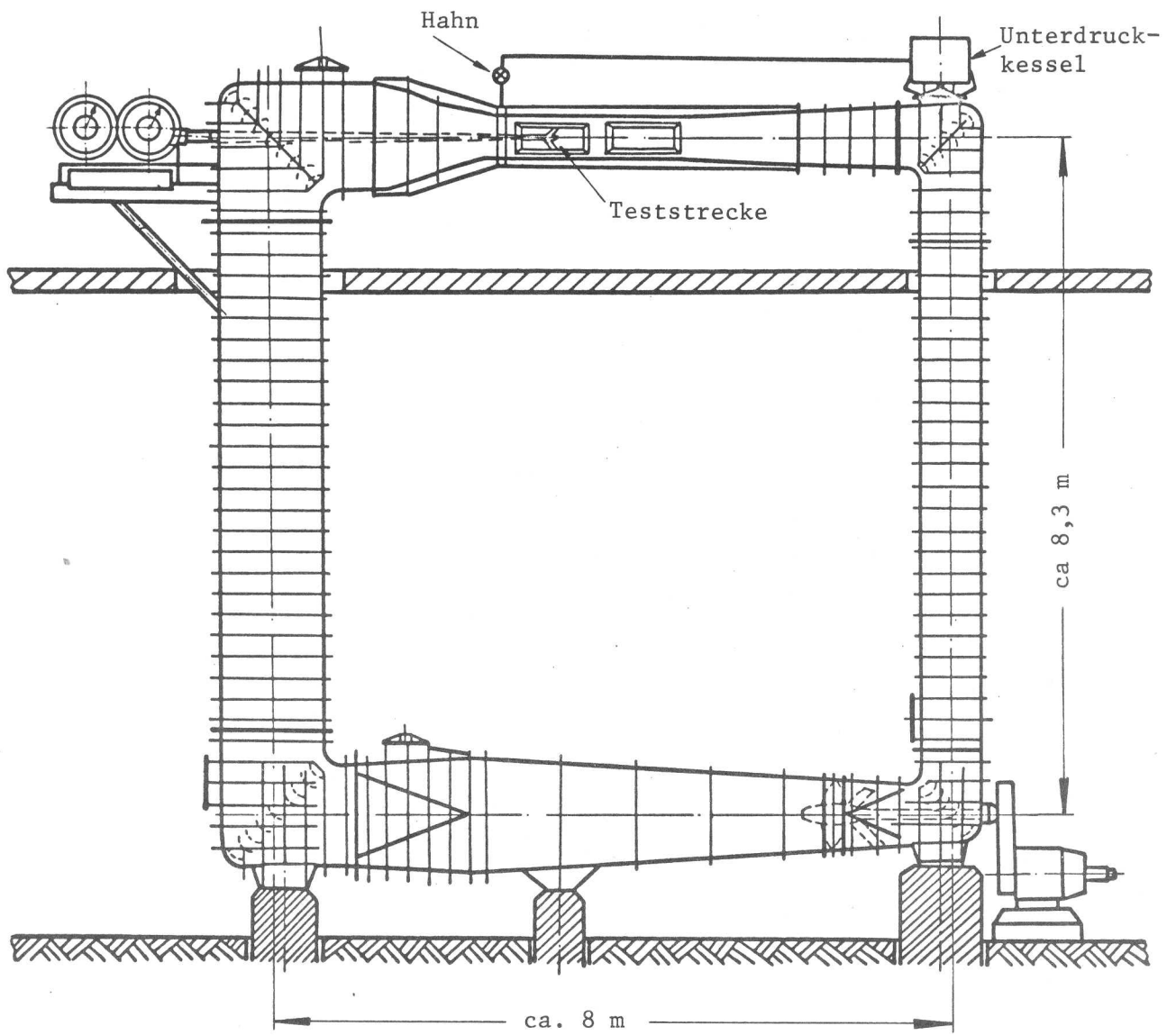


ABB. 1A MITTLERER KAVITATIONSTUNNEL DER HSVA

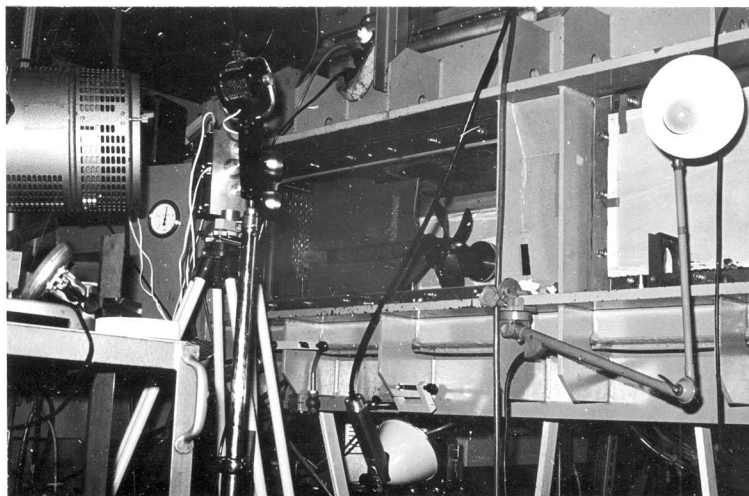


ABB. 1B PHOTO DER TESTSTRECKE MIT NACHSTROMSIEBEN, STEREOKAMERAS UND LASER

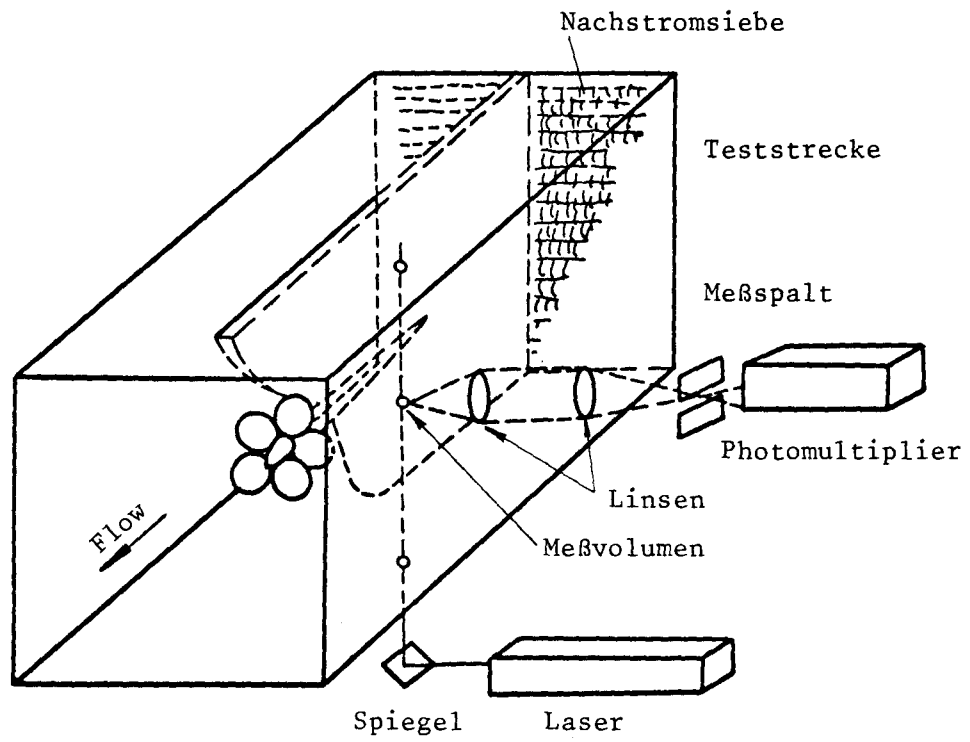
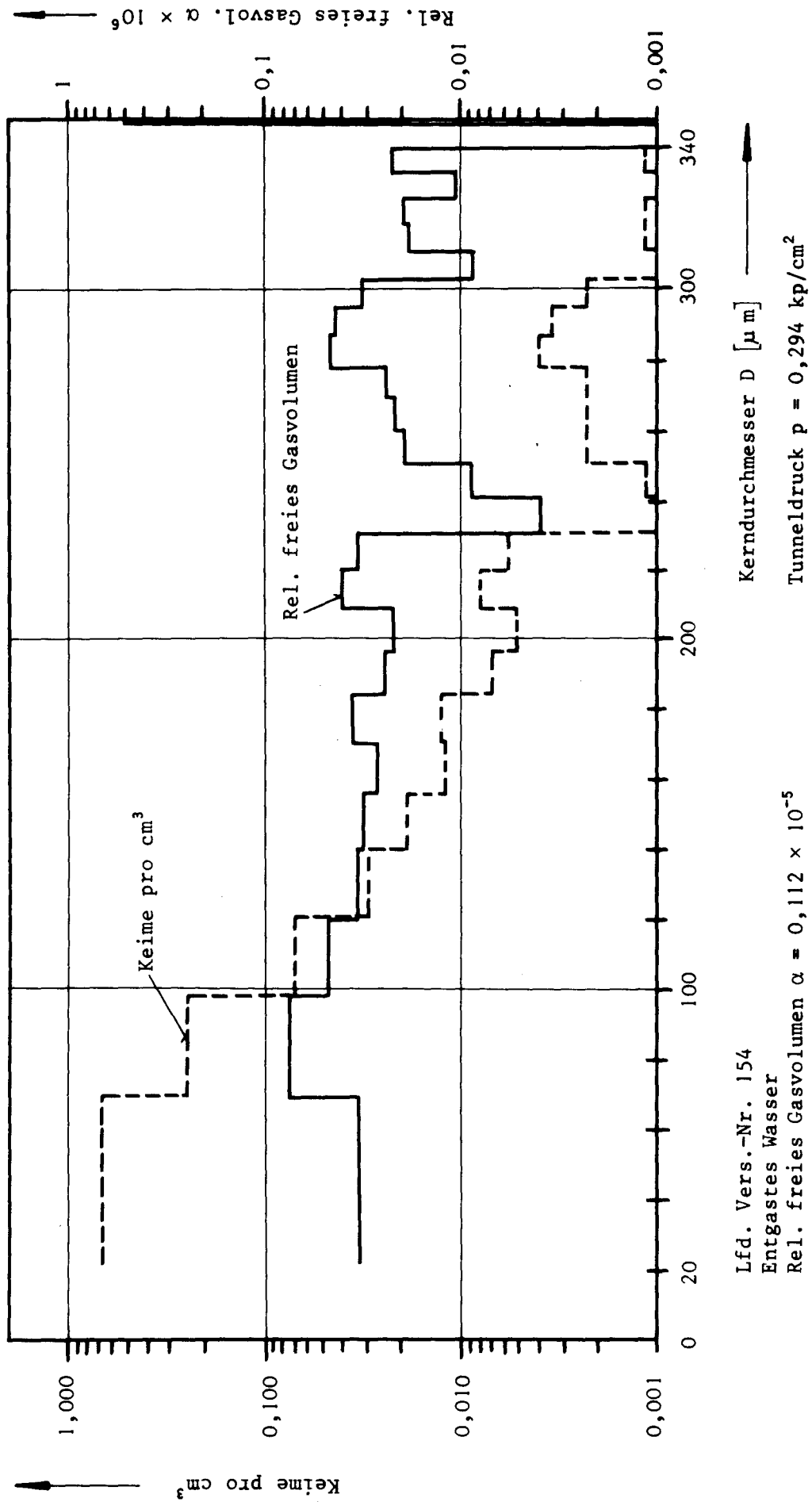
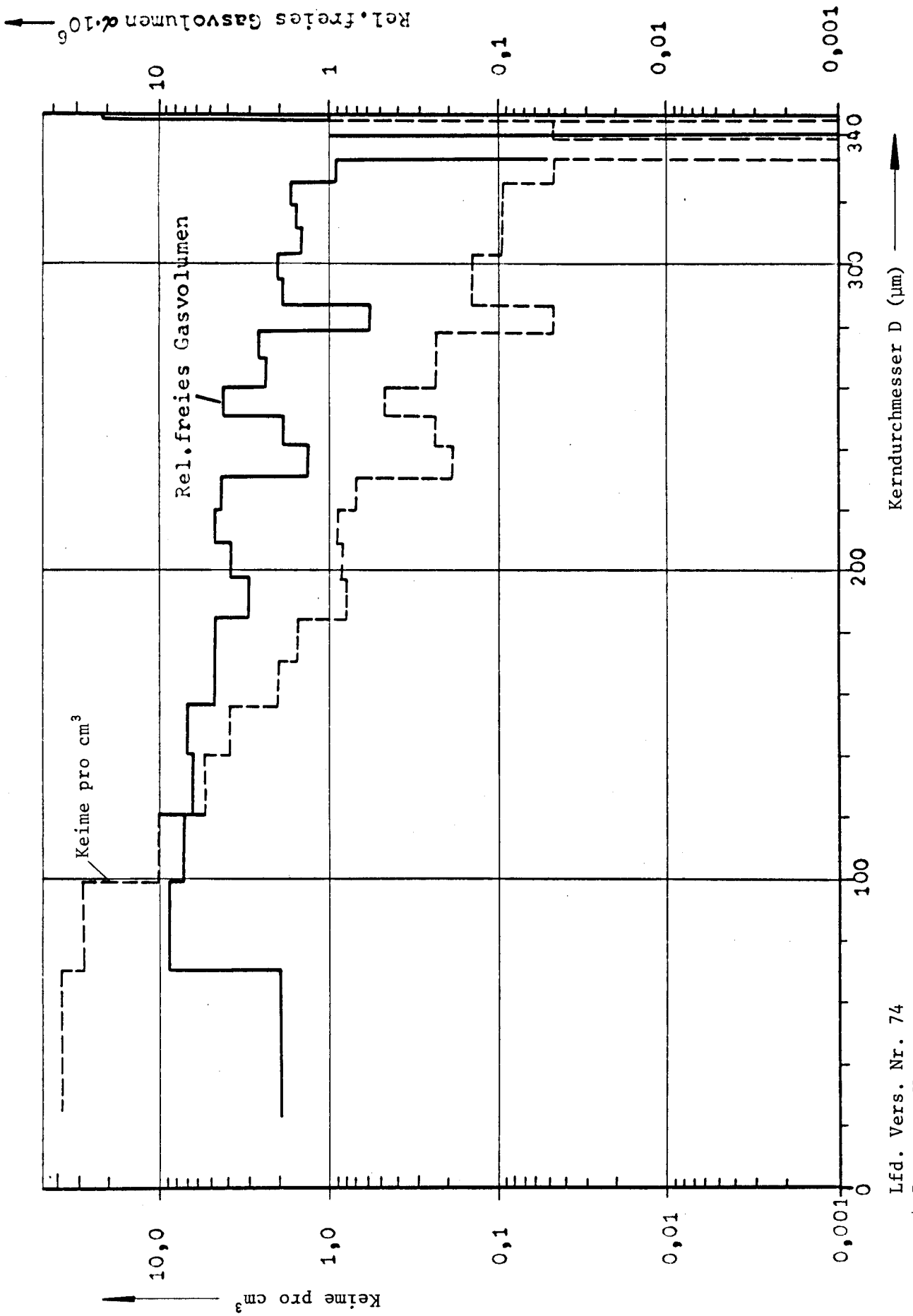


