

388 | November 1979

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

O. Grim

II. Georg-Weinblum-Gedächtnis- Vorlesung

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

II. Georg-Weinblum-Gedächtnis-Vorlesung

O. Grim

Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1979

© Technische Universität Hamburg-Harburg

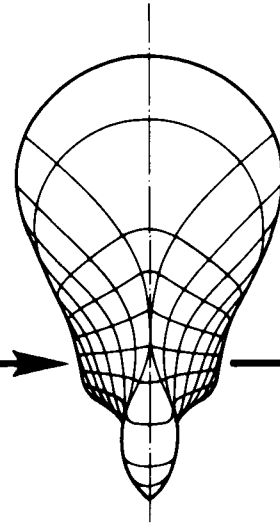
Schriftenreihe Schiffbau

Schwarzenbergstraße 95c

D-21073 Hamburg

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

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU
DER UNIVERSITÄT HAMBURG



II. Georg – Weinblum – Gedächtnis – Vorlesung

gehalten von

O. Grim, Hamburg

November 1979

Bericht Nr. 388

Zweite Georg-Weinblum-Gedächtnis-Vorlesung

am 21. November 1979

Ich hatte das Glück und die Freude, viele Jahre in der Nähe von Georg Weinblum weilen, mit ihm arbeiten, mich mit ihm beraten zu können. Mir wurde nach seiner Emeritierung übertragen, den Lehrstuhl, den er bis dahin innehatte, zu übernehmen. Ich traf Georg Weinblum das erste Mal 1938, das zweite Mal und von da ab regelmäßig 1952 nach seiner Rückkehr aus den Vereinigten Staaten von Amerika. Er ermutigte mich, zu promovieren und wissenschaftlich zu arbeiten. Hierin äußerte sich ein Anliegen, das ihm in besonderem Maße am Herzen lag; jüngere Leute zu fördern, sie der Wissenschaft zuzuführen und sie für die Wissenschaft zu begeistern. Das haben viele, die sich nun gern und dankbar erinnern, erfahren.

Trotz alledem habe ich die Einladung, diese Gedächtnis-Vorlesung zu halten, nur zögernd angenommen; ich hätte gern einem Jüngeren, der in der Zukunft mehr für den Schiffbau, für die Wissenschaft bewirken kann, den Vortritt gelassen. Da die Aufgabe mir geblieben ist, will ich sie gern erfüllen und versuchen, den Weinblumschen Intentionen gerecht zu werden.

Nach dem Willen der Stifter soll in der Gedächtnis-Vorlesung ein Thema behandelt werden, das dem Fach angehört, das der weiteren Entwicklung des Faches dienen kann. Als Thema habe ich

Propeller und Leitrad

gewählt, das ich erstmals 1966 vor der Schiffbautechnischen Gesellschaft der Öffentlichkeit vorgestellt hatte. Ich benutze die Gelegenheit, die mir geboten wird, dieses Thema erneut und in einem anderen Umfange zu behandeln. Es läßt mich nicht los, zumal ich meine, daß es angesichts der Notwendigkeiten, Energie zu sparen und nach Innovationen auszuschauen, aktuell ist und daß die dem Thema zugrunde liegende Idee vermutlich ohne Schwierigkeiten realisiert werden könnte. Vielleicht kann ich durch diesen Vortrag das Interesse für die Idee und für ihre Realisierung wecken.

Zunächst will ich kurz einiges wiederholen, das schon vorge-
tragen wurde. Zunächst den Gegenstand selbst:

Fig. 1 zeigt Propeller und Leitrad. Die Idee besteht darin,
hinter dem Propeller ein Leitrad anzuordnen, dessen Durchmesser
größer ist als der des Propellers, das nicht mechanisch ange-
trieben sondern frei rotierend gelagert ist und dessen Aufgabe
es ist, dem Propellerstrahl Leistung, die sonst verloren geht,
zu entnehmen und in zusätzliche Schubleistung umzusetzen. Das
Rad, für das ich keinen besseren Namen als Leitrad habe, ist
daher innen als Turbine, außen als Propeller ausgelegt.

Fig. 2 zeigt Modelleiträder mit 3,6,9 und 12 Flügeln, die bei
Modellversuchen in der HSVA verwendet wurden.

Fig. 3 zeigt ein Rechenergebnis, das eine erste Auskunft über
den Einfluß von Dreh- und Flügelzahl des Leitrades auf die
angestrebte Wirkungsgradverbesserung gibt. Sie zeigt, daß die
Steigung des Leitrades so groß gewählt werden muß, daß dieses -
angetrieben durch den Propellerstrahl - langsamer rotiert als
der davor arbeitende Propeller, sowie, daß es ratsam ist, eine
große Flügelzahl zu wählen.

Fig. 4 zeigt eine Anordnung, die auf einer Barkasse der
Howaldtswerke-Deutsche Werft AG realisiert wurde für einen
Versuch, der vom Forschungszentrum des Deutschen Schiffbaus
gefördert wurde. Bemerkenswert ist, daß in diesem Fall nur die
Propellerwelle verlängert werden mußte, um einen Zapfen für die
Lagerung des Leitrades unterzubringen und daß sonst keine weitere
schiff- oder maschinenbauliche Änderung notwendig war.
Insbesondere wurde auch kein neuer Propeller für diesen Versuch
gefertigt.

Fig. 5 zeigt ein Ergebnis dieses Versuches. Sie zeigt über der
Drehzahl aufgetragen die Leistung und den Schub des Antriebs-
organs einmal ohne und einmal mit Leitrad. Sie zeigt insbesondere,
daß bei gleicher Antriebsleistung der Schub 10 bis 13 % vergrößert
wurde.

Fig. 6 zeigt ein Rechenergebnis, das für ein bestimmtes Schiff
angefertigt wurde. Sie zeigt zunächst für den konventionellen

Propeller die bekannte Abhängigkeit des Wirkungsgrades von Propellerdrehzahl und -durchmesser, insbesondere wie durch die Wahl einer extrem niedrigen Drehzahl und eines großen Durchmessers ein guter Wirkungsgrad erzielt werden kann. Des weiteren zeigt die Figur eine analoge Kurvenschar für das Antriebsorgan P+LR. Bemerkenswert an dieser Darstellung ist, daß erstens die Einhüllenden für den Propeller und für P+LR, die als Orte der jeweils optimalen Auslegung gelten können, verschieden liegen und daher verschiedene Eigenschaften der beiden Antriebsorgane signalisieren, sowie daß zweitens die Einhüllende für P+LR mit wachsender Drehzahl langsamer abfällt als die Einhüllende für den Propeller allein.

Damit sind die Wiederholungen beendet. In dem folgenden Vortrag soll das Thema möglichst transparent dargestellt, sollen neu erarbeitete Erkenntnisse mitgeteilt und sollen die Ergebnisse plausibel gemacht werden. Einerseits sollen die Überlegungen und Berechnungen so dargestellt werden, daß sie von Interessierten leicht nachvollzogen werden können, andererseits sollen Gedankengänge zu Ende geführt werden, so z.B. wie das Organ P+LR optimal ausgelegt werden kann.

Um das einigermaßen ermöglichen zu können, noch dazu in einem zeitlich begrenzten Rahmen, werden Vereinfachungen vorausgesetzt, jeweils

- a) ein freifahrendes Antriebsorgan in homogener Zuströmung,
- b) eine rotationssymmetrische Strömung; in der Propellertheorie bedeutet das ein Organ mit unendlich vielen Flügeln,
- c) eine Anordnung des Leitrades in dem voll entwickelten Propellerstrahl und daher keine hydrodynamische Rückwirkung des Leitrades auf den Propeller,
- d) eine Berücksichtigung der Zähigkeitseffekte durch die Benutzung von passend gewählten Gleitzahlen.

Punkt b) hat zur Folge, daß Impuls- und Energiesätze für die theoretische Bearbeitung ausreichen, daß nicht die Wirbeltheorie benutzt werden muß.

Da verschiedene Systeme gegenübergestellt, vor allem die Qualitäten von P+LR gegenüber den Qualitäten des konventionellen Propellers erkannt werden sollen, wird mit dem konventionellen Propeller begonnen, obwohl hierzu nichts Neues gesagt werden soll und kann.

Das bekannte Kramer-Diagramm - Fig.7 - zeigt für den freifahrenden Propeller die Gesetzmäßigkeit, die zwischen Fortschrittsgrad λ , Schubbelastungsgrad CT und induziertem Wirkungsgrad η_i besteht. Dieses Diagramm gilt sogar für beliebige Flügelzahlen; der Einfluß der Flügelzahl erscheint als Verschiebung des Einganges: Fortschrittsgrad. (In Fig. 7 nicht eingetragen.) Dieser Einfluß darf hier als "klein" angesehen werden, und dies kann als Hinweis dafür gelten, daß die oben eingeführte Vereinfachung, nach der eine rotationssymmetrische Strömung bzw. eine unendliche Flügelzahl vorausgesetzt wird, brauchbar ist, zumal es nicht das Ziel dieses Vortrages ist, neue Entwurfsunterlagen zu schaffen, neue Erkenntnisse für den konventionellen Propeller zu erarbeiten oder gar bekannte Entwurfsunterlagen zu ersetzen. Durch die kurze Behandlung des konventionellen Propellers soll hier nur eine Basis für Gegenüberstellungen geschaffen werden.

Das Kramer-Diagramm ist nur als Zwischenergebnis brauchbar; es ermöglicht nicht unmittelbar die Auswahl oder Beurteilung eines Propellers in realer Flüssigkeit. Das wird deutlich, wenn man versuchen möchte, anhand dieses Diagramms für einen Anwendungsfall den optimalen Propeller auszuwählen.