ABB. 1c PRINZIPIELLE MESSANORDNUNG FÜR DIE KEIMMESSUNG



KEIMGRÖSSENHISTOGRAMM UND ANTEIL DER KEIMGRÖSSEN
AM RELATIVEN FREIEN GASVOLUMEN α

ABB. 2



Lfd. Vers. Nr. 74

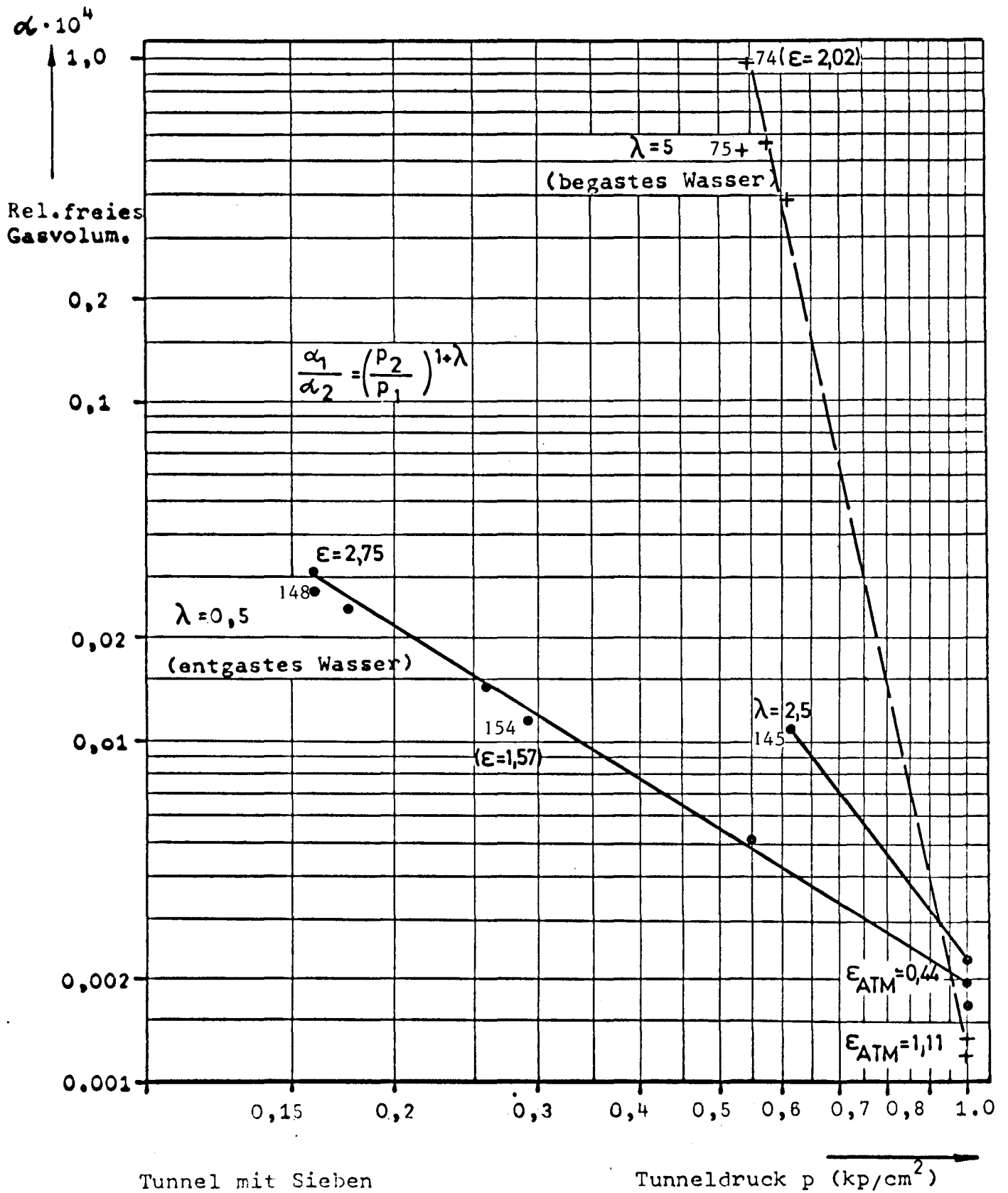
Begastes Wasser

Rel. freies Gasvolumen $\alpha = 0,992 \cdot 10^{-4}$

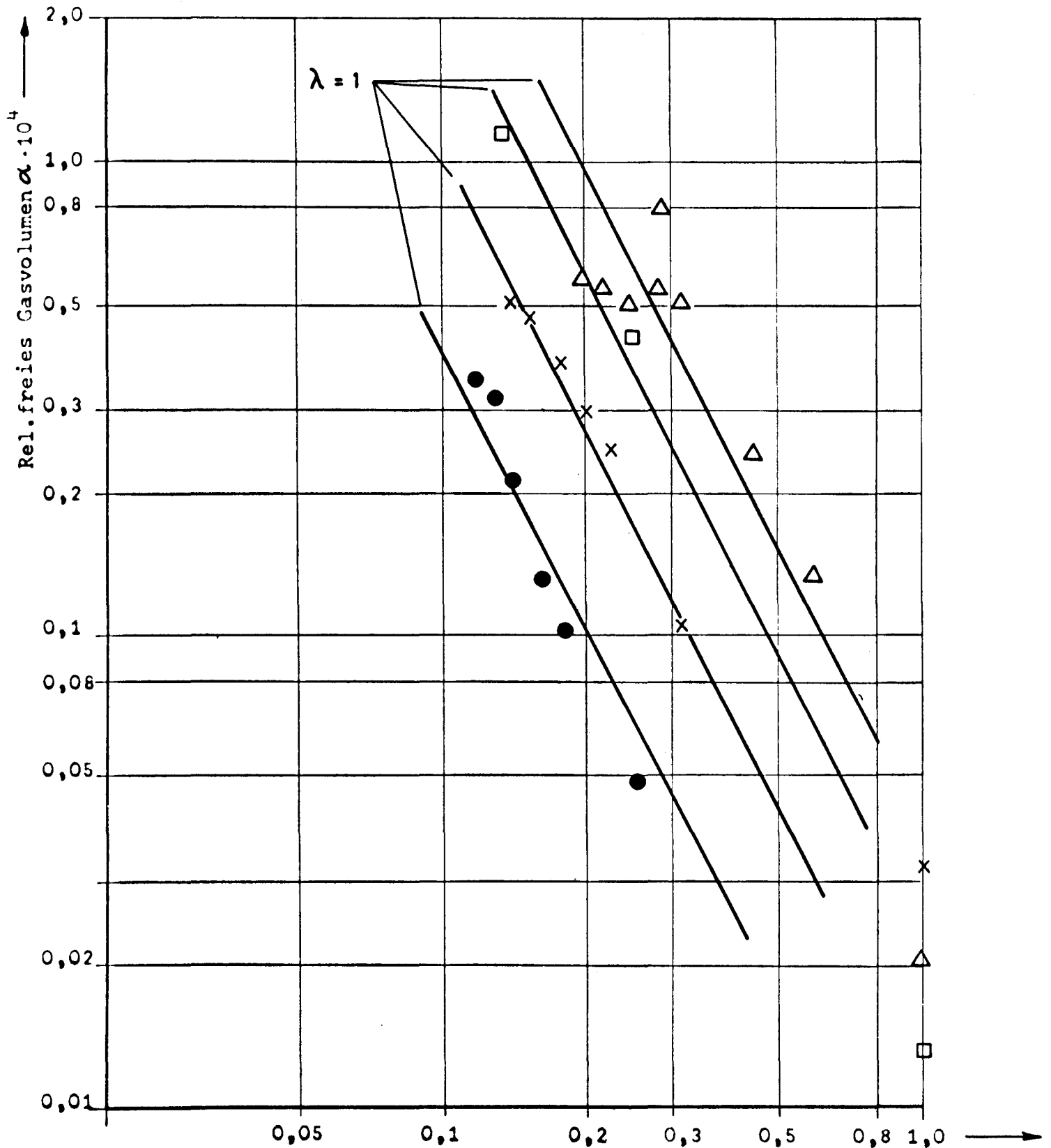
Tunnelndruck $p = 0,535 \text{ kp/cm}^2$

KEIMGRÖSSENHISTOGRAMM UND ANTEIL DER KEIMGRÖSSEN
AM RELATIVEN FREIEN GASVOLUMEN α

ABB. 3



RELATIVES FREIES GASVOLUMEN α ABHÄNGIG VOM TUNNELDRUCK P
 FÜR ENTGASTES WASSER ($\lambda = 0,5; \lambda = 2,5$) UND BEGASTES WASSER ($\lambda = 5$)



Propeller 1283

● Test 44-51

□ Test 54-58

$\epsilon_{\text{ATM}} = 0,39$

$\epsilon_{\text{ATM}} = 1,12-0,79$

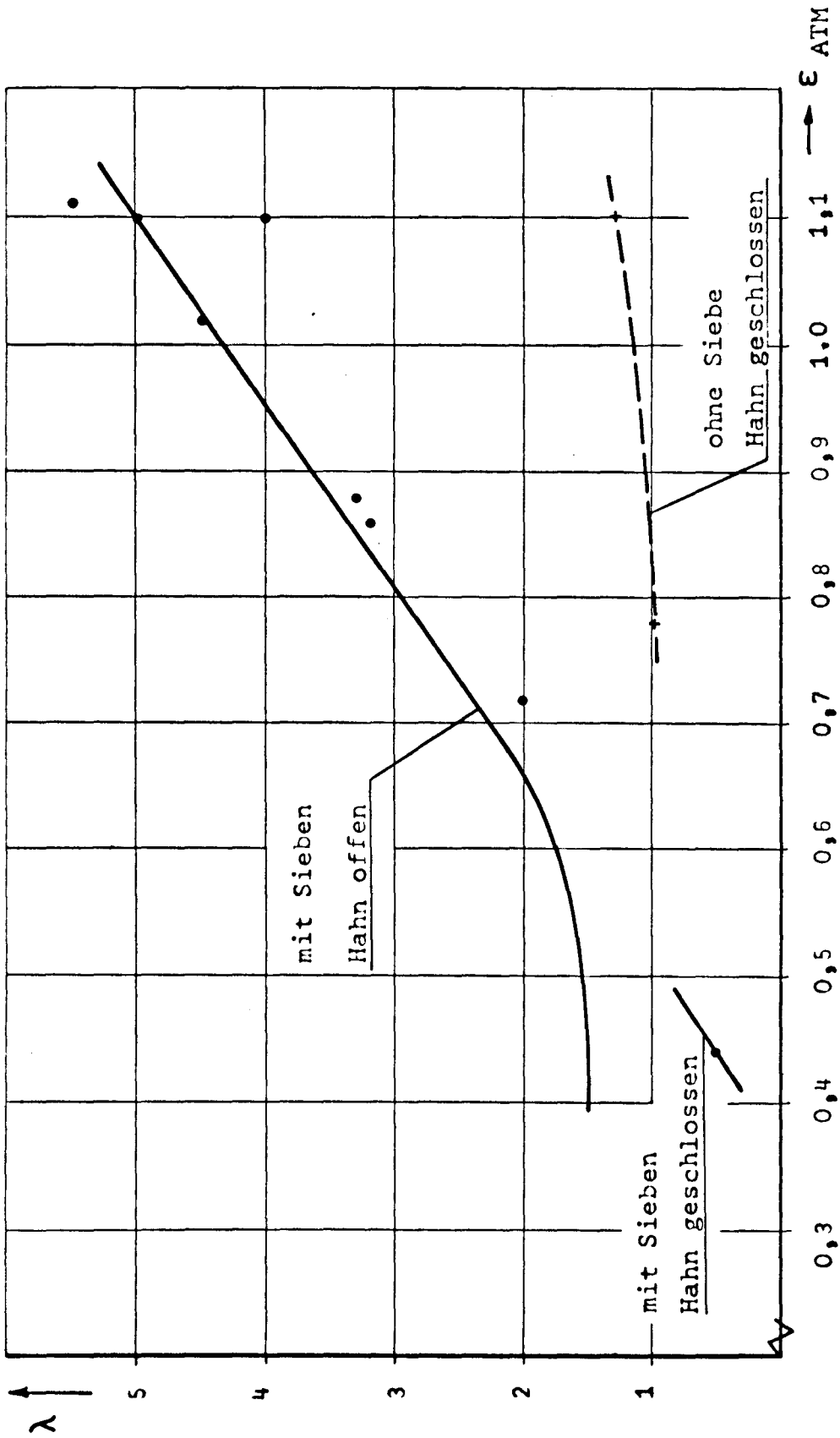
Druck p d. Meßstrecke (kp/cm^2)

X Test 29-36 $\epsilon_{\text{ATM}} = 0,78$

Δ Test 37-43 $\epsilon_{\text{ATM}} = 0,57$

RELATIVES FREIES GASVOLUMEN α FÜR DIE TESTSTRECKE
OHNE SIEB MIT GESCHLOSSENEM HAHN

ABB. 5



ABHÄNGIGKEIT DES EXPONENTEN λ IN DER FORMEL $\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1+\lambda}$
 VOM GASSÄTIGUNGSGRAD ϵ_{ATM}

FÜR VERSCHIEDENE TUNNELZUSTÄNDE

ABB. 6

Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt G. m. b. H.

Freifahrtversuchsergebnis

Auftraggeber: SFB

Versuch-Nr.: P 1575

Versuchsdatum: 13.11.74

Reynoldszahl Rn_{σ} : $5,1 \cdot 10^5$

Wassertemperatur: $15,0 \text{ }^\circ\text{C}$

Versuchsdrehzahl: $12,0 \text{ sec}^{-1}$

Modellmaßstab λ : 28

Propellermodell-Nr.: 1917

Schiffsmodell-Nr.:

Durchmesser D : 7000,0 mm

Nabendurchmesser d :

Steigungsverhältnis P/D : 0,9357

Flächenverhältnis A_z/A_0 : 0,7799

Flügelzahl Z : 5

Schubbeiwert:

$$K_T = \frac{T}{\rho n^3 D^5}$$

Drehmomentbeiwert:

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^3 D^5}$$

Fortschrittsgrad:

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

Wirkungsgrad:

$$\eta_0 = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_Q}$$

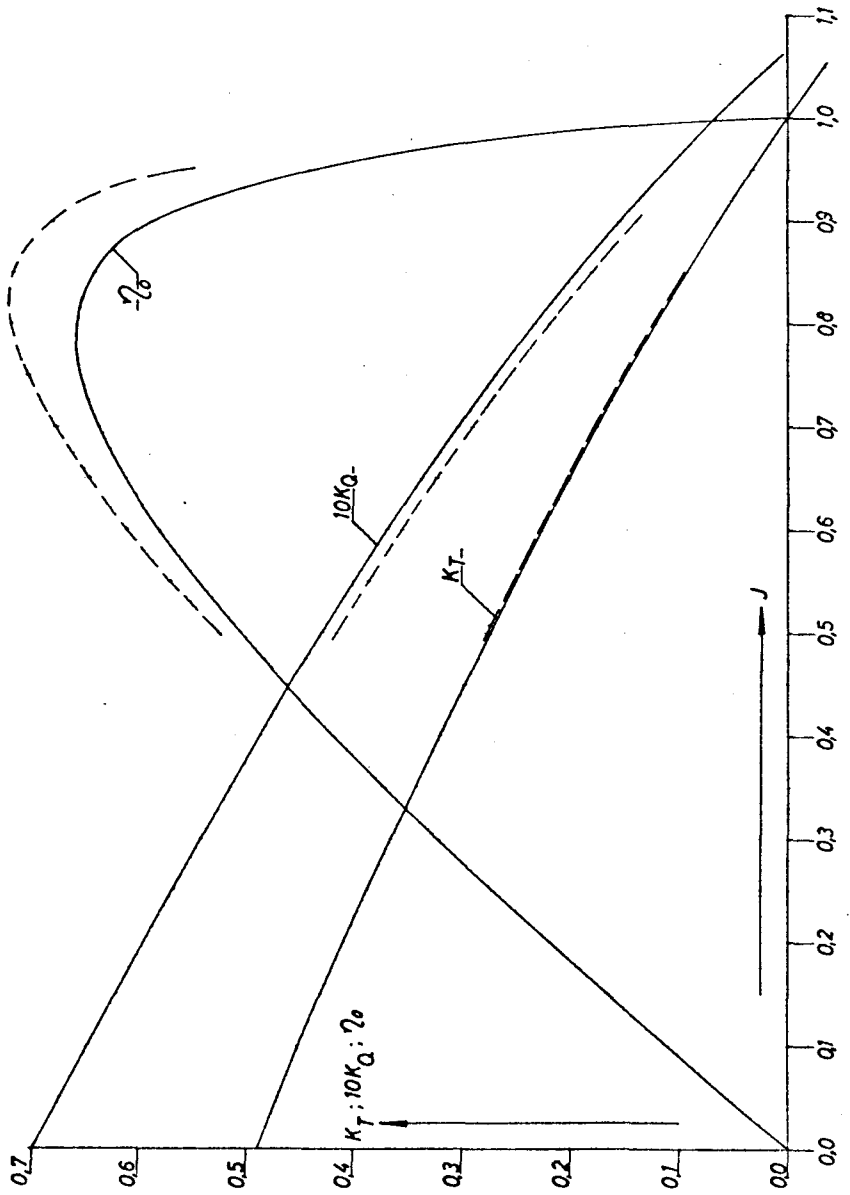


ABB. 7

FREIFAHRTVERSUCHSERGEBNISSE DES
"SYDNEY-EXPRESS" PROPELLERS

NACHSTROMVERTEILUNGEN FÜR 4
VERSCHIEDENE GRUNDGESCHWINDIGKEITEN

Radius [mm]	131,2	111,2	91,2	71,2	51,2	31,2
6,25	□	×	△	+	○	·
4,32	□	×	△	+	○	·
3,25	□	×	△	+	○	·

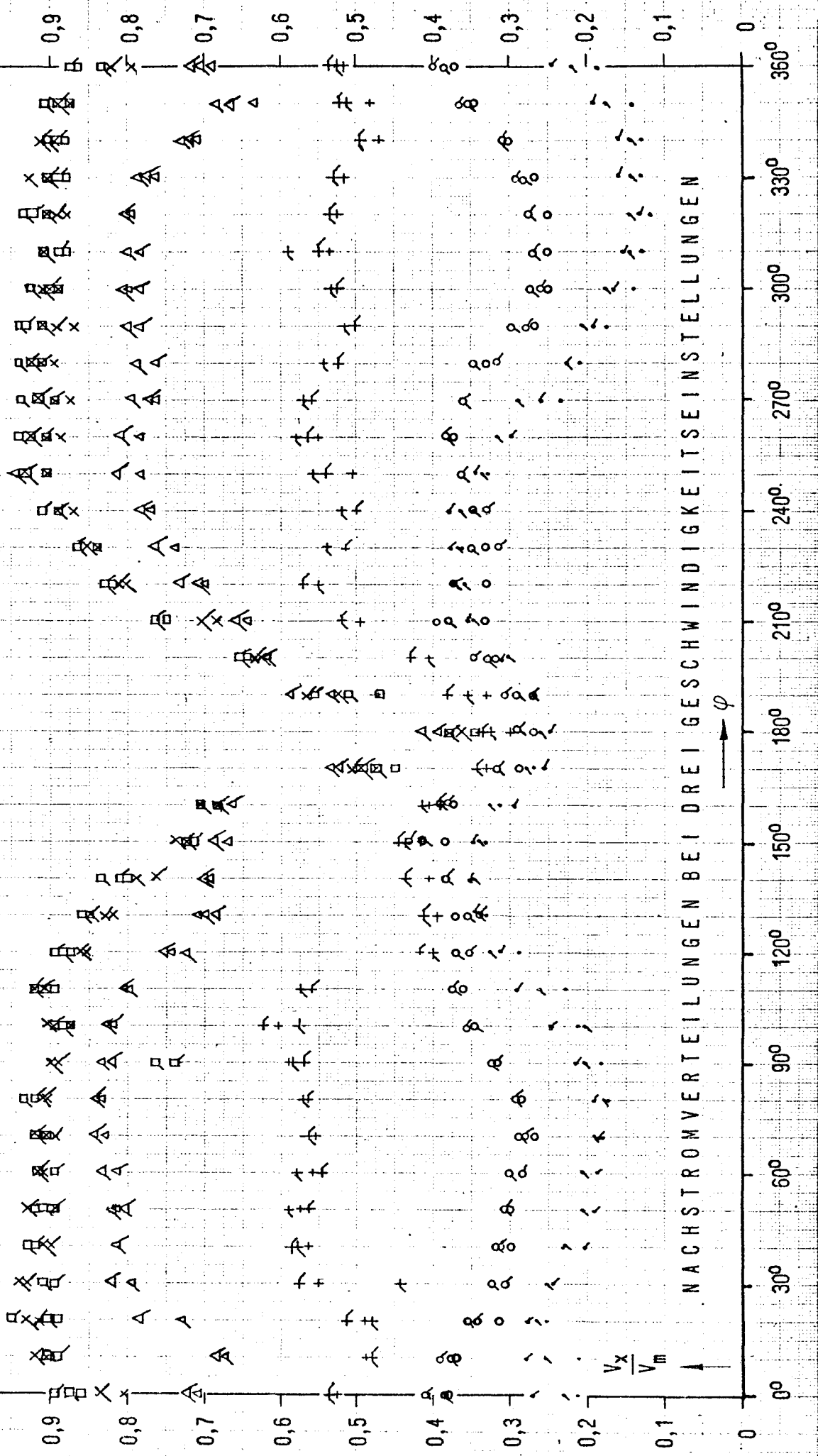
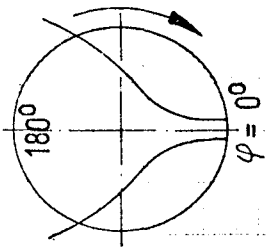
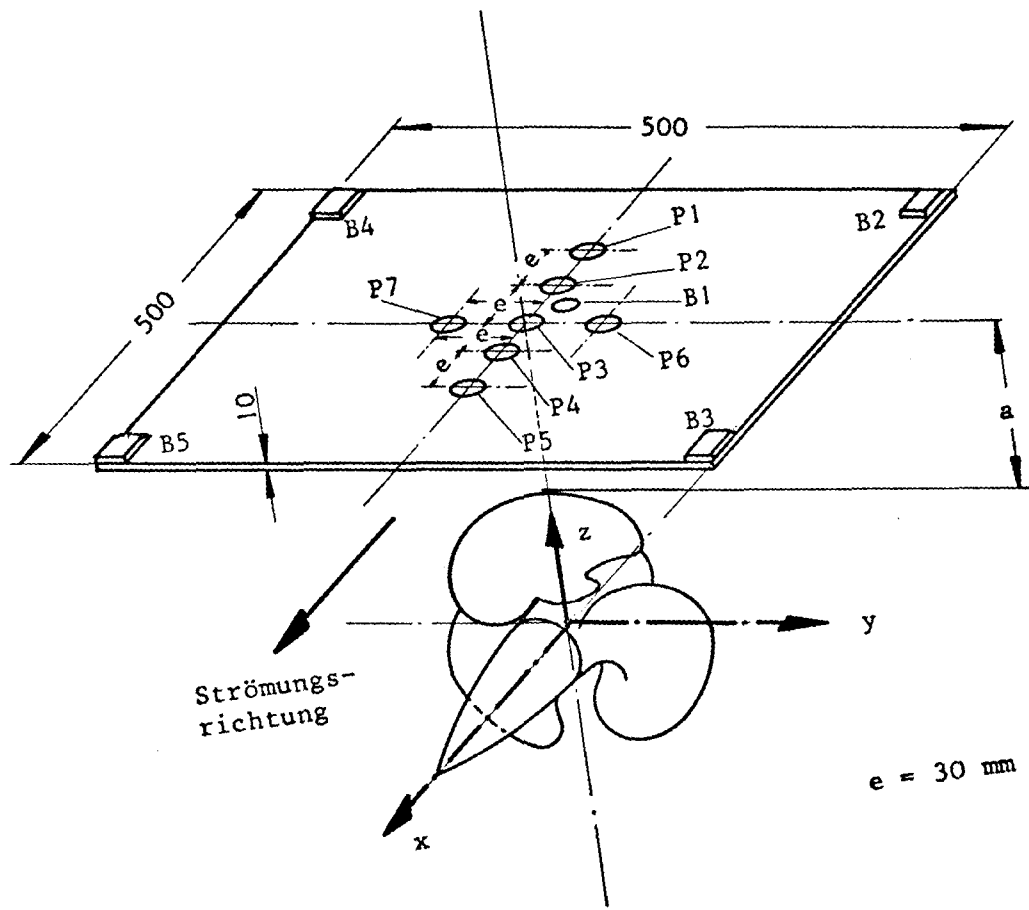
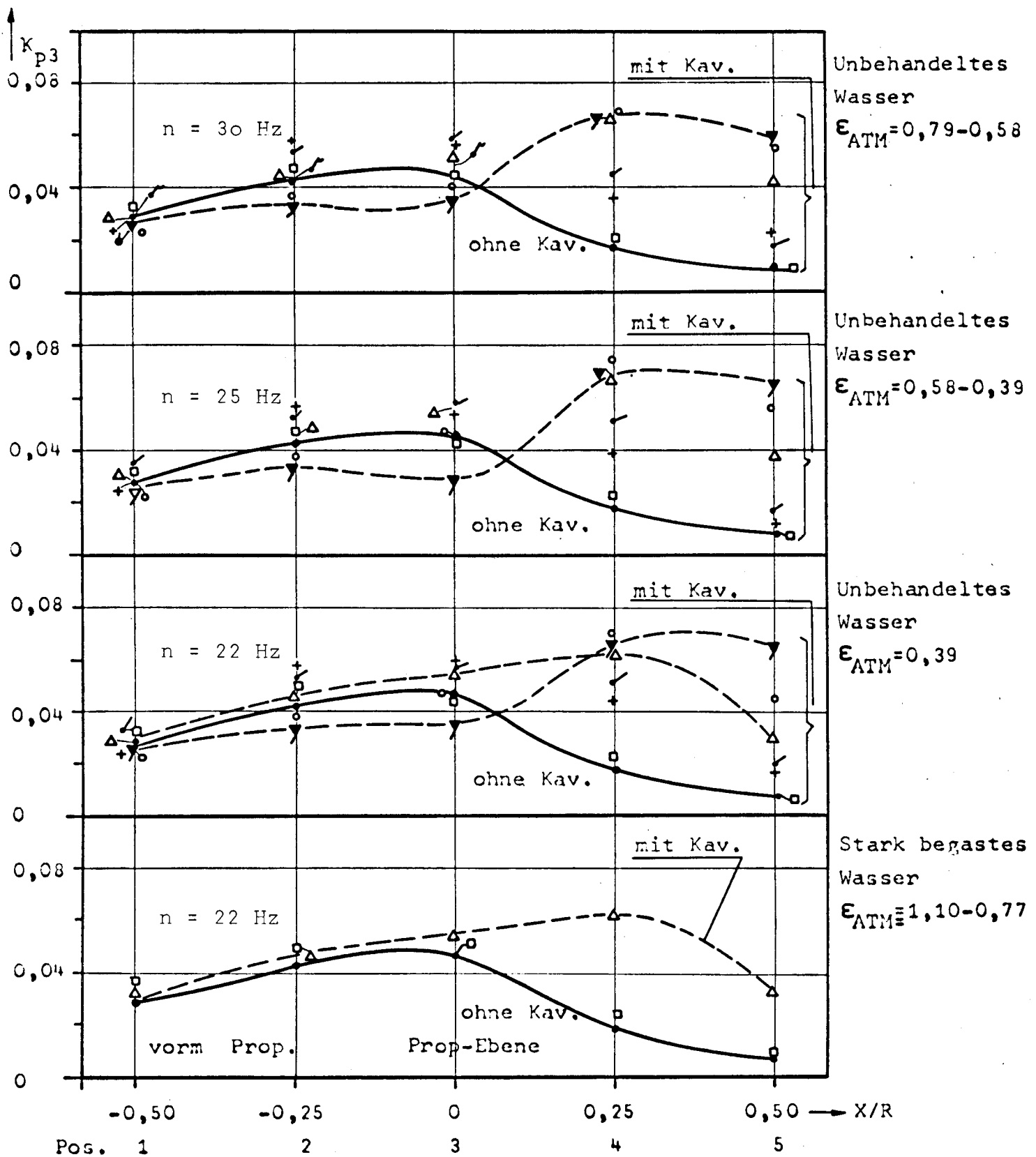


ABB. 8



ANORDNUNG DER MESSTELLEN UND
DES KOORDINATENSYSTEMS

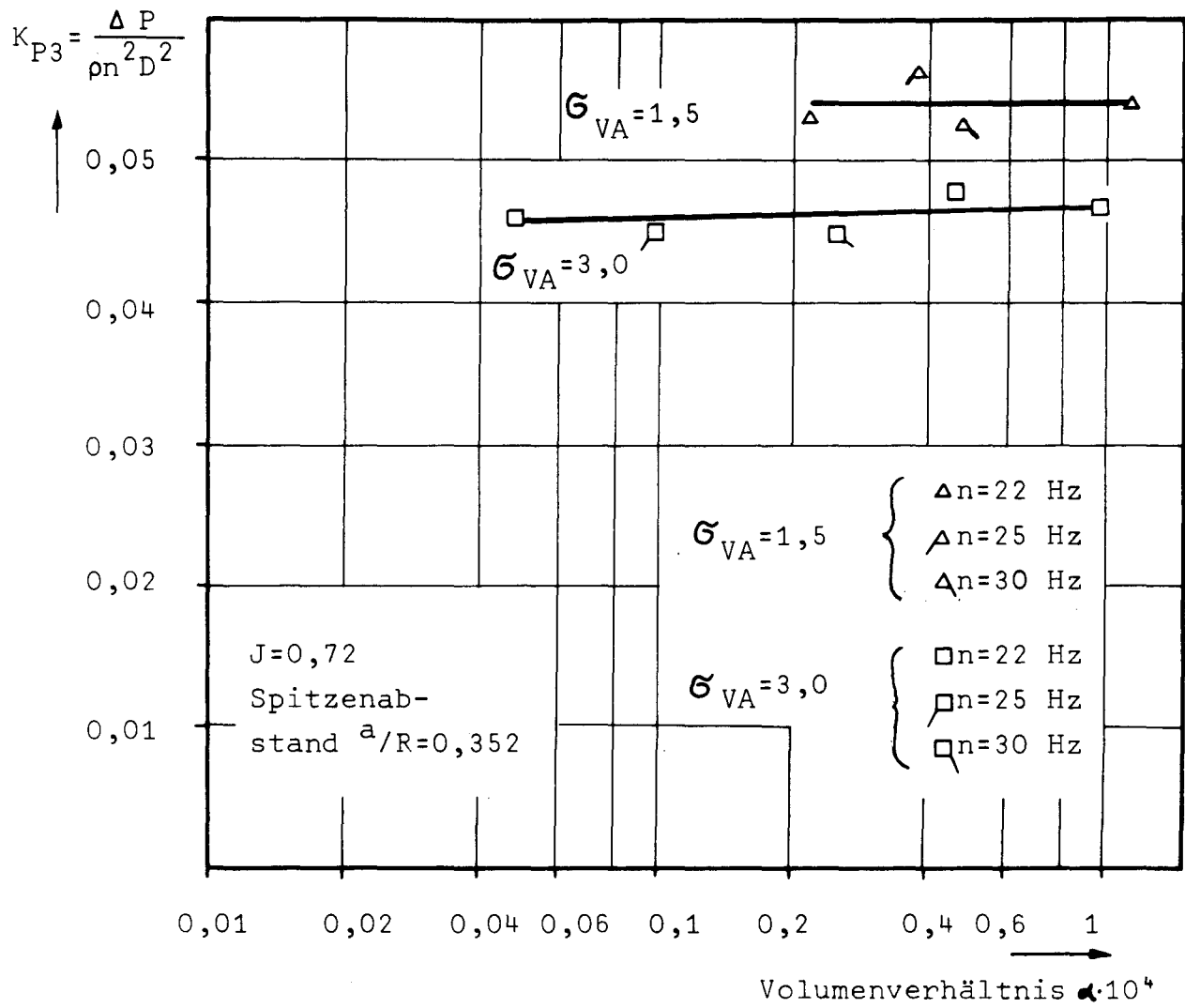
ABB. 9



HSVA-Prop.1283 ohne Nachstrom
 Fortschrittsziffer $J=0,72$
 Spitzenabstand $a/R=0,352$

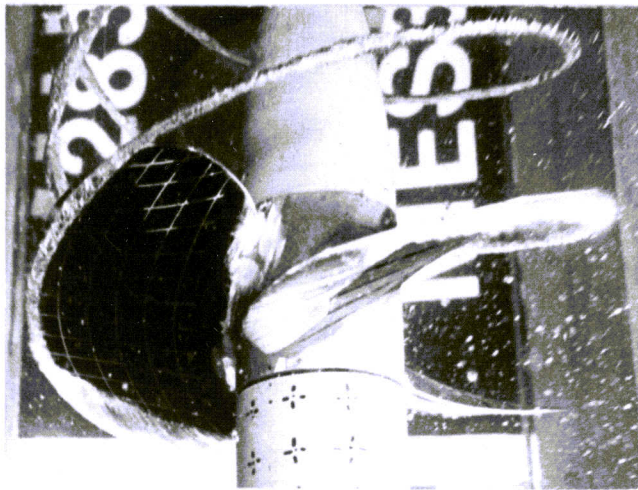
● ATM
 ---□--- $\sigma_{VA} = 3,0$
 + = 2,0
 ✓ = 1,75
 ---△--- = 1,50
 ○ = 1,25
 ---▽--- = 1,14

DIMENSIONSLOSE DRUCKAMPLITUDE K_{p3} IN
 X-RICHTUNG FÜR VERSCHIEDEN BEGASTES WASSER.