In dem Diagramm sind nämlich keine Zähigkeitsverluste, sondern nur Verluste, die in Form von kinetischer Energie als Austrittsverluste im Propellerstrahl abtransportiert werden, berücksichtigt. Die Zähigkeitsverluste werden nun mittels des bekannten Konzeptes der Gleitzahl eingeführt. Wie es häufig in der Propellertheorie geschieht, wird die Gleitzahl an einem Flügelschnitt mittels der Formel

$$\epsilon_p = \frac{0.008}{C_L}$$

abgeschätzt. (C_r = Auftriebsbeiwert)

Der Auftriebsbeiwert C_L und damit die Sehnenlänge des Flügelschnitts ist maßgebend bestimmt durch die Kavitationsgefahr. Der Auftriebsbeiwert und damit die Gleitzahl werden in Anlehnung an das Diagramm von Burrill, das allen Propellerexperten bekannt ist, abgeschätzt zu

$$C_L = 0.2 \cdot \sigma^{0.55}$$

(σ = Kavitationszahl des Flügelschnittes).

Die Gleitzahl beträgt damit

$$\xi_p = \frac{0.008}{0.2 \cdot \sigma^{0.55}}$$

und für eine Geschwindigkeit $V = 8$ m/sec, z.B. etwa

$$\xi_p = 0.016 \cdot \left(1 + \left(\frac{r \omega_p}{V} \right)^2 \right)^{0.55}$$

Diese Gleitzahl, die für äußere Flügelschnitte also höher als für innere gewählt ist, wird in dieser Arbeit für den Propeller eingesetzt, für das Leitrad wird sie etwas höher - etwas ungünstiger - gewählt

$$\xi_L = 0.020 \cdot \left(1 + \left(\frac{r \omega_L}{V} \right)^2 \right)^{0.55}$$

Die Tabelle 1 zeigt, wie groß nach dieser Abschätzung Gleitzahl und Auftriebsbeiwert für verschiedene Radien sind. Diese Abschätzung dürfte realistisch sein.

Tabelle 1: Auftriebsbeiwerte und Gleitzahlen für einen Propeller mit einem Fortschrittsgrad $\lambda = 0.20$ und für eine Geschwindigkeit von 8 m/sec

r/R	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
C_L	0.342	0.273	0.233	0.206	0.187
ξ_p	0.023	0.029	0.034	0.039	0.043

Diese Abschätzung soll ermöglichen, verschiedene Antriebsorgane gleicher Gefährdung durch Kavitation gegenüberzustellen. Die Flügelfläche eines Rades erscheint nicht explizit in diesem Vortrag; implizit ist sie natürlich enthalten. Anstelle der Flügelfläche erscheint die Geschwindigkeit V als Parameter; sie ist durchgehend mit 8 m/sec eingesetzt. Es wird hier daran erinnert, daß keine Entwurfsunterlagen erarbeitet, sondern nur Gegenüberstellungen verschiedener Antriebsorgane erarbeitet werden sollen. Für wichtig wird gehalten, daß die Gleitzahl abhängig von der Kavitationszahl und dadurch für kleinere Umfangsgeschwindigkeiten kleiner als für größere Geschwindigkeiten gewählt wird.

Damit sind alle Voraussetzungen für die Bestimmung des Wirkungsgrades des Propellers in realer Flüssigkeit gegeben. Eine Auftragung analog dem Kramer-Diagramm wird beibehalten - Fig.8 -, nur steht an den Kurven nun nicht mehr der induzierte, sondern der reale Wirkungsgrad.

Die Kurven sind von praktischer Bedeutung nur in einem kleinen Bereich: von dem Punkt, an dem eine Gerade mit der Steigung zwei tangiert bis zu dem Maximum der Kurve, dem Punkt, an dem eine Gerade mit der Steigung Null tangiert. Bei gegebenen Werten Schub und Geschwindigkeit stellt eine Gerade mit der Steigung zwei bei gegebenem Schub und gegebener Geschwindigkeit Orte gleicher Drehzahl, aber verschiedener Durchmesser, eine Horizontale mit der Steigung Null Orte gleichen Durchmessers, aber verschiedener Drehzahlen dar. Das Diagramm gibt daher unmittelbar Antworten auf Fragen nach der optimalen Drehzahl bei gegebenem Durchmesser oder nach dem optimalen Durchmesser bei gegebener Drehzahl, nämlich durch Bestimmung der Berührungspunkte einer Horizontalen oder einer Geraden mit der Steigung zwei mit der Kurvenschar.

Natürlich stellt das Diagramm den gleichen Sachverhalt dar wie die bekannten Darstellungen, wie die Seriendiagramme. Es ist jedoch für das Anliegen dieses Vortrages geeigneter.

In den 30er Jahren wurden mit damals großem Erfolg feste Leitapparate vor oder hinter Schiffspropellern angeordnet, mit dem Ziel, die Drallenergie des Propellerstrahls für den Vortrieb zu nutzen. Nach dem Kriege wurde das nicht mehr gemacht; es blieb aber unbeantwortet, warum der feste Leitapparat damals so viel gebracht haben soll, später aber nicht mehr angewandt wurde. Es paßt in das Thema dieses Vortrages, das Organ Propeller und fester Leitapparat (P+LA) mit zu behandeln, wobei es beschränkt bleiben soll auf den Leitapparat hinter dem Propeller.

Eine Berechnung unter der Voraussetzung der oben erwähnten Vereinfachungen und mit den eingeführten Gleitzahlen liefert das Diagramm Fig. 9; eine überraschend hohe Veränderung gegenüber der Fig. 8, dem analogen Diagramm für den konventionellen Propeller.

Diese Ergebnisse, die Qualitäten des Systems P+LA, werden später besprochen werden. Zuvor wird in die Besprechung des eigentlichen Gegenstandes des Vortrages - P+LR - eingetreten.

Die Fig. 10 zeigt vorläufige Ergebnisse für den Wirkungsgrad 0,70, und zwar eine Kurve für den Propeller allein und weitere Kurven für P+LR, und zwar für verschiedene Durchmesser-Verhältnisse $DD = DL/DP$ 1.2, 1.3, 1.4, 1.5. Es ist leicht zu begreifen, daß mit P+LR größere Schubbelastungsgrade erzielt werden, denn insgesamt wird ja einer größeren Wassermasse der zur Schuberzeugung notwendige Impuls erteilt. Natürlich muß für den größeren Schub des Organs P+LR dem Propeller dieses Organs eine größere Leistung zugeführt werden, und das heißt, daß mit wachsendem Durchmesser-Verhältnis der angetriebene Propeller eine wachsende Flügelfläche (breitere Flügel) bekommen muß. Das führt zu einer Grenze, die durch die Unterbringbarkeit der Propellerflügelfläche gesetzt ist.

Trotzdem ist es nicht vordringlich, diese Grenze zu bestimmen, wie sich gleich zeigen wird. Eine Darstellung der Ergebnisse wie nach Fig. 10 erlaubt eine Bewertung nicht ohne weiteres. Geeigneter für eine Bewertung ist eine Darstellung, die sich von

der in Fig. 10 nur dadurch unterscheidet, daß als Bezugsdurchmesser für den Schubbelastungs- und Fortschrittsgrad nicht der Durchmesser des angetriebenen Propellers wie in Fig. 10 sondern der Leitraddurchmesser - der größte Durchmesser des Organs - benutzt wird. Die Kurven der Fig. 10 werden dann schräg nach unten verschoben, und zwar um so mehr, je größer das Durchmessererverhältnis ist - Fig. 11. Die Kurven liegen dann eng zusammen, ja sie bilden sogar eine Einhüllende. Das bedeutet, daß es für einen gegebenen Außendurchmesser eines Organs ein optimales Durchmessererverhältnis gibt, daß es oft nicht notwendig und nicht einmal optimal ist, bis zu der oben erwähnten, durch die Unterbringbarkeit der Propellerfläche gezogenen Grenze zu gehen, außer, man wählt eine extrem große Drehzahl, für die eben ein extrem großes Durchmessererverhältnis optimal ist. Man kann auf der Einhüllenden Punkte mit Angaben des Durchmessererverhältnisses markieren, - die Berührungspunkte der einzelnen Kurven mit der Einhüllenden. Die Einhüllende stellt die Orte der optimalen Lösungen dar. Im folgenden werden nur diese Einhüllenden angegeben, sie werden aber am linken Ende - in Richtung abnehmender Fortschrittsgrade bzw. zunehmender Drehzahlen - willkürlich abgebrochen bei dem Durchmessererverhältnis 1.4.

Die Erkenntnis, daß die Kurven für verschiedene Durchmessererverhältnisse in Fig. 11 eine Einhüllende bilden, daß es zu jedem Betriebspunkt ein optimales Durchmessererverhältnis gibt - vorausgesetzt, Außendurchmesser und Drehzahl liegen fest -, führt zu der Diskussion der Optimierung der Antriebsorgane, die als ein Schwerpunkt dieser Arbeit gelten kann.

Daß ein Antriebsorgan unter Beachtung der gegebenen Randbedingungen optimal auszulegen ist, ist eine selbstverständliche Forderung. Hier wird unter Optimierung verstanden, das Antriebsorgan so auszulegen, daß für gegebene Werte von Schub, Geschwindigkeit, Durchmesser und Drehzahl die geringste Antriebsleistung erforderlich ist, der höchste Wirkungsgrad erreicht wird. Es geht um etwas mehr als um die bekannte oben erwähnte Frage, welches ist für einen gegebenen Durchmesser die optimale Drehzahl oder umgekehrt, welches ist für eine gegebene Drehzahl der

optimale Durchmesser. Diese sicherlich wichtige Frage wird durch die angestrebte allgemeine Optimierung mit beantwortet. Es geht hier auch nicht um die optimale Gestaltung der Flügelschnittprofile, Blattumrißformen o.ä., so wichtig das auch sein mag. Hierzu kann hier nichts Neues beigetragen werden; das ist in dieser Arbeit durch die Wahl der Gleitzahlen erledigt. Was bleibt dann noch zu optimieren ?

Die Tabelle Fig. 12 zeigt das in übersichtlicher Form. Für den konv. Propeller bleibt dann nur noch die radiale Verteilung der Steigung (oder der induzierten Geschwindigkeit) zu optimieren. Dieses Optimierungsproblem ist - wie allen Experten bekannt ist - erstmals von A. Betz im Jahre 1919 bearbeitet worden. Er fand, daß für den schwachbelasteten Propeller in idealer Flüssigkeit die hydrodynamische Steigung für alle Radien gleich groß sein muß. Wenig später wurde dieses Problem auch für den Propeller in zäher Flüssigkeit bearbeitet.