Propeller 1283 freifahrend
 Druckdose P3 direkt ü. Prop.
 Flügelzahl $Z=3$

DIMENSIONSLOSE DRUCKAMPLITUDE K_{P3}
 ABHÄNGIG VOM FREIEN GASVOLUMENVERHÄLTNIS

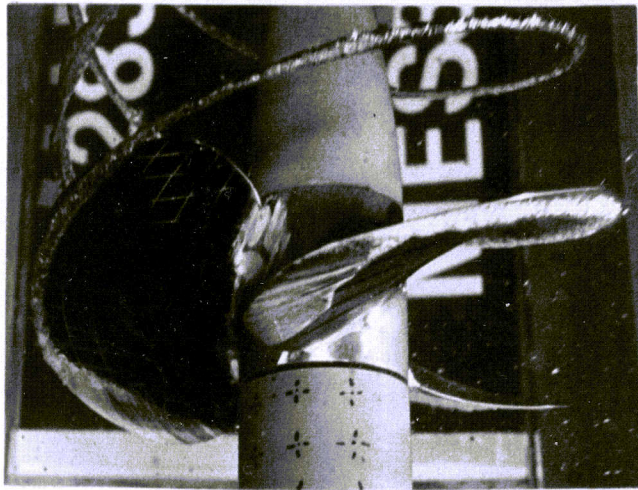


A) Foto 31, N= 30 Hz,

$$\alpha = 0,25 \cdot 10^{-4}$$

$$\epsilon = 1,72$$

$$\epsilon_{ATM} = 0,78$$

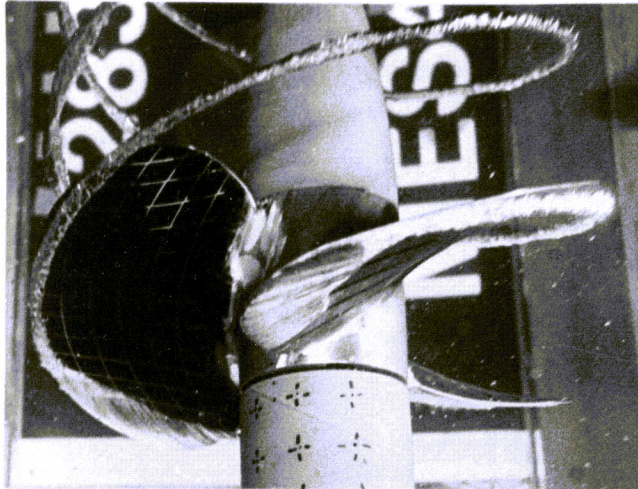


B) Foto 38, N= 25 Hz

$$\alpha = 0,10 \cdot 10^{-4}$$

$$\epsilon = 1,74$$

$$\epsilon_{ATM} = 0,58$$

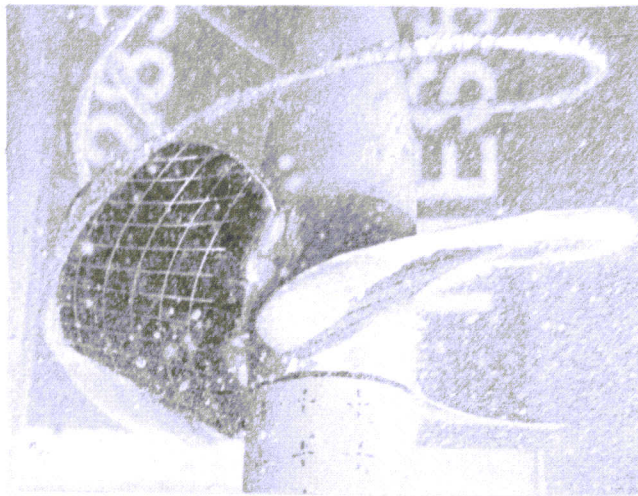


C) Foto 45, N= 22 Hz

$$\alpha = 0,48 \cdot 10^{-5}$$

$$\epsilon = 1,52$$

$$\epsilon_{ATM} = 0,39$$



D) Foto 56, N=22 Hz

$$\alpha = 0,47 \cdot 10^{-4}$$

$$\epsilon = 3,90$$

$$\epsilon_{ATM} = 0,96$$

FALL A-C : UNBEHANDELTES WASSER

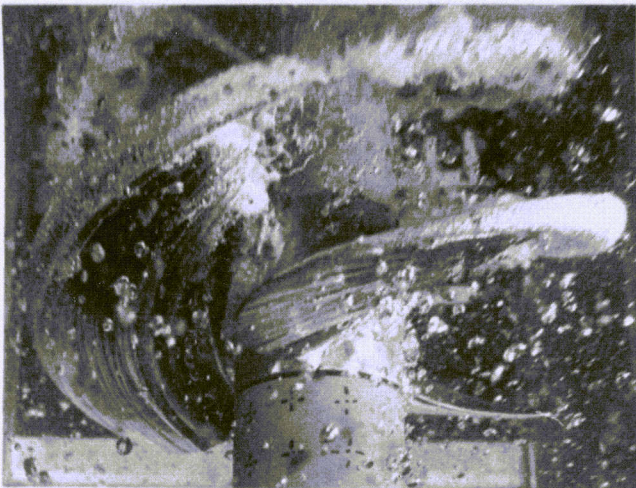
FALL D : STARK BEGASTES WASSER

FORTSCHRITTSZIFFER $J = 0,72$

KAVITATIONSZAHL $\sigma_{VA} = 3,0$

SPITZENABSTAND $A/R = 0,352$

PROPELLER 1283 IN HOMOGENER ZUSTRÖMUNG



A)Foto 35; $N = 30$ Hz

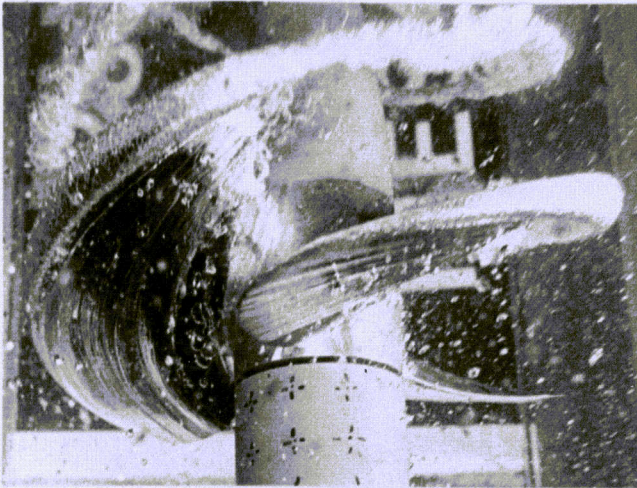
$$\alpha = 0,53 \cdot 10^{-4}$$

$$\epsilon = 2,75$$

$$\epsilon_{ATM} = 0,58$$

FORTSCHRITTSZIFFER $J = 0,72$

KAVITATIONSZIFFER $\sigma_{VA} = 1,25$



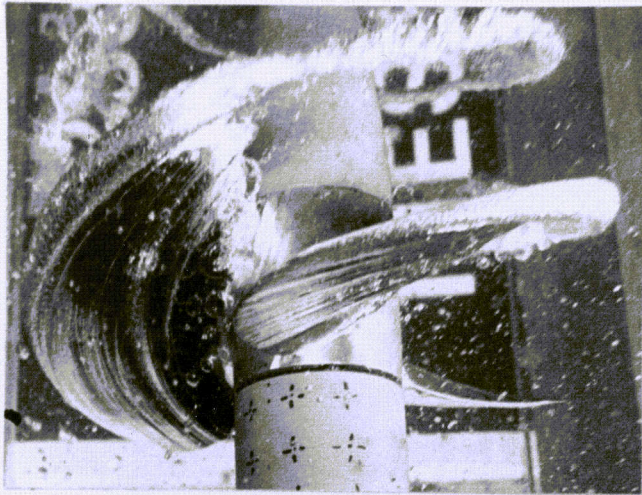
B)Foto 42; $N = 25$ Hz

$$\alpha = 0,48 \cdot 10^{-4}$$

$$\epsilon = 2,54$$

$$\epsilon_{ATM} = 0,39$$

SPITZENABSTAND $A/R = 0,352$



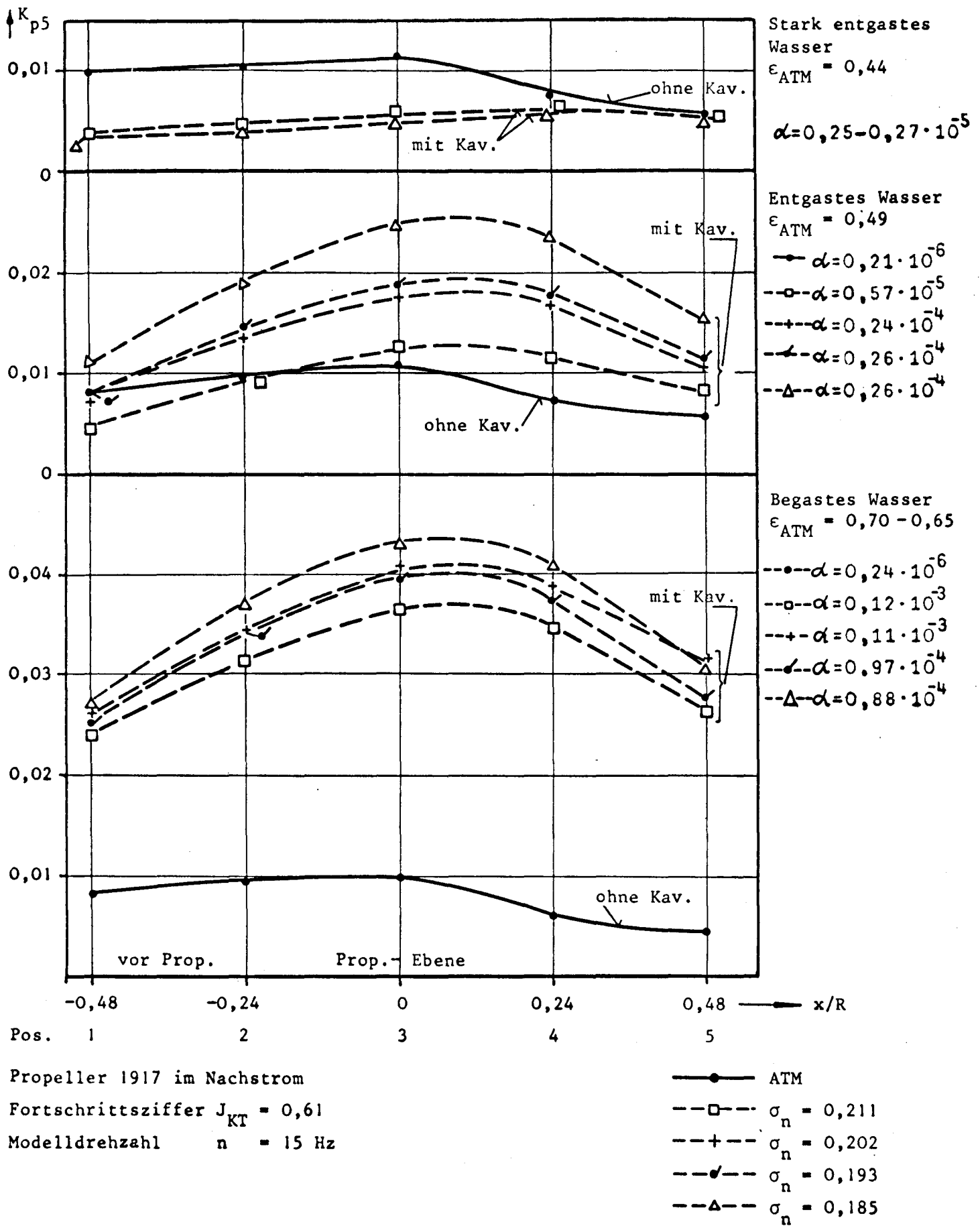
C)Foto 50; $N = 22$ Hz

$$\alpha = 0,36 \cdot 10^{-4}$$

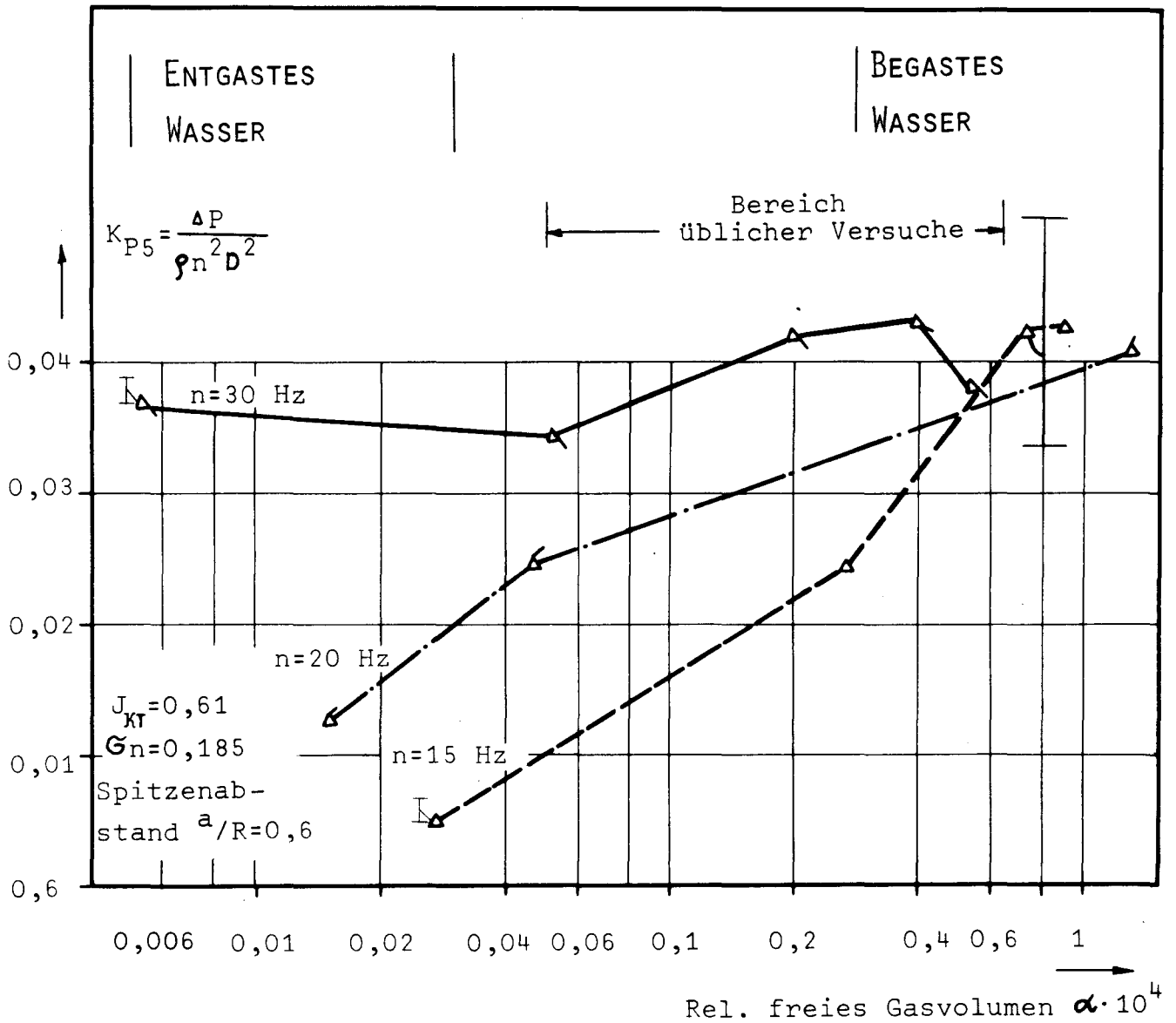
$$\epsilon = 3,03$$

$$\epsilon_{ATM} = 0,39$$

PROPELLER 1283 IN HOMOGENER ZUSTRÖMUNG



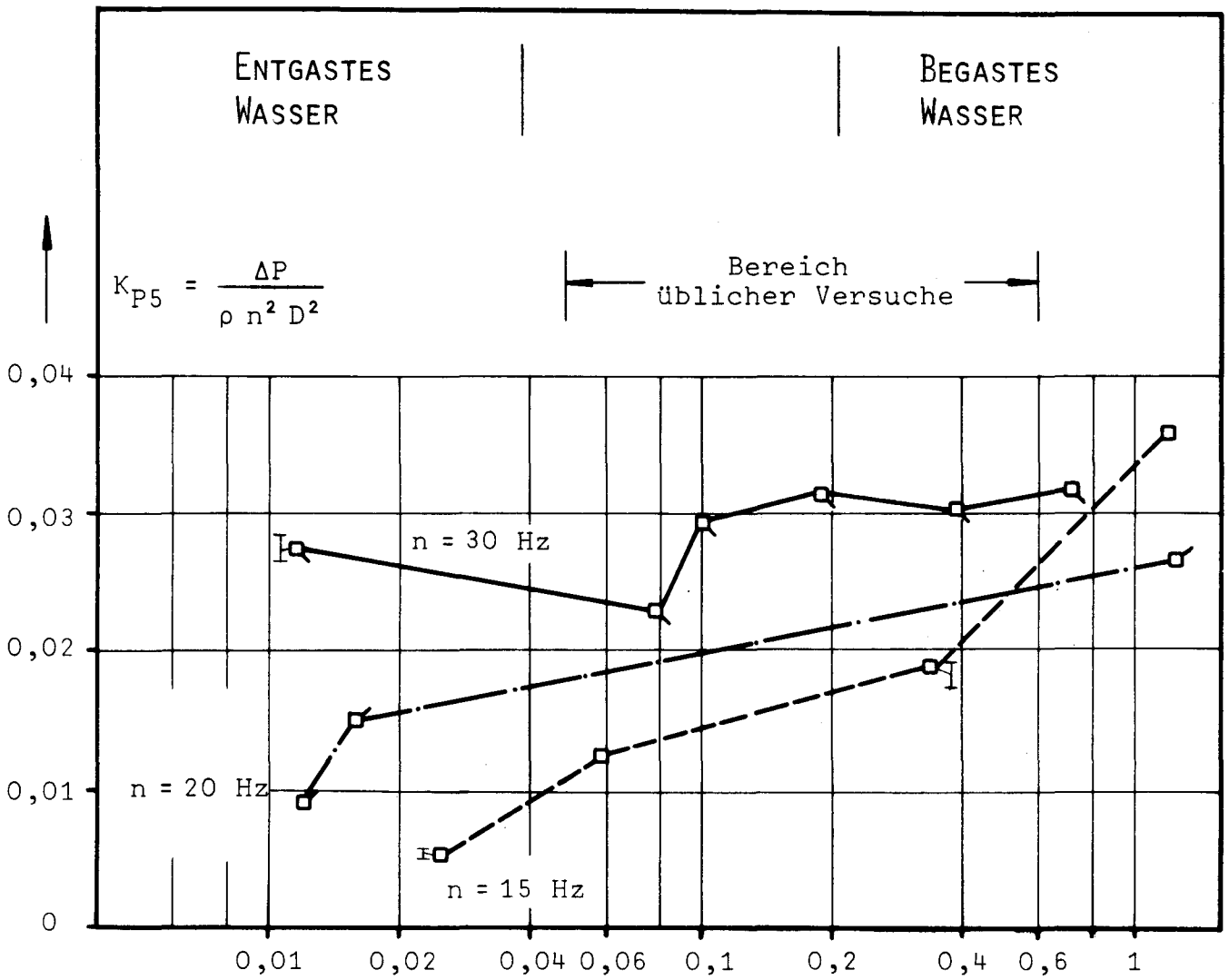
DIMENSIONSLOSE DRUCKAMPLITUDEN K_{p5} IN SCHIFFSLÄNGSRICHTUNG