Für den Propeller mit festem Leitapparat gilt es, zwei Bedingungen gleichzeitig zu erfüllen. Zunächst muß die durch den Leitapparat induzierte Geschwindigkeit so gewählt werden, daß bei vorgegebener Drallströmung der an jedem Radius erzielte Schub einen Maximalwert erreicht, daß eine kleine Variation dieser induzierten Geschwindigkeit keine Vergrößerung des Schubes bringen kann. Danach kann die zweite Bedingung erfüllt werden, die formal die gleiche ist wie für den konv. Propeller. Sie ist für den Propeller bekannt und stellt sicher, daß durch eine Variation der durch den Propeller induzierten Geschwindigkeit, durch eine kleine Abweichung von der optimalen Verteilung dieser Geschwindigkeit keine Verbesserung, sondern nur eine Verschlechterung erreicht werden kann. Selbstverständlich ist nun in diese zweite Bedingung auch der an dem Leitrad erzeugte Schub mit einzubeziehen, denn er wird ja infolge der ersten Bedingung mit der durch den Propeller induzierten Geschwindigkeit mit variiert. Das führt zu einer anderen radialen Verteilung als für den konv. Propeller, und zwar zu einer Verschiebung der Belastung nach innen, zu einer Entlastung an den äußeren Radien. Dickmann hat u.a. auf diesen Sachverhalt hingewiesen, allerdings ohne dies

quantitativ zu belegen. Es erscheint vielleicht interessant, den Einfluß der Optimierung an Hand dieses einfachen Beispiels zu belegen. Fig. 13 zeigt die Ergebnisse für ein optimal ausgelegtes Organ P+LA nochmals und dazu Ergebnisse für ein nicht optimal ausgelegtes Organ P+LA, dessen Propeller durch eine konstante hydrodynamische Steigung, wie sie für einen schwachbelasteten konv. Propeller in idealer Flüssigkeit optimal wäre, gekennzeichnet ist. Die Unterschiede sind zwar nicht gravierend aber doch deutlich.

Die Optimierung des Organs Propeller und Leitrad verlangt entsprechend der größeren Zahl der frei wählbaren Parameter die Erfüllung einer entsprechenden Zahl von Bedingungen.

Zunächst muß in jedem Fall sichergestellt sein, daß das resultierende hydrodynamische Drehmoment an dem nicht mechanisch angetriebenen Leitrad gleich Null ist

$$Q_{L_{res}} = \int_{\text{über alle Radian}} Q_L(r) dr = 0$$

(Reibung im Lager vernachlässigt). Diese Bedingung zählt nicht zu den Optimierungsbedingungen, da sie in jedem Fall erfüllt sein muß.

Durch die in der Tabelle zuerst genannte Bedingung wird die radiale Verteilung der durch das Leitrad induzierten Geschwindigkeit optimiert. Die Bedingung gilt in gleicher Weise für den Turbinen- und den Propellerteil des Leitrades.

In der zweiten Bedingung, die zu der radialen Verteilung der durch den Propeller induzierten Geschwindigkeit führt, muß beachtet werden, daß eine Variation dieser Geschwindigkeit ähnlich wie bei P+LA eine Variation am Leitrad mit sich zieht. Die Variation des Schubes besteht daher aus 3 Teilen

$$\Delta T_{PL}(r) = \Delta T_P(r) + \Delta T_L(r) - CL \cdot \Delta Q_L(r)$$

aus der Variation des direkt am Propeller erzeugten Schubelementes $T_P(r)$,

des durch die gleiche Wassermasse am Leitrad erzeugten Schubelementes $T_L(r)$

sowie des im Propellerteil des Leitrades erzeugten Schubelementes, das durch das im Turbinenteil erzeugte Drehmomentenelement $Q_L(r)$ ermöglicht ist.

Die Änderungsgrößen $\Delta T_L(r)$ und $\Delta Q_L(r)$ sind hier andere als in der ersten Bedingung, da sie hier durch eine Variation der durch den Propeller induzierten Geschwindigkeit verursacht sind, während sie oben durch eine Variation der durch das Leitrad induzierten Geschwindigkeit erzeugt wurden.

Durch die dritte Bedingung wird erreicht, daß bei festgehaltenem Außen-(=Leitrad-)durchmesser der Propellerdurchmesser (damit auch das Durchmesser Verhältnis) optimal ist. Variiert wird der Propellerdurchmesser, und die in der Bedingung stehenden Änderungsgrößen sind die durch diese Variation verursachten Änderungen des gesamten Schubes und gesamten Drehmomentes.

Um das Belastungsverhältnis zu optimieren, muß das Verhältnis der Konstanten der ersten beiden Bedingungen $CL:CP$ entsprechend gewählt werden. Die Formulierung der Bedingung kann durch eine Variation des Außendurchmessers erreicht werden, erfordert jedoch etwas längere Ausführungen und ist daher im Anhang zu diesem Vortrag dargestellt.

Für die Bestimmung des optimalen Drehzahlverhältnisses gibt es keine explizit formulierbare Bedingung. Es bleibt nur, für verschiedene Drehzahlverhältnisse hinsichtlich der ersten vier Bedingungen optimierte Organe zu berechnen und dann das optimale Drehzahlverhältnis an Hand der Ergebnisse dieser Berechnungen auszuwählen. Es zeigt sich, daß das optimale Verhältnis

Leitraddrehzahl zu Propellerdrehzahl

zwischen 0.35 und 0.45 liegt. Dies wurde schon früher auf einem anderen Wege gefunden (siehe Fig. 3).

Damit ist die Besprechung der Optimierungsproblematik abgeschlossen.

Die Maxima sind alle schwach ausgeprägt, d.h. erst starke Abweichungen von den Optimalbedingungen machen sich in Schubbelastungs- und Wirkungsgradeinbußen nennenswert bemerkbar. Das kommt der Überwindung einer Schwierigkeit entgegen, die durch die zweite Bedingung verursacht ist. Diese Bedingung führt nämlich, ähnlich wie bei P+LA, zu einer starken Verschiebung der Belastung zu inneren Radien und zu der Schwierigkeit, die für diese Belastung notwendige Flügelfläche an diesen Radien unterzubringen. In den Berechnungen, deren Ergebnisse für P+LR hier dargestellt sind, ist daher diese Bedingung an den inneren Radien verletzt im Sinne einer Entlastung dieser Flügelschnitte.

Es verdient vielleicht noch das folgende Detail Interesse: Die Bedingungen - insbesondere die ersten beiden - liefern für das Leitrad auch die Grenzen von Turbinen- und Propellerteil. Sie liefern nämlich für das Drehmomentenelement am Leitrad $QL(r)$ innen negative, außen positive Werte. Wo - von innen nach außen gehend - das negative Drehmomentenelement zu Null wird, ist die Grenze des Turbinenteils erreicht, und wo das Drehmomentenelement beginnt positiv zu werden, beginnt der Propellerteil. Beide Grenzen können innerhalb des Propellerstrahls liegen. Sie fallen jedoch nicht zusammen, zwischen ihnen liegt vielmehr ein schmaler, unbelastet bleibender Leitradteil, in dem die erste Optimierungsbedingung nicht angewandt werden kann. Der Grund für diesen unstetigen Übergang liegt darin, daß bei der Änderung des Vorzeichens des Anstellwinkels eines Profils, d.h. beim Übergang von einem Turbinen- zu einem Propellerprofil, die hydrodynamische Auftriebskraft die Richtung sprunghaft um rd. 180° ändert, während die Richtung der Reibungskraft nahezu unverändert bleibt (Fig. 14).

Das Diagramm Fig. 15 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen und, um die Gegenüberstellung zu erleichtern, auch nochmals die Ergebnisse für den Propeller und für P+LA. Es zeigt, daß wesentliche Unterschiede zwischen den Leistungen der gegenübergestellten Organe bestehen. Insbesondere zeigt diese Gegenüberstellung eine Überlegenheit von P+LA bei großen Fortschrittsgraden (extrem

niedrigen Drehzahlen), von P+LR bei kleinen Fortschrittsgraden (hohen Drehzahlen). Natürlich sind diese Unterschiede um so bedeutender, je größer die Belastung der Organe ist.

Um weitere Einblicke zu gewinnen, wird die folgende Analyse der Ergebnisse vorgenommen:

Ein beliebig gewählter Punkt in dem Diagramm gehört allen 3 Kurvenscharen an. Er stellt einen möglichen Betriebspunkt für alle 3 Antriebsorgane dar, wobei dann alle 3 Organe bei gleicher Geschwindigkeit, gleichem Durchmesser und gleicher Drehzahl den gleichen Schub erzeugen. Antriebsleistung und Wirkungsgrad sind jedoch verschieden.

Gewählt ist ein Betriebspunkt - $CT = 1.32$, $\lambda = 0.212$ -, der eine mäßige Belastung bedeutet, eine Belastung, für die eine Kort-Düse keine Verbesserung bringen kann.

Die Fig. 16 zeigt für diesen Betriebspunkt die Geschwindigkeiten in dem Strahl weit hinter dem jeweiligen Antriebsorgan. Die Fig. 17 zeigt für das Organ P+LR die gleichen Geschwindigkeiten und zusätzlich die Geschwindigkeiten zwischen den beiden Teilen des Organs, zwischen Propeller und Leitrad, wobei der durchgehend benutzten Vereinfachung entsprechend vorausgesetzt ist, daß an dieser Stelle des Zwischenraumes der Propellerstrahl voll entwickelt, der Einfluß des Leitrades jedoch noch nicht spürbar ist. Deutlich läßt diese Darstellung den Turbinen-, den unbelasteten Zwischen- und den Propellerteil des Leitrades erkennen. Die Differenz zwischen den beiden Kurven a) und b) im inneren Bereich stellt die von der Leitradturbine induzierte Geschwindigkeit dar.