 BEI VERSCHIEDEN BEGASTEM WASSER



Propeller 1917 im Nachstrom
 Druckdose P3 direkt üb. Prop.
 Flügelzahl $Z=5$

----- $n=15$ Hz
 -.-.-.- $n=20$ Hz
 _____ $n=30$ Hz

DIMENSIONSLOSE DRUCKAMPLITUDEN K_{p5}
 IN AXIALEM NACHSTROM ABHÄNGIG VOM
 FREIEN GAS-VOLUMENVERHÄLTNIS α



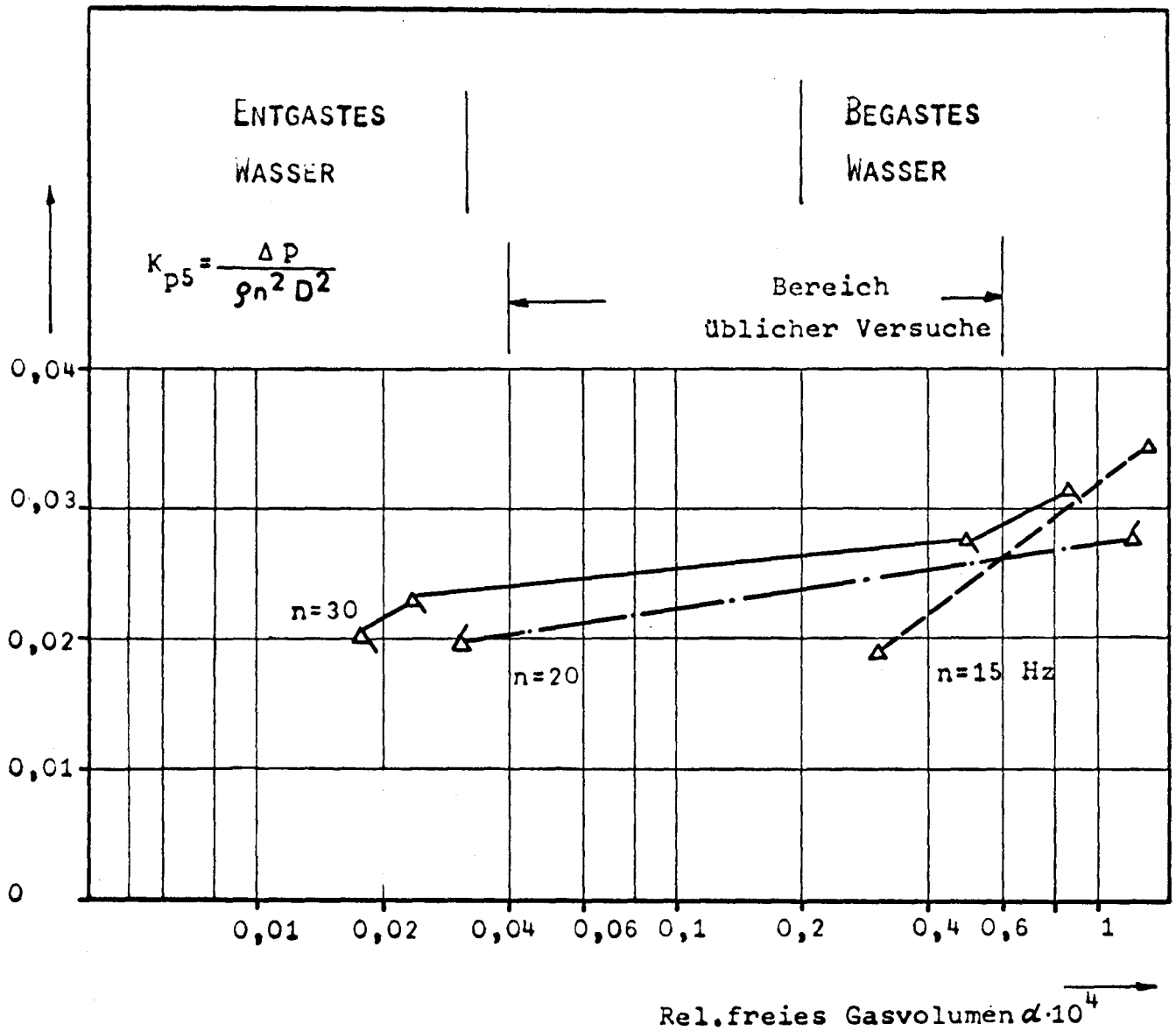
Fortschrittsziffer $J_{KT} = 0,61$
 Kavitationszahl $\sigma_n = 0,211$

Rel. freies Gasvolumen $\alpha \cdot 10^4$

Druckdose Pos. 3 direkt über Prop.
 Propeller 1917, Flügelzahl $Z = 5$

- n = 15 Hz
- .-.-◻ n = 20 Hz
- ◻ n = 30 Hz

DIMENSIONLOSE DRUCKAMPLITUDE K_{P5}
 IN AXIALEM NACHSTROM ABHÄNGIG VOM
 RELATIVEN FREIEN GASVOLUMEN α

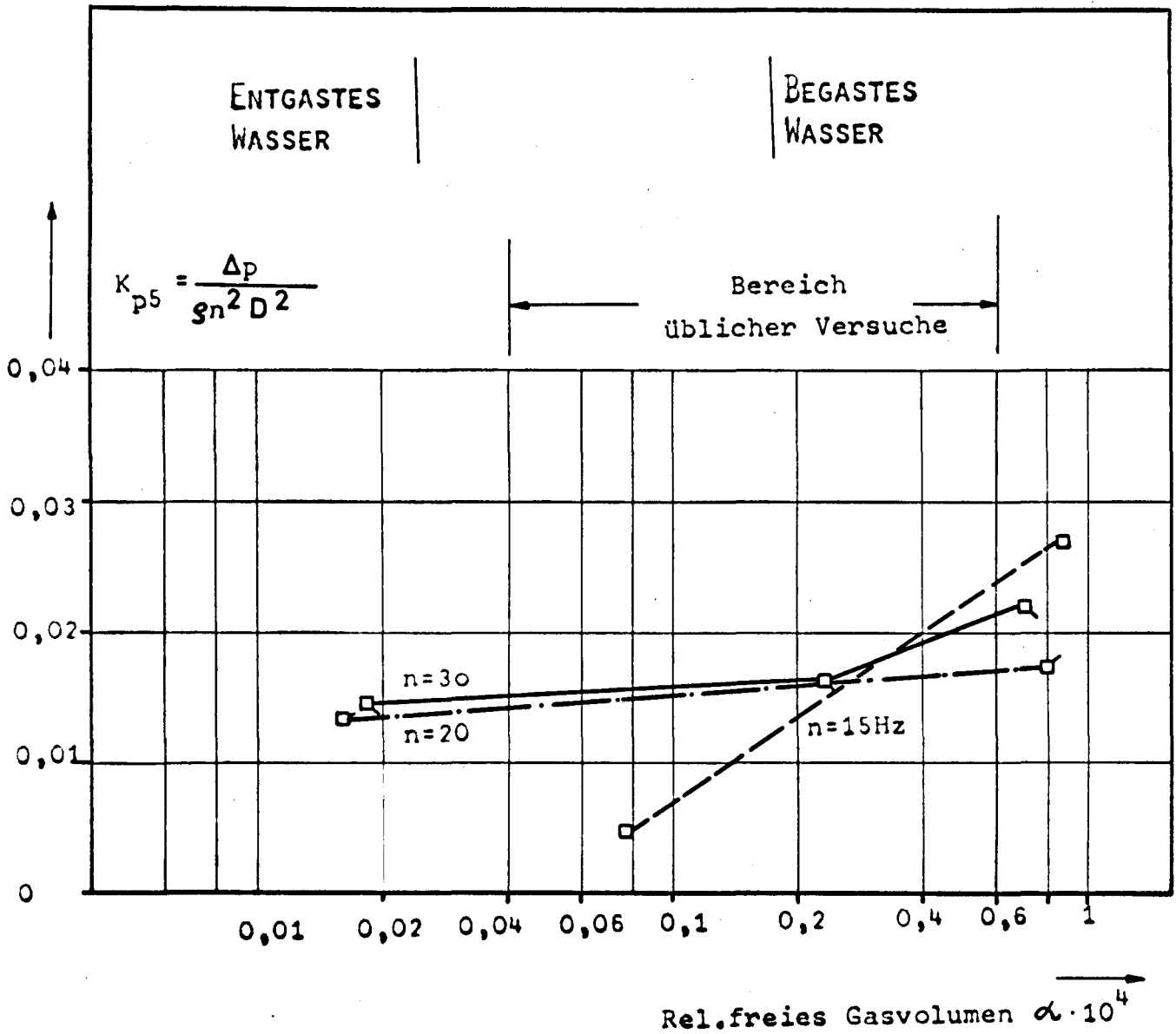


Fortschrittsziffer $J_{KT} = 0,70$
 Kavitationszahl $\sigma_n = 0,185$

---△ n=15Hz
 -.-△ n=20Hz
 —△ n=30Hz

Druckdose Pos.3 direkt über Prop.
 Propeller 1917, Flügelzahl Z=5

DIMENSIONLOSE DRUCKAMPLITUDE K_{p5}
 IN AXIALEM NACHSTROM ABHÄNGIG VOM
 RELATIVEN FREIEN GASVOLUMEN α



Fortschrittsziffer $J_{KT} = 0,70$
 Kavitationszahl $G_n = 0,211$

--- □ n=15 Hz
 - · - ◻ n=20 Hz
 — ◻ n=30 Hz

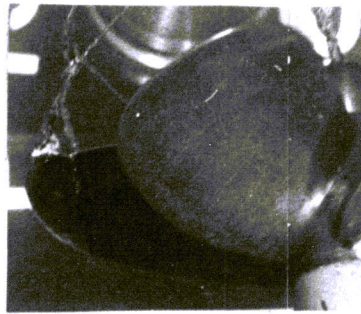
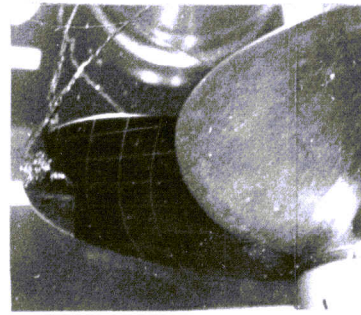
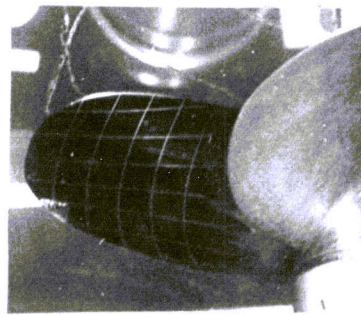
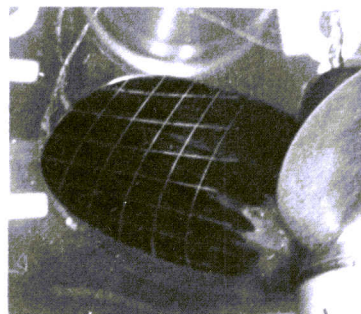
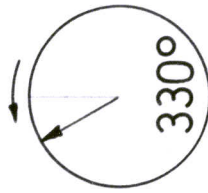
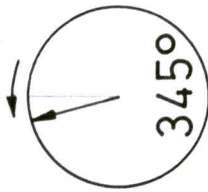
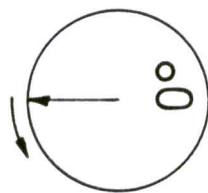
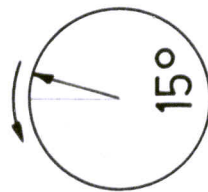
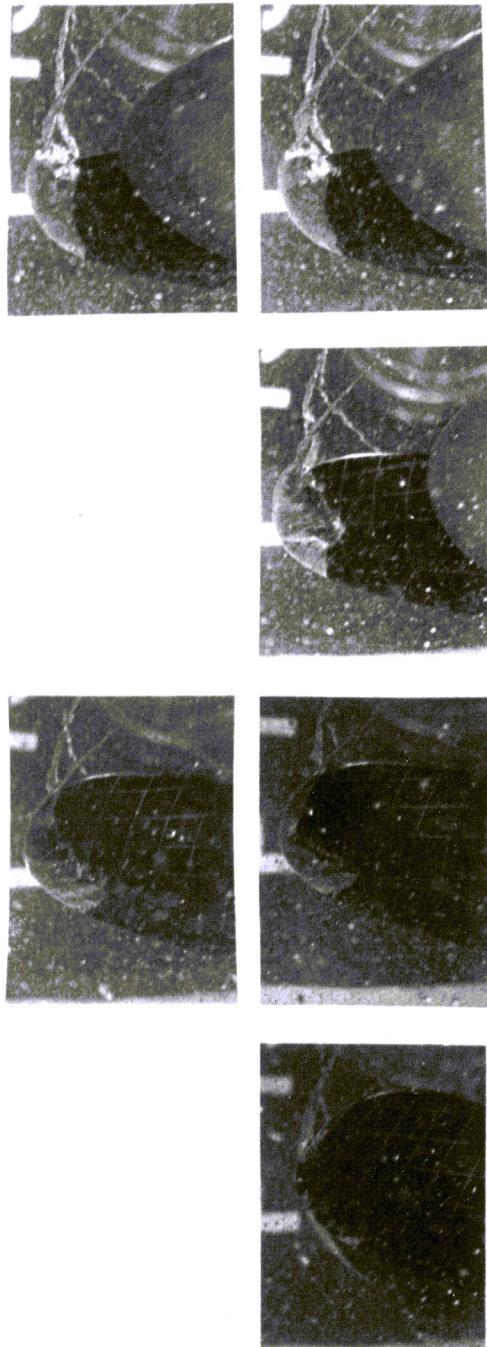
Drucklose Pos.3 direkt über Prop.
 Propeller 1917, Flügelzahl $Z=5$

DIMENSIONLOSE DRUCKAMPLITUDE K_{p5}
 IN AXIALEM NACHSTROM ABHÄNGIG
 VOM RELATIVEN FREIEN GASVOLUMEN α .