Die Kenntnis dieser Geschwindigkeiten erlaubt es, die Verluste zu analysieren. Die Tabelle Fig. 18 führt die Ergebnisse dieser Analyse auf: Für P+LA verschwindet, der Konzeption dieses Organs entsprechend, der Drallverlust fast vollständig. Für P+LR ist die Verringerung des Drallverlustes bei weitem nicht so groß wie für P+LA, dafür ist - in dieser Größe unerwartet - der Reibungsverlust nennenswert kleiner als für den konv. Propeller.

Es beruht in diesem Falle sogar die Überlegenheit dieses Organs so gut wie ausschließlich auf dieser Verringerung des Reibungsverlustes. Diese Verringerung des Reibungsverlustes ist leicht zu erklären. Sie beruht auf der Verringerung des Durchmessers und damit der Umfangsgeschwindigkeit des mechanisch angetriebenen Teils des Organs. Für den "Reibungswirkungsgrad" eines Propellers ist die folgende Abschätzung bekannt:

$$\eta_{\varepsilon} = \frac{1 - 2 \cdot \varepsilon \cdot \lambda_i}{1 + \frac{2}{3} \frac{\varepsilon}{\lambda_i}}$$

Im vorliegenden Fall ist durch die Verringerung der Umfangsgeschwindigkeit des mechanisch angetriebenen Teils sowohl die Gleitzahl ε kleiner als auch der induzierte Fortschrittsgrad λ_i größer als für den konv. Propeller. Beide Änderungen wirken in der Richtung einer Verbesserung des "Reibungswirkungsgrades". Es kommt zwar zu dem Reibungsverlust am Propeller ein Reibungsverlust am Leitrad dazu, der ist aber infolge der kleinen Drehzahl dieses Rades klein.

Die Tabelle enthält noch eine 4. Spalte. Sie gilt für ein Organ P+LR, das den gleichen Schub erzeugt und mit der gleichen Drehzahl angetrieben wird wie die anderen Organe, dessen Durchmesser aber der ursprünglichen Idee entsprechend größer ist, und zwar um 20 %. Dieses Organ arbeitet mit einem Wirkungsgrad von 67.99 %. Während das Organ Nr. 3 des gleichen Durchmessers nur eine Verbesserung des Wirkungsgrades und damit eine Verringerung der Antriebsleistung um 4.3 % bringt, beträgt diese Verbesserung 9.1 % für das Organ Nr. 4, beides natürlich bezogen auf den Wirkungsgrad des Organs Nr. 1, des konv. Propellers.

Hinzugefügt wird noch das Ergebnis für ein 5. Organ, ein Organ P+LR, das sich von dem in Spalte 4 der Tabelle nur dadurch unterscheidet, daß der mechanisch angetriebene Propeller nicht für das kombinierte System, sondern für den konventionellen Fall optimiert ist. Dieses Organ erreicht einen Wirkungsgrad von 66.0 %, eine Verbesserung gegenüber Organ Nr. 1 von 5.9 %. Dieses Beispiel zeigt die Bedeutung der Optimierung des Propel-

lers des kombinierten Organs.

Das Diagramm Fig. 15 läßt erkennen, daß in einem weiten Bereich von Anwendungen, insbesondere auch für schwach- oder mäßig belastete Organe, das Organ P+LR dem konv. Propeller im Wirkungsgrad um mehr als 5 % überlegen sein kann, daß Verbesserungen von 10 % und mehr bei stärker belasteten Propellern erreicht werden können. Die Optimierung des Organs Propeller und Leitrad hinsichtlich des Wirkungsgrades und die daraus resultierenden Ergebnisse sind damit ausreichend diskutiert. Das Diagramm Fig. 15 kann leicht benutzt werden und ist übersichtlich. Berechnungen für Systeme mit endlicher Flügelzahl, die ebenfalls in größerem Umfange ausgeführt wurden, sowie fast alle ausgeführten Modellversuche bestätigen, daß die oben beschriebenen Unterschiede zwischen den verschiedenen Organen qualitativ und in etwa auch quantitativ erhalten bleiben. Da in dem Strahl eines Propellers mit endlicher Flügelzahl bei gleichem Schubbelastungs- und Fortschrittsgrad mehr Leistung verlorenggeht als bei unendlicher Flügelzahl, können die Vorteile von P+LR sogar größer sein.

Auf eine weitere, den Wirkungsgrad betreffende Eigenschaft des Organs P+LR wird hier noch hingewiesen: Bei einer Belastungsvergrößerung, wie sie hinter dem Schiff durch Seegang, durch Bewuchs der Schiffsoberfläche o.ä. verursacht wird, sinkt der Wirkungsgrad des Propellers und, wenn ein Festpropeller verwendet und durch einen Dieselmotor angetrieben wird, auch die zugeführte Antriebsleistung infolge der Drehzahlverminderung. Beide Effekte werden für ein Organ P+LR kleiner. Das kann am besten an Hand eines Freifahrt diagrams, wie schon 1966 veröffentlicht, erkannt werden, da in dem Freifahrt diagramm die Kurve des Schubbeiwertes mit zunehmendem Fortschrittsgrad steiler abfällt als für den Propeller allein.

Es erscheint geboten, zu dem Thema Leistung und Wirkungsgrad von Antriebsorganen für Schiffe zwei weitere Beiträge hinzuzufügen.

Der erste Beitrag beschäftigt sich mit dem gegenläufigen Propeller. Dieses Organ wurde oft propagiert - der Verfasser hat das

selbst vor 20 Jahren getan - und in einigen seltenen Fällen auch realisiert.

Der gegenläufige Propeller kann unter den gleichen vereinfachenden Voraussetzungen - vor allem rotationssymmetrische Strömung oder unendlich große Flügelzahlen - optimiert und berechnet werden. Die Optimierung fordert, beide Propeller entsprechend ihrer verschiedenen Arbeitsweise in verschiedener Weise so zu belasten, wie es für das gesamte Organ am optimalsten ist. Die Fig. 19 zeigt die Ergebnisse neben den Ergebnissen für den Propeller mit festem Leitapparat. Es verdient Interesse, daß diese Ergebnisse die Überlegenheit des gegenläufigen Propellers über den konventionellen Propeller - soweit es den Wirkungsgrad betrifft - bestätigen, daß jedoch gegenläufiger Propeller und Propeller mit festem Leitapparat annähernd gleichwertig sind. Das sollte nicht überraschen, denn die Überlegenheit gegenüber dem konventionellen Propeller beruht in beiden Fällen auf der Nutzung der Drallenergie; es muß vielmehr überraschen, daß diese Gleichwertigkeit des gegenläufigen Propellers mit dem Propeller mit Leitapparat bisher anscheinend nicht klar erkannt und ausgesprochen wurde, denn sonst würde der gegenläufige Propeller nicht propagiert worden sein. Der Verfasser ist überzeugt, daß der Propeller mit festem Leitapparat, der wesentlich einfacher und billiger ist, hinsichtlich des Wirkungsgrades die gleichen Vorteile bietet wie der gegenläufige Propeller. Vielleicht bietet der letztere in extremen Fällen Vorteile hinsichtlich der Kavitation.

Ergänzend werden in Fig. 20 für einen bestimmten Fall die Steigungsverteilungen und die Leistungsverteilung für einen optimal ausgelegten gegenläufigen Propeller gezeigt.

In dem zweiten Beitrag wird, wie angekündigt, die Aufmerksamkeit nochmals auf den Propeller mit Leitapparat gelenkt. Denn die hierfür gezeigten Ergebnisse, die als überraschend gut beurteilt werden müssen, erfordern eine Antwort auf die Frage, warum dieses Organ nicht angewandt wird, zumal es - wie damals berichtet wurde -

vor etwa 30 Jahren mit Erfolg gearbeitet hat. Von den Gründen, die heute gegen dieses Organ genannt werden können, wird einer, der in den Rahmen dieses Vortrages paßt, erörtert:

Hinter dem Schiffspropeller ist in fast allen Fällen schon ein Leitapparat angeordnet, nämlich das Ruder. Das ist zwar ein schlechter Leitapparat, aber immerhin wird hierdurch ein Teil der Drallenergie für die Schuberzeugung genutzt, ein Teil, der natürlich für eine weitere Nutzung durch einen zusätzlichen, vollkommeneren Leitapparat nicht mehr zur Verfügung steht.

Um das beurteilen zu können, wurde versucht, die Leitwirkung des Ruders abzuschätzen. Selbstverständlich konnte hierfür die bislang benutzte Voraussetzung - rotationssymmetrische Strömung bzw. unendliche Flügelzahl - nicht beibehalten werden, selbstverständlich mußte hierzu die Wirbeltheorie herangezogen werden. Dies wurde getan in enger Anlehnung an eine von Isay beschriebene Methode.

Während Isay das Ruder in eine gegebene rotationssymmetrische Drallströmung stellt und dafür die Zirkulation des Ruders sowie die daraus resultierende Leitwirkung berechnet, wurde hier in einer teilweisen Umkehrung dieses Lösungsweges eine Zirkulationsverteilung des Ruders angenommen und dafür die dazugehörige rotationssymmetrische Zuströmung sowie die resultierende Leitwirkung berechnet. Das ist in gleicher Strenge, jedoch in einfacherer Weise möglich. Selbstverständlich interessierte nur der Fall Ruder in Mittellage.

Die Fig. 21 zeigt das der Berechnung zugrunde liegende System, die Verteilung der Zirkulation Γ_R des das Ruder darstellenden gebundenen Wirbels sowie für 3 Seitenverhältnisse des Ruders - $\frac{b}{a} = 5,3$ und 1 - das interessierende Verhältnis

$$\eta_{id,R} = \frac{\text{Durch das Ruder gewonnene Schubleistung}}{\text{Gesamte Dralleistung der ankommenden Strömung}} ,$$

das als ideeller Wirkungsgrad des Ruders als Leitapparat bezeichnet werden kann. Hierbei sind in der gewonnenen Schubleistung

die Zähigkeitsverluste am Ruder nicht berücksichtigt. Das erscheint berechtigt, da das Ruder als Manövrierorgan sowieso vorhanden, die Zähigkeitsverluste sowieso in Kauf genommen werden müssen. Die Nutzung des Dralls ist zusätzlich, dieser Leitwirkung können die Zähigkeitsverluste daher nicht ein zweites Mal angelastet werden. Dieser "Wirkungsgrad des Ruders" ist dann nur von der Zirkulationsverteilung und in sehr geringem Maße von dem Seitenverhältnis des Ruders abhängig. Es ist nicht abhängig von der Intensität der Zirkulation, da Zähler und Nenner des Bruches mit dem Quadrat dieser Intensität wachsen.