TEST 138

$N = 15 \text{ Hz}$

$\alpha = 0,74 \cdot 10^{-4}$



TEST 148

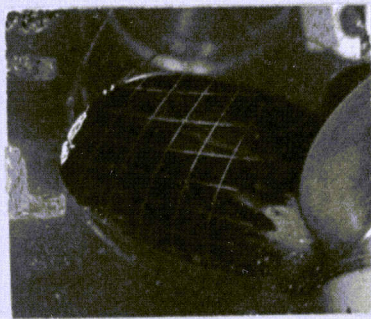
$N = 15 \text{ Hz}$

$\alpha = 0,28 \cdot 10^{-5}$

$J_{KT} = 0,61$

$\sigma_N = 0,185$

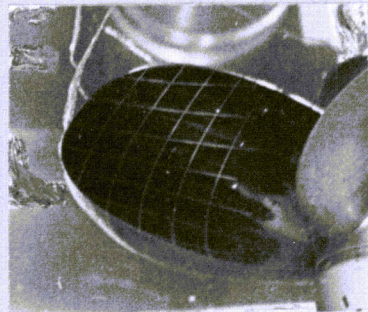
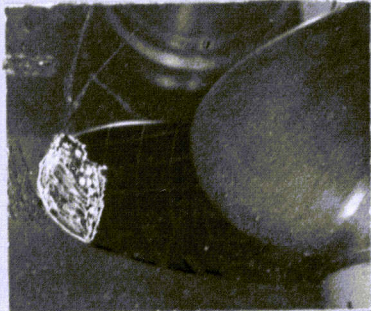
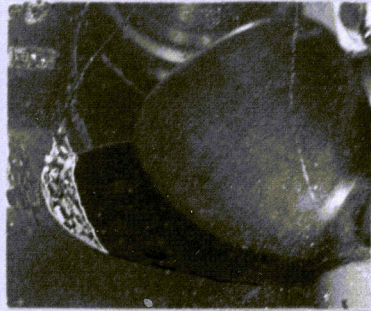
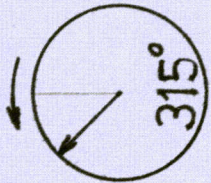
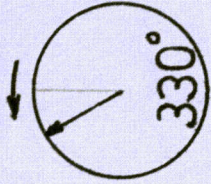
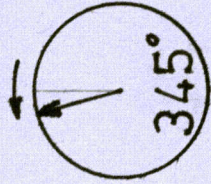
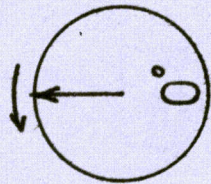
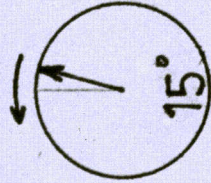
PROPELLER 1917 IM NACHSTROM BEI ZWEI NIEDRIGEN,
RELATIVEN FREIEN GASVOLUMEN α



$n=15$ Hz

$\alpha=0,35 \cdot 10^{-4}$

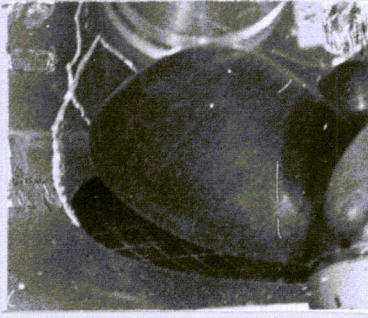
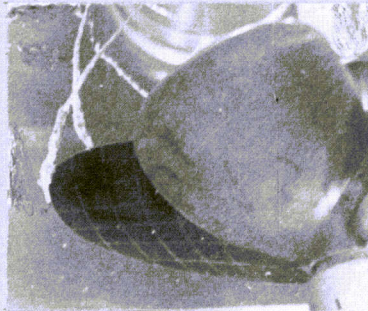
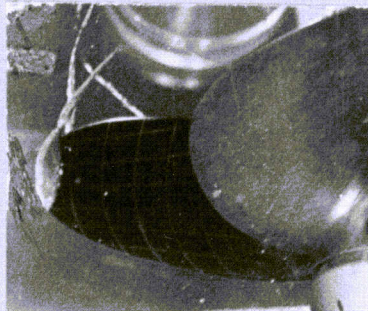
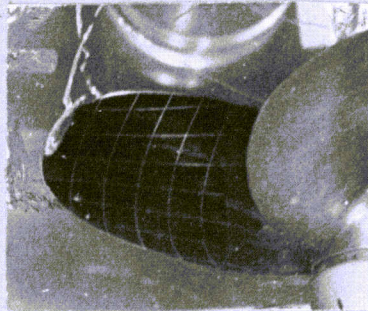
Test 139+140



$n=15$ Hz

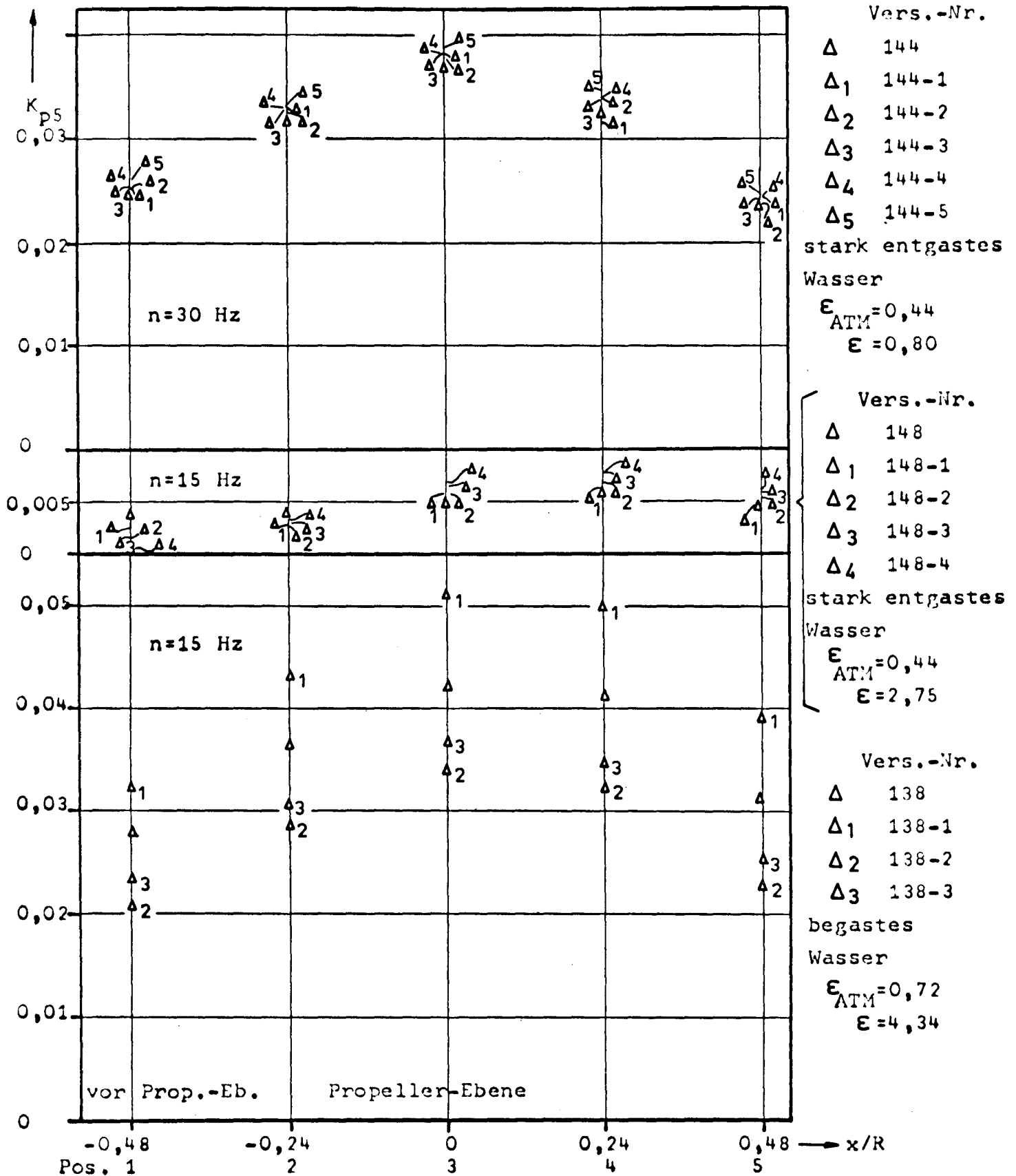
$\alpha=0,25 \cdot 10^{-5}$

Test 150



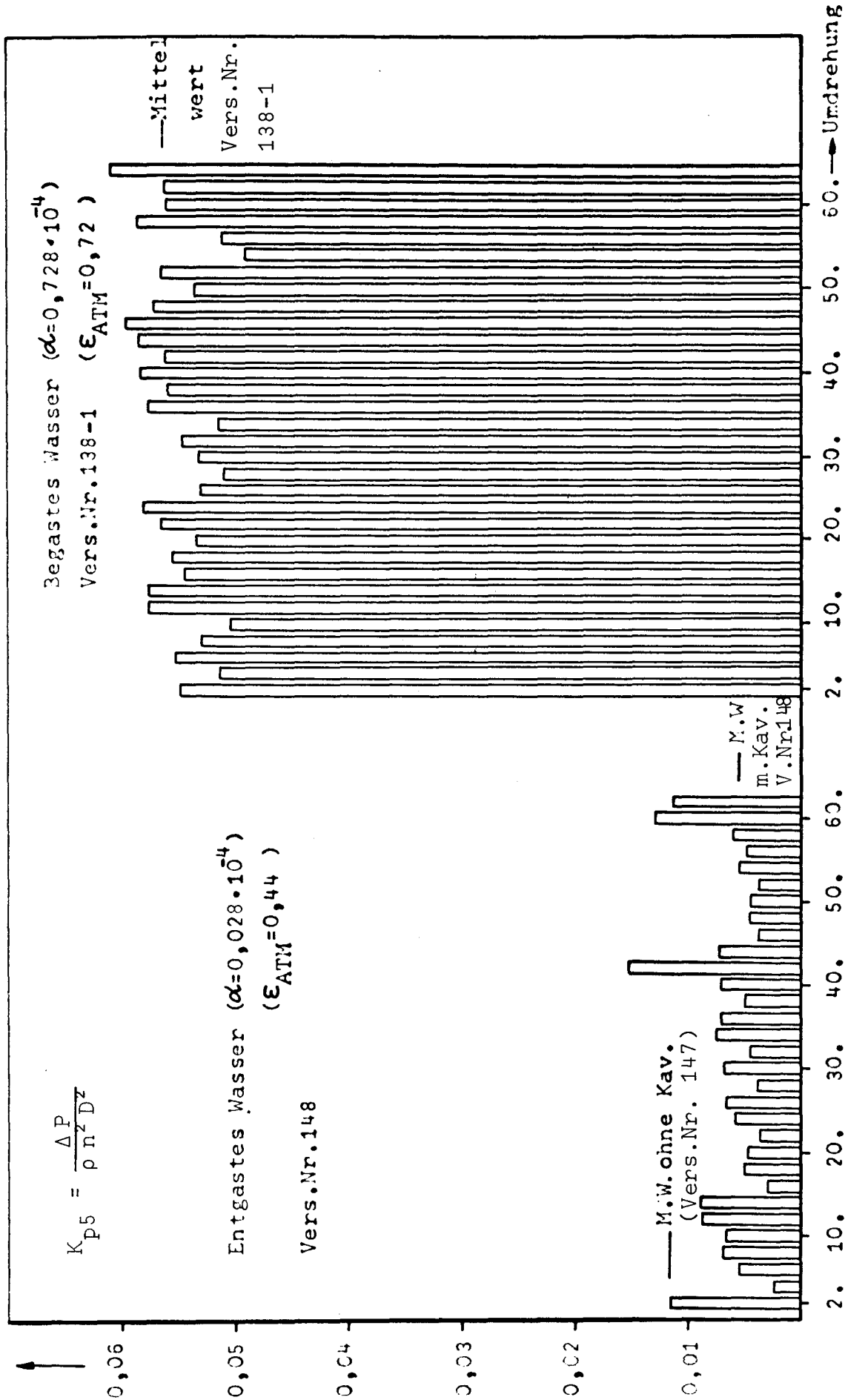
$J_{KT} = 0,61$

$\sigma_n = 0,211$



HSVA-Prop. 1917 im Nachstrom
 Fortschrittsziffer $J_{KT}=0,61$
 Kavitationsziffer $G_n=0,185$

UNTERSUCHUNG DER MESSUNSICHERHEIT DER
 DIMENSIONSLOSEN DRUCKAMPLITUDEN K_{p5} .



HSVA-Prop. 1917 im Nachstrom Drehzahl $n = 15$ Hz Fortschrittsziffer $J_{KT} = 0,61$
 Druckdose P3 (direkt üb. Prop.) Kavitationszahl $\sigma_n = 0,185$
 Auswertung: Jede 2. Umdrehung, d.h. ohne Bestimmung einer gemittelten (gesammelten) Schwingung