Die Untersuchung zeigt, daß das Ruder immerhin bis zu 40 % der Dralleistung nutzen kann. Für einen zusätzlichen Leitapparat blieben in dem System mit Ruder daher kaum mehr als 60 % zu nutzen, und das heißt doch wohl, daß in dem System mit Ruder der feste Leitapparat bei weitem nicht so viel bringen kann wie in dem System ohne Ruder. Daß diese Leitwirkung des Ruders bei Messungen durch die Zähigkeitsverluste an dem Ruder überdeckt und kaum explizit festgestellt werden kann, ändert an diesem Sachverhalt nichts.

Es bot sich an, die für die Berechnung der Leitwirkung des Ruders benutzte Methode zu erweitern und zusätzlich den in gleicher Weise definierten "ideellen Wirkungsgrad" für einen festen Leitapparat mit endlicher Flügelzahl in einer rotations-symmetrischen Drallströmung zu berechnen. Für die gleiche Zirkulationsverteilung an den Flügeln des Leitapparates ergaben sich die folgenden "Wirkungsgrade" in %

Flügelzahl		Seitenverhältnis				
		b/a	=	5	3	1
Z	= 2 (RUDER)			38	39	40
	= 4 (LEITAPPARAT)			65	66	67
	= 8 "			87	88	88

Mit weiter wachsender Flügelzahl nähert sich dieser Wirkungsgrad asymptotisch 100 %, da Zähigkeitsverluste in dieser Berechnung nicht enthalten sind. Dieses Ergebnis erlaubt den weiteren Schluß, daß in einer Anordnung mit Ruder für einen zusätzlichen 8-flügeligen Leitapparat weniger als 48 % der Dralleistung zu nutzen bliebe ($88 - 40 = 48$).

Alle hier für die Leitwirkung des Ruders oder Leitapparates genannten, mittels der Wirbeltheorie berechneten Zahlen müssen jedoch noch reduziert werden, und zwar um den Faktor

$$\frac{\text{Geschwindigkeit der Zuströmung zum Propeller}}{\text{Axiale Strahlgeschwindigkeit}},$$

denn die Schubleistung in dem ideellen Wirkungsgrad ist durch Multiplikation des Schubes mit der Strahlgeschwindigkeit bestimmt worden; tatsächlich wirkt der durch das Ruder oder den Leitapparat gewonnene Schub bei einem freifahrenden System eben auf dieses mit der Zuströmgeschwindigkeit fahrende System.

Bemerkenswert ist ferner, daß die sich auf die Wirbeltheorie stützende Methode für einen Leitapparat mit unendlich vielen Flügeln die gleichen Ergebnisse liefert wie die sonst in dieser Arbeit angewendete einfachere Methode.

Diese Erkenntnisse über den Nutzen eines festen Leitapparates in einem System mit Ruder gelten sicherlich auch in annähernd gleichem Maße für einen gegenläufigen Propeller, da die Überlegenheit des gegenläufigen über den konventionellen Propeller ebenso in der Nutzung der Dralleistung liegt. Ein analoger Schluß gilt für das Antriebsorgan Propeller und Leitrad jedoch nur in einem geringeren Maße, da die Vorteile dieses Systems - wie oben ausgeführt (s. Tabelle Fig. 18) - nur zu einem kleinen Teil auf die Nutzung der Dralleistung zurückzuführen sind.

Strenggenommen müßten alle Organe unter Berücksichtigung der Leitwirkung des Ruders optimiert und dafür die Berechnungen wiederholt werden. Das ist nicht geschehen. Es scheint auch so schon der Schluß berechtigt, daß der feste Leitapparat vielleicht,

der gegenläufige Propeller aber bestimmt in einem System mit einem Ruder im Strahl des Antriebsorgans zu wenig bieten, um angewandt zu werden, während durch das Leitrad - insbesondere, wenn sein Durchmesser größer gewählt werden kann - weiterhin in einem weiten Anwendungsbereich Verbesserungen des Wirkungsgrades von 5 bis 10 %, für stark belastete Organe noch mehr erwartet werden können.

Die Schwingungs- und Lärmerregung durch den Propeller spielen heute bei der Auslegung dieses Organs oft eine fast gleiche, bestimmende Rolle wie der Wirkungsgrad. Durch eine gute, gleichmäßige Zuströmung zum Propeller, durch große lichte Abstände vom Schiffskörper und Ruder, gekrümmte Eintrittskanten u.a. versucht man, diese unerwünschten Wirkungen klein zu halten.

Für ein neuartiges Antriebsorgan - für Propeller und Leitrad - stellt sich daher neben der Frage nach dem Wirkungsgrad die weitere Frage nach der Schwingungs- und Lärmerregung, zumal beabsichtigt ist, für dieses Organ einen größeren Durchmesser zu wählen und einen kleineren lichten Abstand vom Schiffskörper zuzulassen als für den konv. Propeller. Zwar kann - wie ausgeführt - schon bei gleichem Durchmesser ein besserer Wirkungsgrad erzielt werden, diese Überlegenheit von P+LR kann und soll jedoch ausgebaut werden durch die Wahl eines größeren Durchmessers. Das ist nur möglich, wenn die Schwingungs- und Lärmerregung klein bleibt.

Zunächst können einige, bezüglich dieses Aspekts positive Argumente genannt werden.

Der höhere Wirkungsgrad und die für die gleiche Schiffsgeschwindigkeit niedrigere Antriebsleistung,

der Durchmesser und die Umfangsgeschwindigkeit des mechanisch angetriebenen Propellers, die bei einer optimalen Auslegung beide kleiner sind als für einen konv. Propeller,

die kleine Umfangsgeschwindigkeit, kleine Belastung und große Flügelzahl des Leitrades.

Es ist berechtigt, dank dieser Gegebenheiten kleinere Kraftschwankungen an dem Propeller selbst und dank einer zusätzlichen hydrodynamischen Schwingungsdämpfung durch das Leitrad kleinere Schwingungen in der Welle und kleinere Kraftschwankungen in den Lagern zu erwarten. Wie sich jedoch die periodischen Oberflächenkräfte, die Druckschwankungen an der Außenhaut gestalten, blieb zunächst ungewiß. Die Theorie gibt auf diese Fragen keine zuverlässigen Antworten. Glücklicherweise liegen experimentell gefundene Antworten vor.

Dank dem Sonderforschungsbereich 98 konnte Ende 1978 im großen Kavitationstunnel der HSVA, geleitet von Weitendorf, ein umfangreiches Versuchsvorhaben, das glücklicherweise eindeutige Ergebnisse lieferte, ausgeführt werden. Hierüber liegen zwei Berichte vor (Frisch und Nikolakis, Aaroe). Hier wird auszugsweise berichtet:

Die Fig. 22 zeigt die Versuchsanordnung. An 5 Stellen einer Hinterschiffsattrappe wurden die Druckschwankungen gemessen. Die Antriebsorgane arbeiteten in einer ungleichförmigen Zuströmung, und zwar

1. und 2. je ein Propeller allein. Die Propeller unterschieden sich durch die Steigungsverteilung in radialer Richtung;
3. bis 6. je ein Propeller mit je einem 6- oder 9-flügeligen Leitrad.

Die Durchmesser der 5-flügeligen Propeller betrugen 0.333 m, die lichten Abstände von den nächsten Druckmeßstellen an der Außenhaut 0.113 m, also 34 % der Durchmesser. Die Durchmesser der Leiträder betrugen 0.40 m, waren also um 20 % größer als die Durchmesser der Propeller. Da die Achsenlage unverändert blieb, betrugen die lichten Abstände der Leiträder 0.080 m, also nur 71 % der Abstände der Propeller.

Jede der 6 Anordnungen wurde bei verschiedenen Schubbeiwerten und Kavitationszahlen untersucht. Nebenbei bestätigten auch diese

Versuche einen Wirkungsgradgewinn; für den gleichen Schub waren mit Leiträdern um 5 bis 7 % kleinere Antriebsleistungen erforderlich, obwohl die Organe nicht optimal ausgelegt waren. Das Ziel der Versuche war es jedoch, Erkenntnisse über die erzeugten Druckschwankungen an der Außenhaut der Hinterschiffsattrappe zu gewinnen.

Bei fast allen Versuchen wurde eine erhebliche Verkleinerung der dominierenden Druckschwankung 5. Ordnung und eine geringere Verminderung der Druckamplitude 10. Ordnung festgestellt. Die Fig. 23 und 24 zeigen z.B. die Druckamplituden der 5. und 10. Ordnung für 3 Versuchsanordnungen, alle 5 Meßstellen, 5 Schubbeiwerte und eine Kavitationszahl.

Die in dieser Größe nicht erwartete Verringerung der dominierenden Druckschwankung 5. Ordnung kann nicht mit Gewißheit erklärt werden. Sie wurde jedoch zweifelsfrei in einer großen Zahl von Einzelversuchen festgestellt. Wieweit hierfür eine Verringerung der Kavitation maßgebend war, konnte nicht eindeutig festgestellt werden. Zwar scheint in vielen Fällen die Kavitation an den Flügeln der Propeller durch die dahinterliegenden Leiträder etwas verringert worden zu sein (Fig. 25 u. 26), jedoch konnte das nicht durchgehend festgestellt werden, und außerdem wurde eine zusätzliche Kavitation an den Flügeln der Leiträder beobachtet.

Eindeutig war jedoch eine weitere, einschlägige Beobachtung: Bei den Versuchen mit den Propellern allein wurde trotz des großen lichten Abstandes von der Außenhaut oft ein sehr kräftiger, instationärer Kavitationsschlauch beobachtet, der von der Außenhaut in den Propellerkreis sprang. Diese als Rumpf-Propeller-Kavitation bekannte Erscheinung wurde begleitet von einer enormen Steigerung des Lärmpegels. Bei den Versuchen mit Leiträdern wurde dieses Phänomen nicht ein einziges Mal beobachtet.

Die an der Drehzahl des Propellers orientierte harmonische Analyse der Druckschwankungen, die unmittelbar durch einen an die Meßanordnung angeschlossenen Rechner vorgenommen wurde, erschien nicht als ausreichend. Sie konnte durch die Leiträder erregte Druckschwankungen nicht erfassen. Es wurden daher in einer zusätzlichen Auswertung kontinuierliche Spektren aufgenommen,

die unabhängig von der Propellerdrehzahl alle periodischen Komponenten der Druckschwankungen zeigen mußten. Die Fig. 27 bis 29 zeigen 3 dieser Spektren: eines für eine Anordnung Propeller allein, eines für den Propeller mit 6- und eines für den Propeller mit 9-flügeligem Leitrad. Schubbeiwert und Kavitationszahl waren in den 3 Fällen gleich groß. Der Propeller drehte wie bei allen Versuchen mit 25 Hz.

Das erste Spektrum für den Versuch mit dem Propeller allein zeigt, wie es sein muß, Spitzen bei 125, 250 und 375 Hz, also Erregungen der 5., 10. und 15. Ordnung entsprechend der Flügelzahl des Propellers. Die weiteren Spektren zeigen diese Spitzen auch - allerdings in verminderter Höhe (logarithmischer Höhenmaßstab !) -, sie zeigen jedoch eine Anzahl zusätzlicher Spitzen.

Die Lage dieser weiteren Spitzen ließ sich leicht zuordnen. Die gemessenen Drehzahlen der Leiträder lagen je nach der Belastung zwischen 7.1 und 7.7 Hz. Dementsprechend liegen in den Spektren Spitzen bei 42 bis 46 Hz bzw. 63 bis 67 Hz, also bei den Blattfrequenzen des 6- bzw. 9-flügeligen Leitrades. Gelegentlich erscheinen auch Erregungen bei den doppelten Blattfrequenzen des Leitrades. Deutlicher erscheinen jedoch zusätzliche Erregungen bei Differenzen oder in geringerem Maße bei Summen der Blattfrequenzen von Propeller und Leitrad, z.B. für das 6-flügelige Leitrad bei

$$125 - 45 = 80 \text{ Hz}$$

$$250 - 45 = 205 \text{ Hz}$$

$$250 + 45 = 295 \text{ Hz}$$

oder für das 9-flügelige Leitrad bei

$$125 - 65 = 60 \text{ Hz}$$

$$250 - 65 = 185 \text{ Hz}$$

$$250 + 65 = 315 \text{ Hz usw.}$$

Alle zusätzlichen, durch die Leiträder verursachten Spitzen bleiben jedoch erheblich unter den Spitzen bei den Propellerblattfrequenzen. Zur weiteren Verdeutlichung wurden die gemessenen Spektren ausgewertet; es wurden Linienspektren gezeichnet, wie z.B. die Fig. 30 eines wiedergibt. Aufgetragen ist der Druck-

beiwert über der Frequenz, wobei an der Abszissenachse in der ersten Zeile die auf den Propeller bezogenen Ordnungszahlen stehen, in der 2. und 3. Zeile L die Leitradblattfrequenz und -5 oder +10 die 5. oder 10. Propellerblattfrequenz minus oder plus der Leitradblattfrequenz bezeichnet.

Für die dominierende Erregung der 5. Propellerordnung wurden im Mittel aus allen Versuchen als Verhältnisse zwischen den 3 Versuchsanordnungen - Propeller allein, Propeller mit 6-flügeligem und Propeller mit 9-flügeligem Leitrad - gefunden:

$$1 : 0.45 : 0.40 ,$$

d.h. im Mittel wurde bei gleicher Belastung und gleicher Kavitationszahl die Erregung 5. Ordnung auf 45 bzw. 40 % reduziert.

Der Trend dieser Ergebnisse war so eindeutig, daß eine Verallgemeinerung auf andere Fälle erlaubt erscheint.

Damit ist der fachliche Teil des Vortrages beendet. Alle Ergebnisse sind nachprüfbar. Eine Realisierung auf einem Schiff erscheint unmittelbar möglich, das damit verbundene Risiko klein und kalkulierbar.

Im Frühling d.J. haben auf dem Gipfeltreffen in Tokio die Regierungschefs der westlichen Industriestaaten eine Energieeinsparung von 5 % beschlossen. Dieser Prozentsatz klingt bescheiden, ist aber, wie wir wissen, schwer oder überhaupt nicht zu erreichen. Für den Bereich Schifffahrt ist durch die vorgestellte Idee ein Weg gewiesen, wie dieses Ziel in vielen Fällen leicht erreicht und überholt werden kann, und zwar ohne daß, wie bei analogen Energieeinsparungen auf anderen Gebieten, Einbußen in Kauf genommen oder ein übermäßiger Aufwand getrieben werden müßten. Es stellt sich die Frage, warum die Entwicklung in den vergangenen Jahren nicht vorangetrieben und ihre Realisierbarkeit nicht geprüft wurde. Der Verfasser weiß auf diese Frage keine Antwort, es sei denn, er bekennt seine Unfähigkeit, zu überzeugen und die für eine Realisierung notwendige Unterstützung zu gewinnen.

Literatur

1. Grim, O.: "Propeller und Leitrad", Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 60. Band (1966)
2. Grim, O.: "Propeller und Leitrad, weitere Ergebnisse", Forschungshefte für Schiffstechnik, 14 (1967)
3. Chirila, J.; Engel, G.; Grim, O.: "Untersuchung eines Vortriebsorgans - Propeller und Leitrad - auf einer Barkasse", Forschungszentrum des Deutschen Schiffbaus, Bericht Nr. 10/69
4. Grim, O.: "Propeller und Leitrad, Propulsionsversuche mit einem völligen Modell", Forschungszentrum des Deutschen Schiffbaus, Bericht Nr. 22/71
5. Grim, O.: "Propeller und Leitrad, Einfluß von Flügelzahl und Reynoldszahl", Hamburgische Schiffbauversuchsanstalt, Bericht Nr. 1465, 1971
6. Friesch, J. und Nikolakis, D.: "Experimentelle Untersuchungen der bei Kavitation erzeugten Druckschwankungen für die Antriebsart Propeller und Leitrad", Institut für Schiffbau Hamburg, Kleine Studienarbeit (1979)
7. Aaroe, K.: "Analyse und Interpretation der bei Kavitationsversuchen mit Propeller und Leitrad gemessenen instationären Druckfelder und der dabei aufgetretenen Interferenzen", Institut für Schiffbau Hamburg, Diplomarbeit (im Entstehen)
8. Isay, W.-H.: "Moderne Probleme der Propellertheorie", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1970)
9. Wagner, R.: "Rückblick und Ausblick auf die Entwicklung des Contrapropellers", Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 30. Band (1929)

Symbole

Dimensionsbehaftet:

r	Radius
V	Zuström-(=Fahr-)geschwindigkeit
D	Durchmesser
DP	" des Propellers
DL	" " Leitrades
ω	Winkelgeschwindigkeit
ω_P	" des Propellers
ω_L	" " Leitrades
Γ	Zirkulation
ρ	Dichte
a, b	Seiten des rechteckigen Ruders

Dimensionslos:

RP	Radius eines Flügelschnittes des Propellers
RL	" " " " Leitrades
RPM	maximaler Radius des Antriebsorgans
$DD = DL/DP$	Durchmesserverhalten
T	Schub
TP	" des Propellers
TL	" " Leitrades
Q	Drehmoment
QP	" des Propellers
QL	" " Leitrades

ε	Gleitzahl eines Flügelschnittes			
$\varepsilon_P (=EP)$	"	"	"	des Propellers
$\varepsilon_L (=EL)$	"	"	"	" Leitrades
C_L	Auftriebsbeiwert für einen Flügelschnitt			
σ	Kavitationszahl	"	"	"
λ	Fortschrittsgrad	"	"	"
λ_i	"	, induzierter		
CT	Schubbelastungsgrad			
η	Wirkungsgrad			
η_i	"	, induzierter		
η_ε	"	, Reibungs-		
XP, YP	Koordinaten der durch einen Flügelschnitt des Propellers induzierten Geschwindigkeit			
XL, YL	Koordinaten der durch einen Flügelschnitt von Leitapparat oder Leitrad induzierten Geschwindigkeit			

A N H A N G

Solange nur rotationssymmetrische Strömungen vorausgesetzt sind, braucht die Wirbeltheorie nicht bemüht zu werden. Es reicht aus, die Berechnungen auf Impulssätze zu stützen. Jedoch sollen alle Berechnungen und Aussagen mit entsprechenden Aussagen der Wirbeltheorie - angewandt auf Systeme mit unendlich vielen Flügeln - übereinstimmen. Notwendig ist allerdings eine Voraussetzung über die Richtung der induzierten Geschwindigkeiten. Es wird hierfür die aus der Propellertheorie bekannte Normalbedingung vorausgesetzt, die sinngemäß auch auf Leitapparat und Leitrad angewandt wird. Dies ist eine Voraussetzung, die für allgemeinere Fälle, wie sie hier vorkommen, nicht bewiesen ist, die vermutlich nicht exakt stimmt, aber als Annäherung brauchbar ist. In der früheren Arbeit des Verfassers wurde diese Voraussetzung nicht benutzt, sie setzte endliche Flügelzahlen voraus und die Berechnungen stützten sich auf die Wirbeltheorie sowie die Methode der Induktionsfaktoren nach Lerbs. Es wurden hier keine offensichtlichen Widersprüche zwischen den Ergebnissen der beiden Berechnungsmethoden festgestellt. Die hier vorgeführte Methode ist einfacher, transparenter und daher leichter nachprüfbar. Viele Berechnungen können schon mit einem programmierbaren Taschenrechner ausgeführt werden.