DIMENSIONSLOSE DRUCKAMPLITUDEN K_{p5} BEI ZWEI FREIEN GASGEHALTEN

ABB. 22

TEST 144
 $N = 30 \text{ Hz}$
 $\alpha = 0,52 \cdot 10^{-6}$

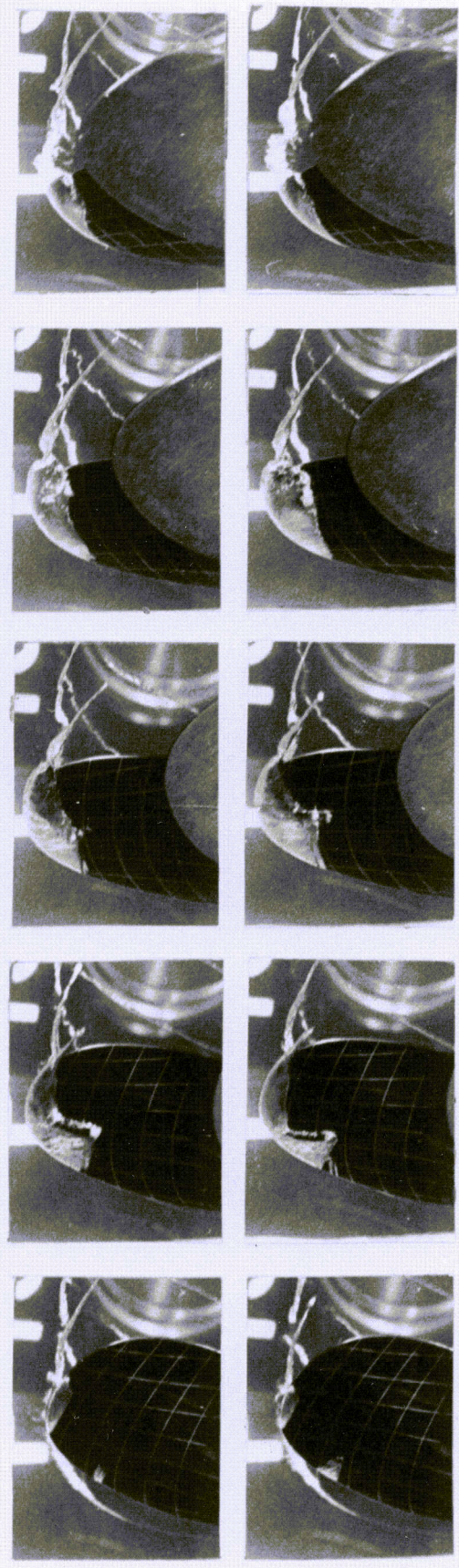
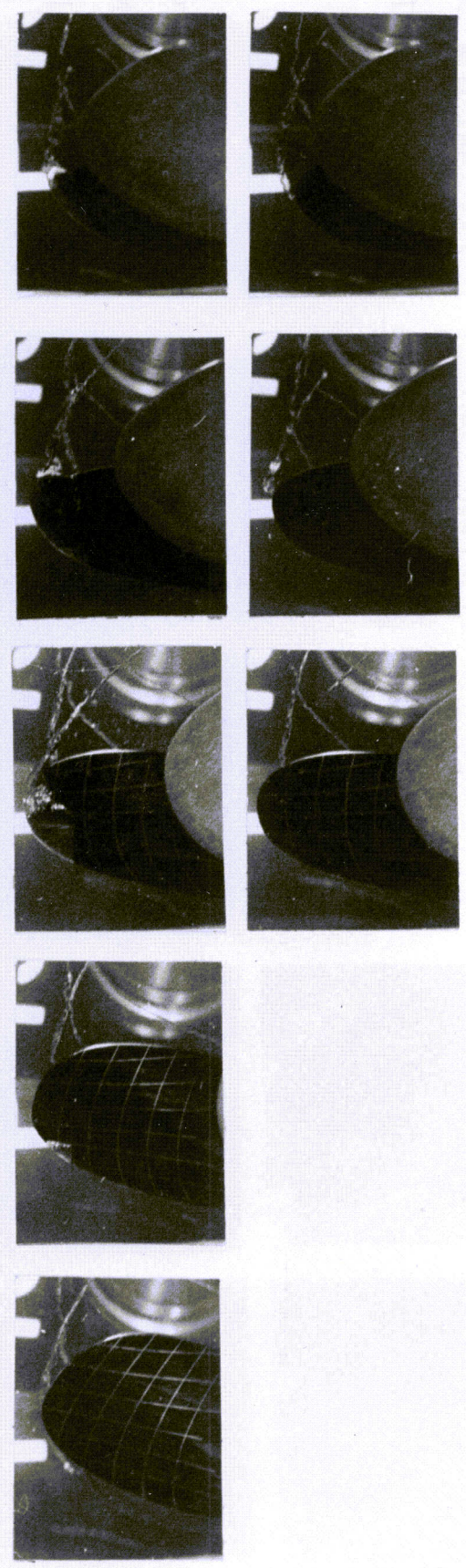


ABB. 23

TEST 148
 $N = 15 \text{ Hz}$
 $\alpha = 0,28 \cdot 10^{-5}$



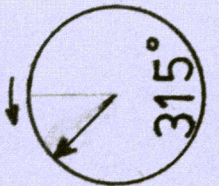
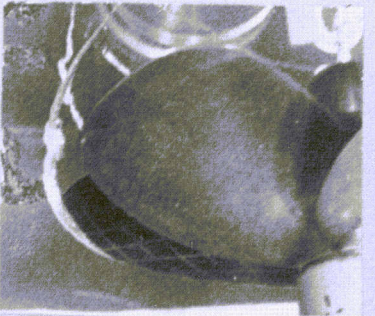
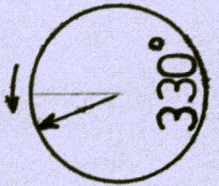
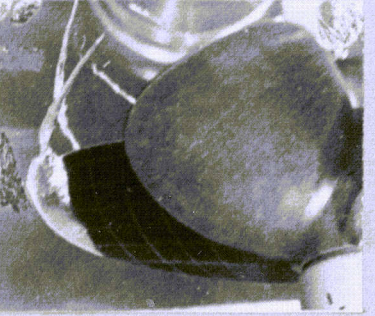
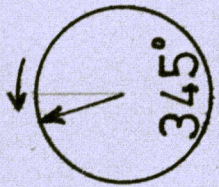
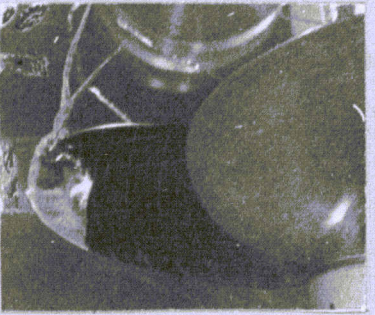
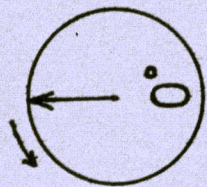
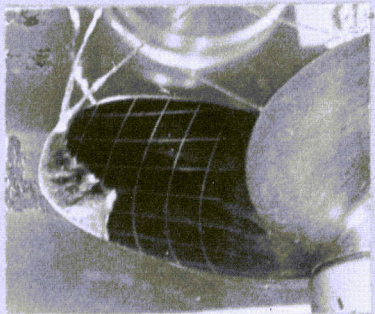
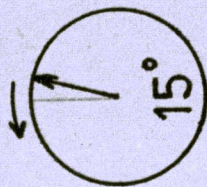
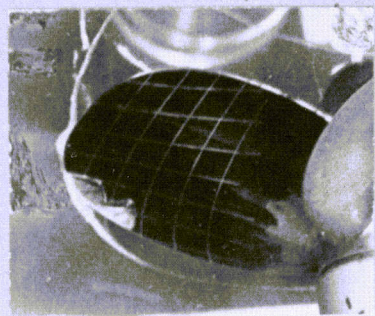
$J_{KT} = 0,61$
 $\sigma_N = 0,185$

PROPELLER 1917 IM NACHSTROM MIT ZWEI DREHZAHLEN
 BEI NIEDRIGEM,RELATIVEN FREIEN GASVOLUMEN α

$n = 30 \text{ Hz}$

$\alpha = 0,12 \cdot 10^{-5}$

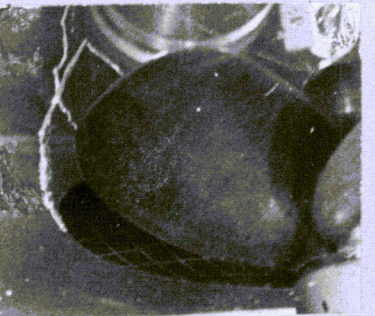
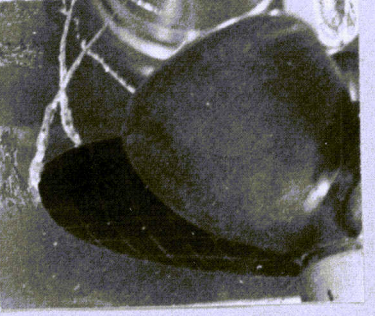
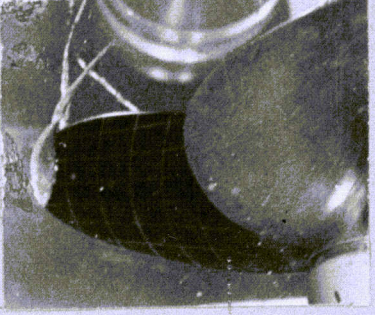
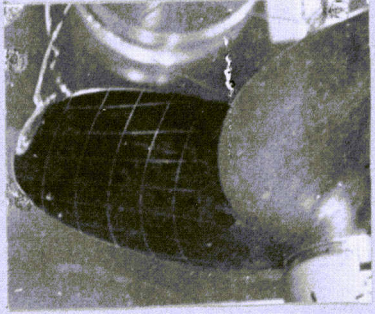
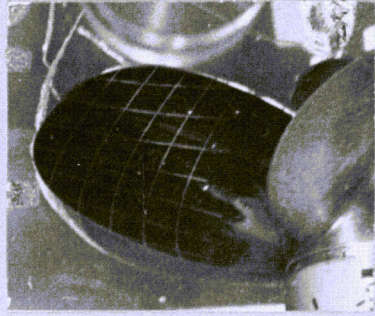
Test 145



$n = 15 \text{ Hz}$

$\alpha = 0,25 \cdot 10^{-5}$

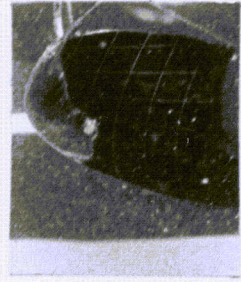
Test 150



PROPELLER 1917 IM NACHSTROM MIT ZWEI DREHZAHLEN
BEI NIEDRIGEM, RELATIVEN FREIEN GASVOLUMEN α

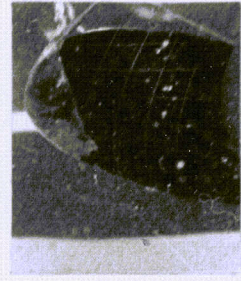
$J_{kf} = 0,61$

$\sigma_n = 0,211$



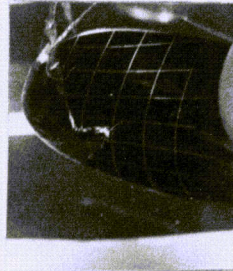
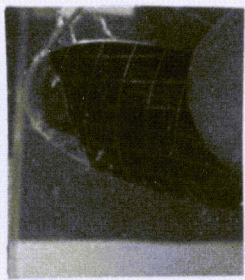
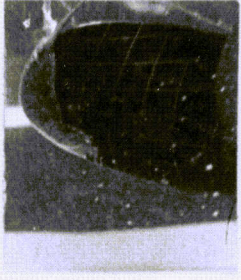
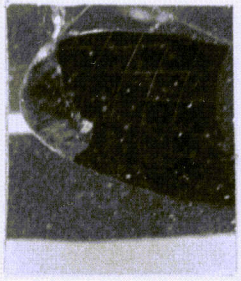
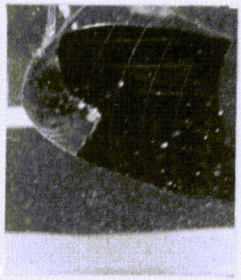
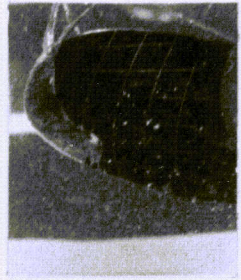
TEST 75

$$\alpha = 0,51 \cdot 10^{-4}$$



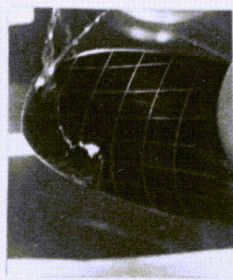
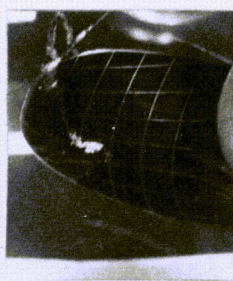
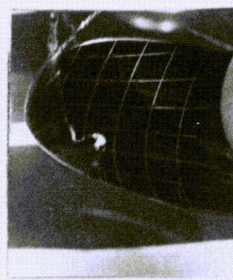
TEST 133

$$\alpha = 0,39 \cdot 10^{-4}$$



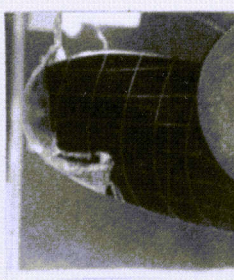
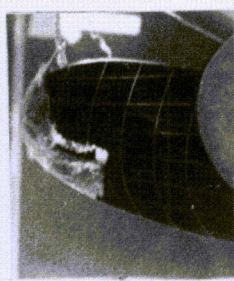
TEST 90

$$\alpha = 0,52 \cdot 10^{-5}$$



TEST 144

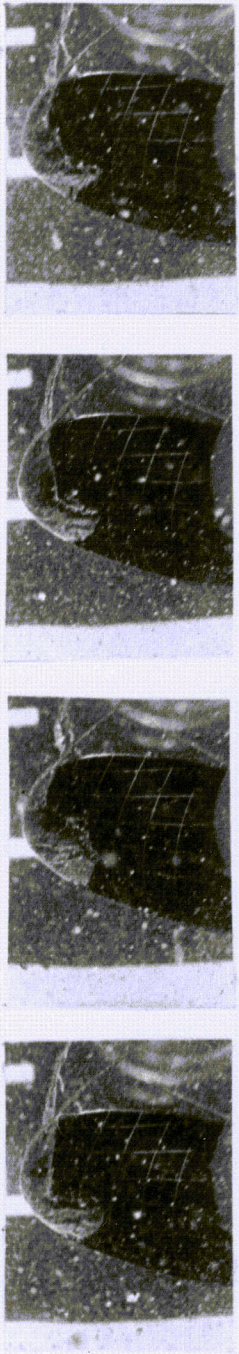
$$\alpha = 0,52 \cdot 10^{-6}$$



$J_{KT} = 0,61$ $N = 30$ Hz (VGL. TAB. 1 U. ABB. 15) STELLUNG 0°

$\sigma_N = 0,185$

PROPELLER 1917 IM NACHSTROM BEI VIER REL. FREIEN GASVOLUMINA
MIT JEWEILS MEHREREN AUFNAHMEN.



TEST 85

$$\alpha = 0,88 \cdot 10^{-4}$$

TEST 138

$$\alpha = 0,73 \cdot 10^{-4}$$

TEST 102

$$\alpha = 0,26 \cdot 10^{-4}$$

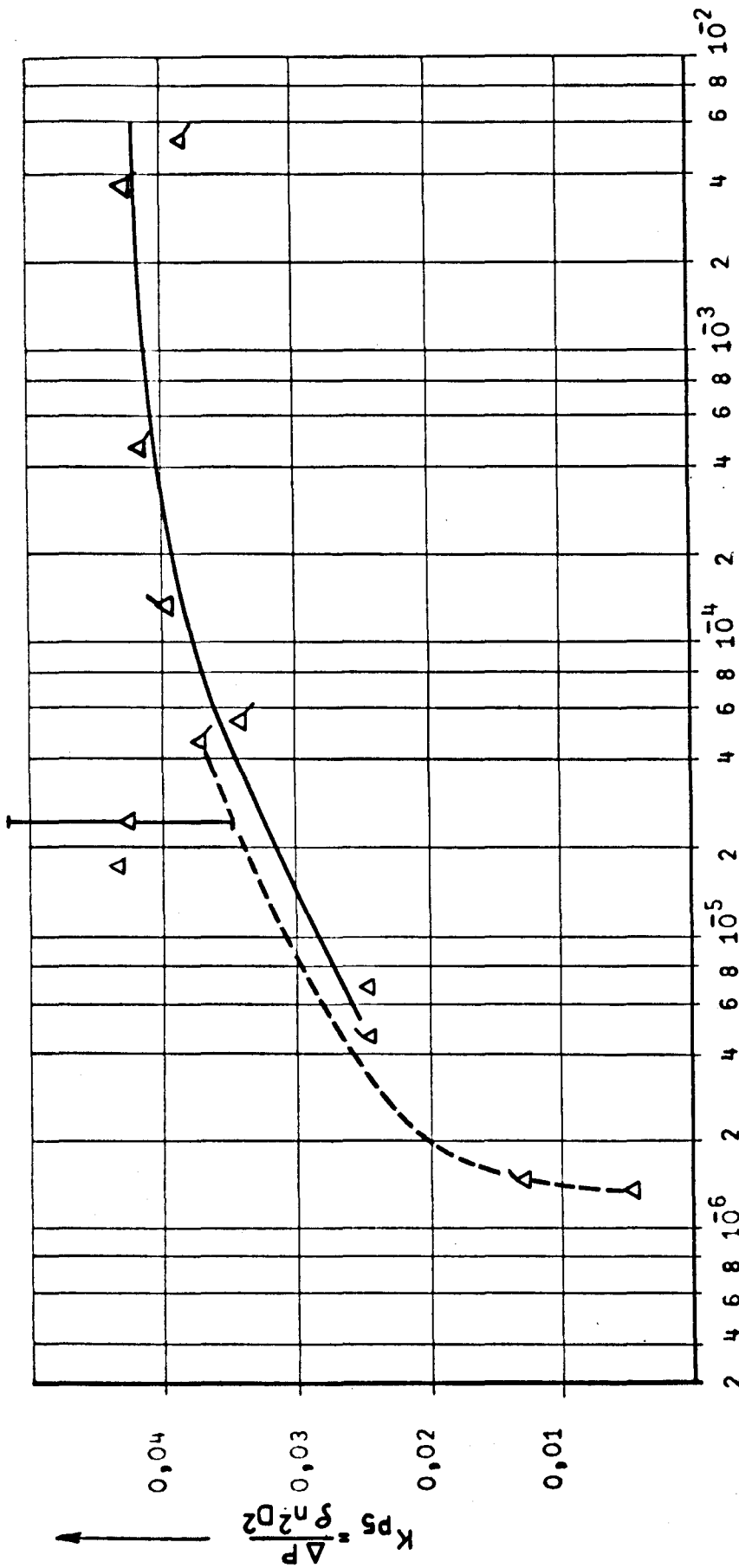
TEST 148

$$\alpha = 0,28 \cdot 10^{-5}$$

(VGL. TAB. 1 U. ABB. 15)

$$J_{KT} = 0,61 \quad \sigma_N = 0,185 \quad n = 15 \text{ Hz} \quad \text{STELLUNG } 0^{\circ}$$

PROPELLER 1917 IM NACHSTROM BEI VIER REL. FREIEN GASVOLUMINA
MIT JEWEILS MEHREREN AUFNAHMEN.