Es wird eine unkonventionelle Darstellung und eine unkonventionelle Normierung gewählt, um möglichst einfache Formeln zu erhalten.

Es werden normiert:

die Geschwindigkeiten mit der Zuström-(=Fahr-)geschwindigkeit V ,

die Kräfte mit $\pi \cdot \frac{\rho V^4}{\omega^2}$,

die Drehmomente mit $\pi \cdot \frac{\rho V^5}{\omega^3}$,

die Radian mit $\frac{V}{\omega}$,

ω = Winkelgeschwindigkeit des mechanisch angetriebenen
Propellers = ωP

Wenn die Leistungen dann mit $\bar{\pi} \cdot \frac{\rho V^5}{\omega^2}$ normiert sind, sind sie identisch mit den normierten Kräften. Insbesondere ist dann die normierte Schubleistung mit dem Schub und die normierte Drehleistung mit dem normierten Drehmoment identisch.

1. Konventioneller Propeller

Der bekannte Geschwindigkeitsplan für einen Radius r bzw.

$RP = \frac{r \omega}{V}$ ist dann gegeben (Fig. 31)

durch die Zuströmgeschwindigkeit $\overline{AB} = 1$

die Umfangsgeschwindigkeit $\overline{BC} = RP = \frac{r \omega}{V}$

und die induzierte Geschwindigkeit $\overline{EA} = \frac{U_{ind}}{V}$

In der Propellerebene erscheint erst die halbe induzierte Geschwindigkeit $\overline{DA} = \frac{1}{2} \frac{U_{ind}}{V}$ und nach der vorausgesetzten Normalbedingung bildet die induzierte Geschwindigkeit mit der resultierenden Relativgeschwindigkeit $\overline{DC}$ einen rechten Winkel.

In den Geschwindigkeitsplan wird ein rechtwinkliges Koordinatensystem x, y mit dem Ursprung in B gelegt. Die Koordinaten des Punktes E werden mit XP und YP bezeichnet, wobei XP kleiner als Null und YP größer als Eins ist. Infolge der Normalbedingung liegen die Punkte A und E auf einem Kreis, dessen Mittelpunkt in C liegt. Es gilt daher die Kreisgleichung

$$(RP + XP)^2 + YP^2 = RP^2 + 1 \quad 1.1$$

Die hydrodynamische Kraft wirkt in idealer Flüssigkeit in Richtung der induzierten Geschwindigkeit. In realer Flüssigkeit wirkt zusätzlich senkrecht dazu eine Reibungskraft, die sich durch Multiplikation mit der Gleitzahl ξ ergibt. Dies führt für ein Ringelement vom Radius RP und von der Breite dRP zu dem normierten Schubelement

$$dT = RP \cdot (YP+1) \cdot (YP-1+EP \cdot XP) \cdot dRP \quad 2.1$$

und zu dem Drehmomentenelement

$$dQ = RP^2 \cdot (YP+1) \cdot (-XP+EP \cdot (YP-1)) \cdot dRP \quad 3.1$$

wobei die Gleitzahl des Propellers wie in dem Rechenprogramm mit EP bezeichnet ist.

Um einen optimalen Steigungsverlauf zu erhalten, wird die induzierte Geschwindigkeit variiert. Es resultieren dann für das Ringelement die folgenden Variationen:

Aus der Kreisgleichung

$$(RP+XP) \cdot \delta XP + YP \cdot \delta YP = 0 \quad 4.1$$

Aus den Kraftgleichungen

$$\delta(dT) = RP \cdot [2 \cdot YP \cdot \delta YP + EP \cdot (XP \cdot \delta YP + (YP+1) \cdot \delta XP)] \cdot dRP \quad 5.1$$

$$\delta(dQ) = RP^2 \cdot [-XP \cdot \delta YP - (YP+1) \cdot \delta XP + 2 \cdot EP \cdot YP \cdot \delta YP] \cdot dRP \quad 6.1$$

Die optimale radiale Verteilung der induzierten Geschwindigkeit ist dann gegeben, wenn

$$\frac{\delta(dT)}{\delta(dQ)} = CP \quad 7.1$$

für alle Radien denselben Wert CP annimmt. Andernfalls würde bei gleichem Drehmoment, gleichem Durchmesser und gleicher Drehzahl ein größerer Schub erhalten werden können, wenn an den Radien eines größeren CP-Wertes die induzierten Geschwindigkeiten vergrößert und an den Stellen kleinerer CP-Werte die induzierten Geschwindigkeiten entsprechend verkleinert würden, bis die Forderung 7.1 erfüllt ist. Die vier Gleichungen 4.1 bis 7.1 werden für ein vorgegebenes CP erfüllt, und damit ist die Aufgabe gelöst.

Der hydrodynamische Steigungswinkel wird danach erhalten aus

$$\tan \beta_i = \frac{Y_P + 1}{2 \cdot R_P + X_P} \quad , \quad 8.1$$

der gesamte Schub und das gesamte Drehmoment durch Integration über alle Radien

$$\begin{aligned} T &= \int dT \quad , \\ Q &= \int dQ \quad , \end{aligned} \quad 9.1$$

der Wirkungsgrad aus

$$\eta = \frac{T}{Q} \quad , \quad 10.1$$

der Schubbelastungsgrad beträgt dank der Normierung

$$C_T = \frac{T}{RPM^2} \quad 11.1$$

und der Fortschrittsgrad

$$\lambda = \frac{1}{RPM} \quad , \quad 12.1$$

wobei RPM den maximalen normierten Radius bezeichnet

$$RPM = \frac{R \cdot \omega}{V} \quad . \quad 13.1$$

Wenn diese Aufgabe für verschieden vorgegebene Werte CP und verschiedene Radien RPM gelöst ist, ist das vollständige Diagramm - Fig. 8 - bestimmt. Für eine reibungsfreie Flüssigkeit, d.h. für EP=0, erhält man auf diesem Wege genau das Kramer-Diagramm.

2. Propeller und Leitapparat

Der Leitapparat findet im vollentwickelten Propellerstrahl an einem Radius die Geschwindigkeit $\overline{EB}$ (Fig. 31) vor. Der Leitapparat induziert die Geschwindigkeit $\overline{GE}$, weit hinter dem Leitapparat bleibt in dem resultierenden Strahl die Geschwindigkeit $\overline{GB}$, die sich von der Geschwindigkeit $\overline{EB}$ nur durch die Richtung, nicht durch die Größe unterscheidet. In der Leitradebene ist erst die halbe induzierte Geschwindigkeit entwickelt, und $\overline{FB}$ steht senkrecht zu $\overline{GB}$. Es ist also eine Normalbedingung vorausgesetzt.

XP, YP sind die Koordinaten des Punktes E
 XL, YL " " " " " G

Die Punkte E und G liegen auf einem Kreis mit dem Mittelpunkt in B. Es gilt daher die Kreisgleichung

$$YP^2 + XP^2 = YL^2 + XL^2 \quad 1.2$$

Da die Einschnürung des Propellerstrahls hier - wie vorausgesetzt - nicht berücksichtigt ist, fließt durch ein Ringelement der Leitapparatebene dieselbe Flüssigkeitsmasse

$$RP \cdot (YP+1) \cdot dRP \quad 2.2$$

wie durch das analoge Ringelement der Propellerebene. Diese Flüssigkeitsmasse erfährt durch die induzierte Geschwindigkeit des Leitapparates einen Impulszuwachs, auf den Leitapparat wird eine entsprechende Kraft und entsprechend der Gleitzahl EL des Leitapparates eine entsprechende Reibungskraft ausgeübt. Es resultiert für das Scheibenelement des Leitrades

das Schubelement

$$dTL = RP \cdot (YP+1) \cdot [YL - YP - EL \cdot (XL - XP)] \cdot dRP \quad 3.2$$

Das Maximum dieses Schubelementes ist erreicht, wenn eine Variation der induzierten Geschwindigkeit keine Schubelementen-

änderung mehr verursacht

$$\mathcal{J}(dTL) = 0 . \quad 4.2$$

Es wird die Kreisgleichung 1.2 variiert

$$YL \cdot \mathcal{J}YL + XL \cdot \mathcal{J}XL = 0 \quad 5.2$$

und die Schubelementengleichung 3.2

$$\mathcal{J}(dTL) = RP \cdot (YP+1) \cdot (\mathcal{J}YL - EL \cdot \mathcal{J}XL) \cdot dRP \quad 6.2$$

Aus den drei Gleichungen 4.2 bis 4.4 resultiert die optimale induzierte Geschwindigkeit des Leitapparates

$$YL = \sqrt{\frac{YP^2 + XP^2}{1 + EL^2}}$$

$$XL = - EL \cdot YL \quad 7.2$$

Das bedeutet, daß die resultierende Austrittsgeschwindigkeit $\overline{GB}$ noch einen kleinen Drall hat; sie ist gegenüber der axialen Richtung um den Winkel EL geneigt. Wenn die aus dem Propeller austretende Geschwindigkeit $\overline{EB}$ schon um diesen oder einen kleineren Winkel geneigt ist, ist ein Leitapparat natürlich ohne Sinn.

Schub- und Drehmomentenelement des Propellers sind wie oben - 2.1 und 3.1 - formuliert. Das resultierende Schubelement beträgt daher

$$dT = dTP + dTL = RP \cdot (YP+1) \cdot \left[\sqrt{(1+EL^2)(YP^2+XP^2)} - 1 + (EP+EL)XP \right] \cdot dRP$$

8.2

das Drehmomentenelement bleibt wie in 3.1.

Durch Variation der durch den Propeller induzierten Geschwindigkeit, durch Variation der Kreisgleichung, der Schubgleichung 5.5, der Drehmomentengleichung 3.1 und durch Erfüllung der Bedingung

$$\frac{\mathfrak{J}(dT)}{\mathfrak{J}(dQ)} = CP \quad 9.2$$

wird, da CP für alle Radien gleich sein soll, die optimale radiale Verteilung der durch den Propeller induzierten Geschwindigkeit gefunden. Da durch Variation von 5.5 die Leitradgeschwindigkeit mit variiert wird, erhält man natürlich eine andere Verteilung der radialen Geschwindigkeit als unter 1. Die Belastung ist nach innen verschoben.