Fortschrittssziffer $J_{KT} = 0,61$

Kavitationszahl $\sigma_n = 0,185$

Druckdose Pos. 3 direkt über Prop.

Propeller 1917, Flügelszahl $Z = 5$

Rel. freies Gasvolumen α_1

— $P_1 = 0,246$ kp/cm² Hahn auf

- - - $P_1 = 0,261$ kp/cm² Hahn zu

Zur Umrechnung benutzte Zustandsänderungsgleichung

$$\text{für lufthaltiges Wasser: } \alpha_1 = \alpha \left(\frac{P}{P_1} \right)^{1+\lambda}$$

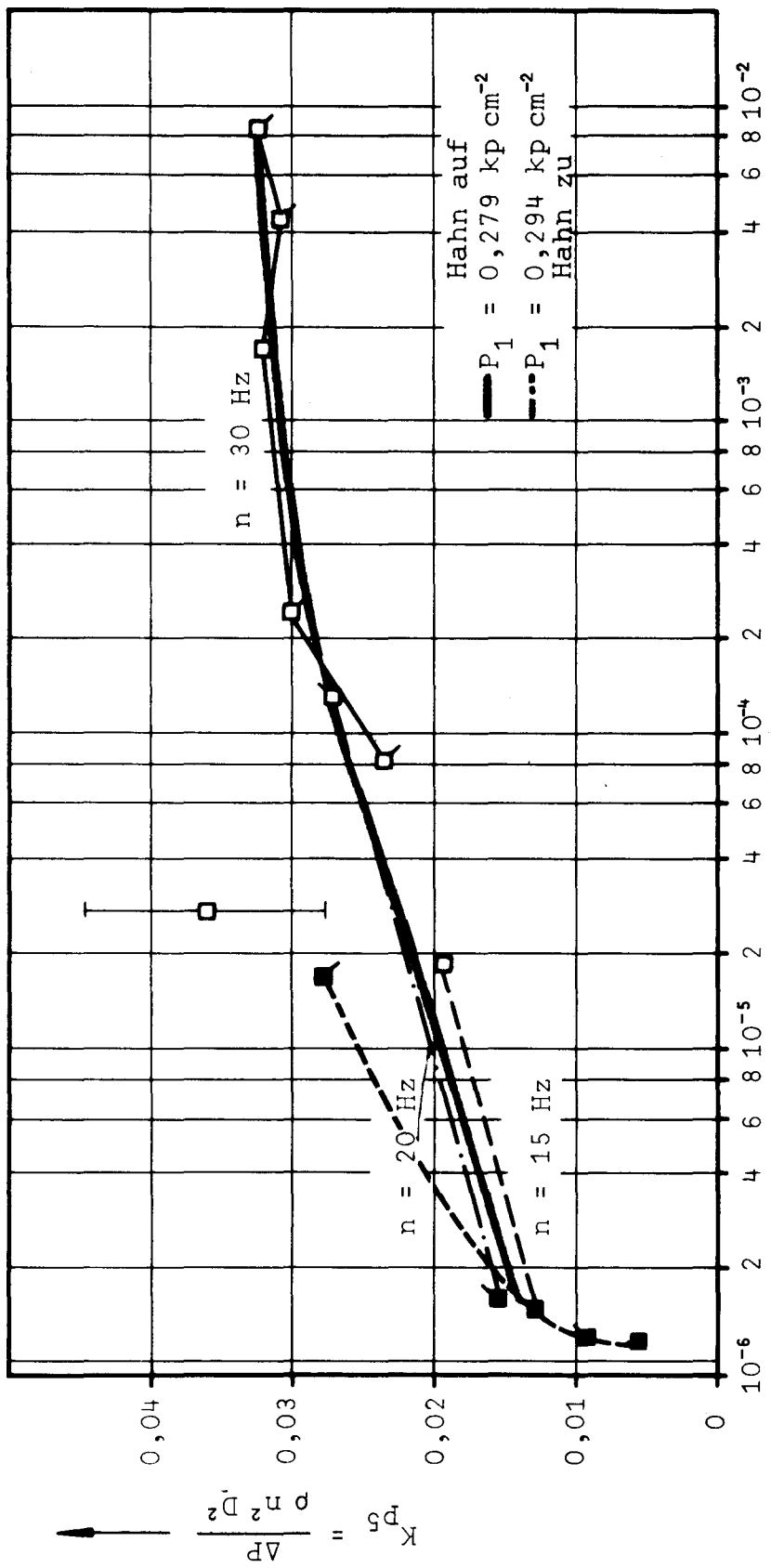
$\Delta n = 15$ Hz

$\Delta n = 20$ Hz

$\Delta n = 30$ Hz

DIMENSIONLOSE DRUCKAMPLITUDE K_{P5} IN AXIALEM NACHSTROM ABHÄNGIG VON GERECHNETEN, RELATIVEN FREIEN GASVOLUMEN α_1 FÜR ZWEI TUNNELZUSTÄNDE

ABB. 27



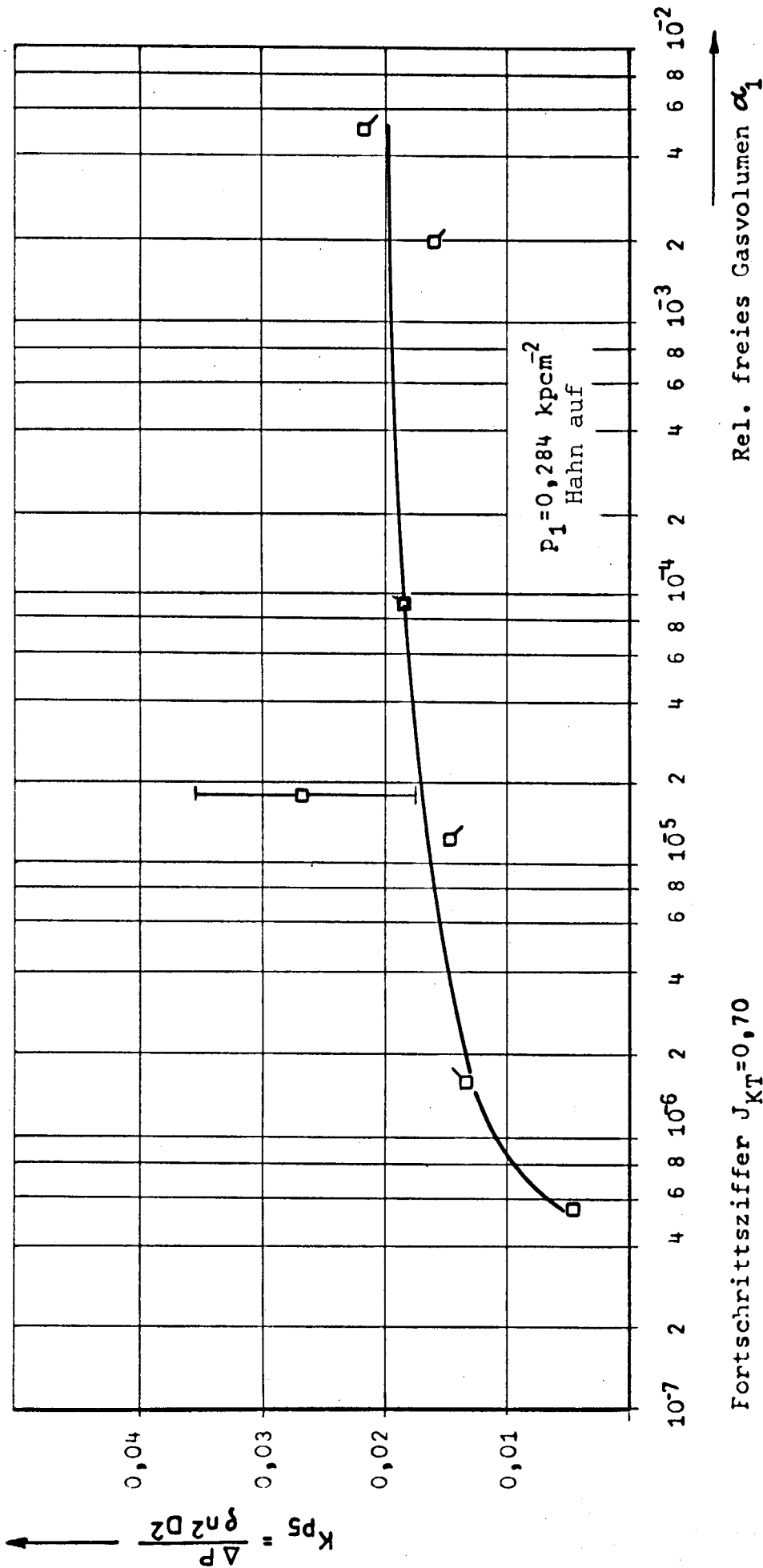
Fortschrittsziffer $J_{KT} = 0,61$
 Kavitationszahl $\sigma_n = 0,211$
 Druckdose Pos. 3 direkt über Prop.
 Propeller 1917, Flügelzahl $Z = 5$

Zur Umrechnung benutzte Zustandsänderungsgleichung
 für lufthaltiges Wasser: $\alpha_1 = \alpha \left(\frac{P}{P_1} \right)^{1+\lambda}$

Rel. freies Gasvolumen α_1

---□ n = 15 Hz
 -.-□ n = 20 Hz
 —□ n = 30 Hz

DIMENSIONLOSE DRUCKAMPLITUDE K_{p5} IN AXIALEM NACHSTROM
 ABHÄNGIG VOM UMGERECHNETEN, RELATIVEN FREIEN GASVOLUMEN α_1
 FÜR ZWEI TUNNELZUSTÄNDE (—□—)



Fortschrittssziffer $J_{KT} = 0,70$

Kavitationszahl $\sigma_n = 0,211$

Druckdose Pos.3 direkt über Prop.

Propeller 1917, Flügelzahl $Z=5$

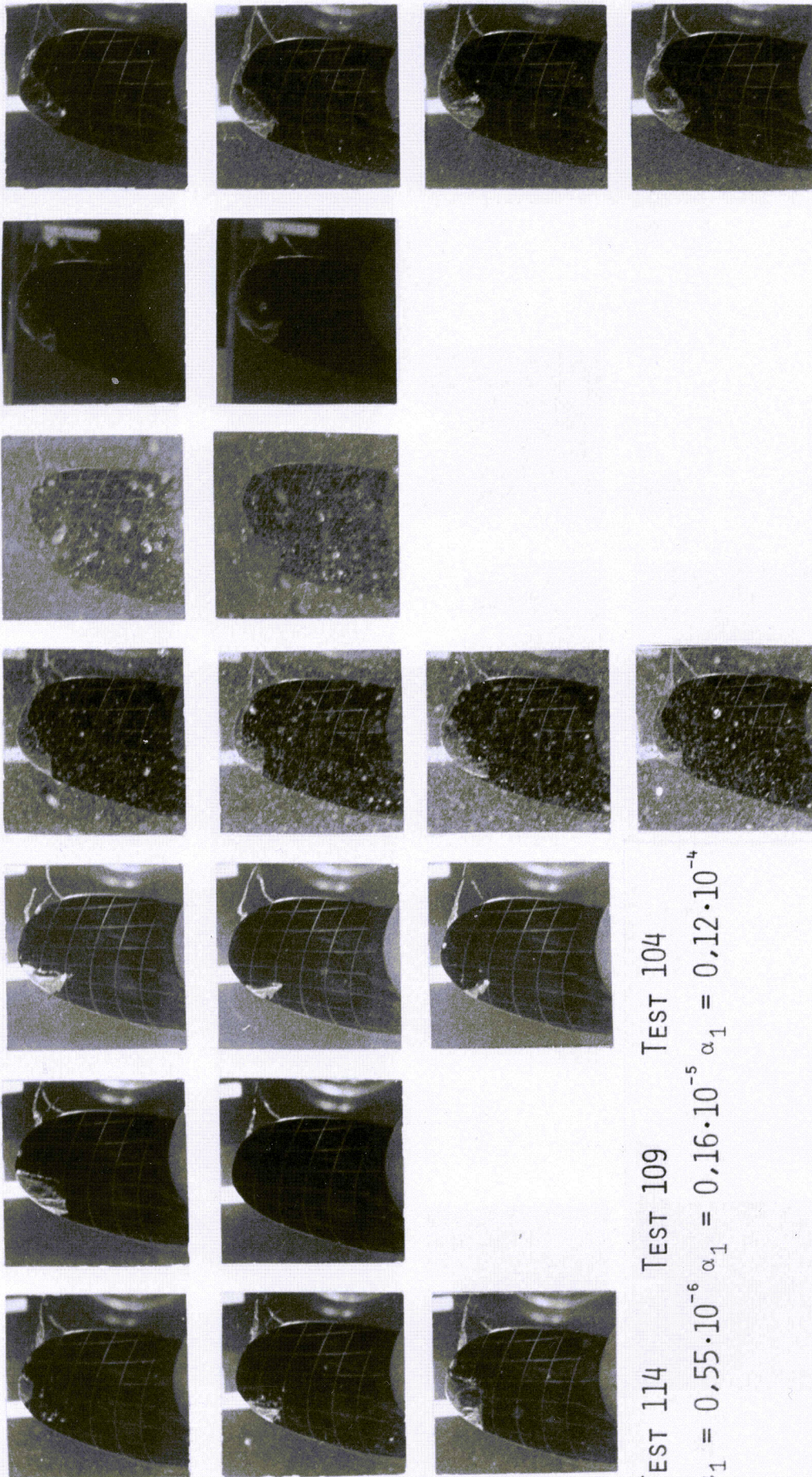
Zur Umrechnung benutzte Zustandsänderungsgleichung

für lufthaltiges Wasser: $\alpha_1 = \alpha \left(\frac{p}{p_1} \right)^{1+\lambda}$

- n = 15 Hz
- n = 20 Hz
- △ n = 30 Hz

ABB. 29

DIMENSIONLOSE DRUCKAMPLITUDE K_{p5} IN AXIALEM NACHSTROM
ABHÄNGIG VOM UMGERECHNETEN, RELATIVEN GASVOLUMEN α_1



TEST 114

TEST 109

TEST 104

$$\alpha_1 = 0,55 \cdot 10^{-6} \quad \alpha_1 = 0,16 \cdot 10^{-5} \quad \alpha_1 = 0,12 \cdot 10^{-4}$$

$$J_{KT} = 0,70$$

STELLUNG 0^0

$$\sigma_N = 0,211$$

(VGL. TAB. 3)
(U. ABB. 29)

TEST 129

TEST 124

TEST 137

TEST 119

$$\alpha_1 = 0,18 \cdot 10^{-4} \quad \alpha_1 = 0,94 \cdot 10^{-4} \quad \alpha_1 = 0,19 \cdot 10^{-2} \quad \alpha_1 = 0,54 \cdot 10^{-2}$$

ABB. 30

PROPELLER 1917 IM NACHSTROM BEI 7 VERSCHIEDENEN RELATIVEN FREIEN
GASGEHALTEN MIT JEWEILS BIS ZU 4 VERSCHIEDENEN AUFNAHMEN