Die Berechnung der resultierenden Werte wird danach wie unter 1. gefunden.

3. Propeller und Leitrad

Das Leitrad findet ebenso wie oben der Leitapparat im vollentwickelten Propellerstrahl die Geschwindigkeit $\overline{EB}$ (Fig. 31) vor, außerhalb des Propellerstrahls die axial gerichtete Geschwindigkeit $\overline{AB} = 1$. Es rotiert mit der Winkelgeschwindigkeit ω_L , und die normierte Umfangsgeschwindigkeit beträgt

$$RL = \frac{r \cdot \omega_L}{V} \quad 1.3$$

Sie ist um den Faktor UE, das Übersetzungsverhältnis, kleiner als die Umfangsgeschwindigkeit des Propellers RP auf demselben Radius RP

$$RL = UE \cdot RP \quad 2.3$$

Der Leitapparat induziert im Innenraum - im Propellerstrahl - die Geschwindigkeit $\overline{LE}$, die im Turbinen- und Propellerteil verschieden gerichtet ist.

XL, YL sind die Koordinaten des Punktes L
 XP, YP " " " " " E

Analog wie oben eine Normalbedingung vorausgesetzt, liegen die Punkte E und L auf einem Kreis mit dem Mittelpunkt H

$$(RL+XL)^2 + YL^2 = (RL+XP)^2 + YP^2 \quad 3.3$$

Durch ein Ringelement des Leitrades fließt, da die Einschnürung des Propellerstrahls nicht in Rechnung gestellt ist, die gleiche Flüssigkeit wie durch das entsprechende Ringelement in der Propellerebene.

$$RP \cdot (YP+1) \cdot dRP \quad 4.3$$

Auf das Ringelement des Leitrades wirkt daher die Schubkraft

$$dTL = RP \cdot (YP+1) \cdot [YL - YP \mp EL \cdot (XL - XP)] \cdot dRP \quad 5.3$$

und das Drehmomentenelement

$$dQL = RP^2 (YP+1) \cdot [XP - XL \pm EL \cdot (YP - YL)] \cdot dRP, \quad 6.3$$

wobei in beiden Formeln das obere Vorzeichen (der Reibungsglieder) für den Turbinen-, das untere für den Propellerteil des Leitrades gilt. Das Drehmomentenelement (oder auch $(XP - XL)$) ist kleiner als Null im Turbinen- und größer als Null im Propellerteil. Da das Leitrad mit einer kleineren Winkelgeschwindigkeit dreht als der Propeller und für die Normierungen die Winkelgeschwindigkeit des Propellers verwendet ist, sind für das normierte Drehmoment und die normierte Drehleistung des Leitrades die Formeln nicht identisch. Sie unterscheiden sich um den Faktor UE, das Übersetzungsverhältnis. Im Folgenden wird statt der Formel 6.3 für das Drehmomentenelement die Formel 6.4 für die Drehleistung verwendet, die Drehleistung jedoch mit QL bezeichnet.

$$dQL = RP \cdot RL \cdot (YP+1) \cdot [XP - XL \pm EL \cdot (YP - YL)] \cdot dRP \quad 7.3$$

Die Formeln 5.3 bis 7.3 gelten jedoch nur für den Innenraum, für den Teil des Leitrades, der im Propellerstrahl liegt; für den Teil, für den die durch ein Ringelement fließende Wassermasse durch 4.3 gegeben ist.

Für den außerhalb des Propellerstrahls liegenden Teil wird 4.3 durch

$$RP \cdot (YL+1) \cdot dRP \quad 8.3$$

ersetzt und für Schub oder Schubleistung und Drehleistung stehen anstelle von 5.3 und 7.3

$$\begin{aligned} dTL &= RP \cdot (YL+1) \cdot [YL-1 + EL \cdot XL] \cdot dRP \\ dQL &= RP \cdot RL \cdot (YL+1) \cdot [-XL - EL \cdot (1-YL)] \cdot dRP \end{aligned} \quad 9.3$$

Der Übergang von 4.3 zu 8.3 verursacht eine Unstetigkeit, die zurückzuführen ist auf die Vernachlässigung der Strahlkonstruktion. Sie stört im Rahmen der eingeführten Vereinfachungen nicht nennenswert. Wichtig erscheint, daß durch Beibehaltung von 4.3 für den Innenraum sichergestellt ist, daß der Energiefluß des Propellerstrahls in der richtigen Größe in das Leitrad eingeführt wird.

Für den Propeller selbst bleiben Geschwindigkeiten und Kraftelemente wie unter 1.

Natürlich muß in allen Fällen sichergestellt sein, daß die resultierende Drehleistung des Leitrades gleich Null ist.

$$\int dQL = 0 \quad 10.3$$

Dann kann die Optimierung beginnen, und zwar am besten mit dem Leitrad. Es wird ein gegebener Propellerstrahl vorausgesetzt und die Frage nach dem dafür optimalen Leitrad gestellt. Es gibt dann zwei Optimierungsbedingungen, die in der Tabelle (Fig. 12) an den Stellen 1 und 4 stehen. Die erste Bedingung, die analog den schon bekannten Bedingungen formuliert ist

$$\frac{\mathcal{J}(dTL)}{\mathcal{J}(dQL)} = CL \quad 11.3$$

stellt die optimale radiale Verteilung der durch das Leitrad induzierten Geschwindigkeit sicher. Wenn CL nicht für alle Radien des Leitrades gleich groß ist, kann bei gleichbleibendem Außendurchmesser des Leitrades und selbstverständlich unter Beibehaltung der Bedingung 10.3 der durch das Leitrad erzeugte Schub vergrößert werden nur durch Änderung der induzierten Geschwindigkeiten derart, daß am Ende das CL nach 11.3 für alle Radien gleich groß ist.

11.3 gilt sowohl für den Turbinen- als auch für den Propeller- teil, es gilt für den Innen- und Außenraum; es gilt jedoch nicht für den Raum zwischen Turbinen- und Propellerteil, in dem das Leitrad unbelastet bleibt.

Für den Innenraum, in dem für die Flüssigkeitsmasse 4.3 gilt, läßt sich diese Bedingung noch explizit ausdrücken.

Es wird die durch das Leitrad induzierte Geschwindigkeit variiert: Zuerst die Kreisgleichung 3.3

$$(R_L + X_L) \cdot \mathcal{J} X_L + Y_L \cdot \mathcal{J} Y_L = 0 \quad 12.3$$

danach die Gleichungen 5.3 und 7.3 für die Kraftelemente

$$\begin{aligned} \mathcal{J}(dT_L) &= R_P \cdot (Y_P + 1) \cdot [\mathcal{J} Y_L + E_L \cdot \mathcal{J} X_L] \cdot dR_P \\ \mathcal{J}(dQ_L) &= R_L \cdot R_P \cdot (Y_P + 1) \cdot [-\mathcal{J} X_L + E_L \cdot \mathcal{J} Y_L] \cdot dR_P \end{aligned} \quad 13.3$$

Wird 13.3 in 11.3 eingeführt und werden danach $\mathcal{J} X_L$ und $\mathcal{J} Y_L$ mittels 12.3 eliminiert, erhält man

$$CL = \frac{-(R_L + X_L) + E_L \cdot Y_L}{R_L \cdot [-Y_L + E_L \cdot (R_L + X_L)]} \quad 14.3$$

oder

$$\frac{R_L + X_L}{Y_L} = \frac{R_L \cdot CL + E_L}{1 + E_L \cdot R_L \cdot CL} \quad 15.3$$

Ergibt 15.3 zusammen mit der Kreisgleichung 3.3 bei Benutzung der oberen Vorzeichen der Reibungsglieder einen Wert X_L , der

größer ist als $XP - (XP - XL)$ daher kleiner als Null), befindet man sich im Turbinenteil, und die so berechneten Koordinaten XL und YL bleiben gültig. Erhält man mit den unteren Vorzeichen einen Wert XL , der kleiner ist als XP , befindet man sich im Propellerteil, und die so berechneten Koordinaten bleiben gültig. Es gibt aber einen Zwischenraum, für den beides nicht zutrifft; dann befindet man sich weder im Turbinen- noch in dem Propeller- teil sondern in dem unbelasteten Zwischenteil. Dann wird gesetzt

$$XL = XP \quad \text{und} \quad YL = YP \quad 16.3$$

und die Optimierungsbedingung 11.3 verliert für diesen Teil ihren Sinn.

Damit ist die Diskussion der ersten Optimierungsbedingung abgeschlossen. Es gibt aber für das Leitrad noch eine zweite Bedingung, nämlich die Bedingung für den optimalen Außendurchmesser, die identisch ist mit der in der Tabelle auf Platz 4 aufgeführten Bedingung des optimalen Verhältnisses $CP:CL$.

Wenn der Außenradius des Leitrades RPM variiert wird, wenn z.B. ein Stück J RPM abgeschnitten, der Radius also verkleinert wird, gehen zunächst ein Schub und ein Drehmomentenelement verloren, und zwar auf Grund von 9.3

$$\begin{aligned} J(TL) &= RP \cdot (YL+1) \cdot [YL-1 + EL \cdot XL] \cdot J_{RPM} \quad \text{für } RP=RPM \\ J(QL) &= RP \cdot RL(YL+1) \cdot [-XL-EL \cdot (1-YL)] \cdot J_{RPM} \quad \text{für } RP=RPM \end{aligned} \quad 17.3$$

Die Drehmomentenbilanz 10.3 muß natürlich erhalten bleiben. Daher muß im übrigen, im bleibenden Leitradteil, das resultierende Drehmoment etwas vergrößert werden, wobei auch eine sehr kleine Änderung von CL notwendig ist. Daraus resultiert ein zusätzlicher Schub, dessen Größe

$$CL \cdot J(QL) \quad 18.3$$

betragen muß. Die resultierende Schubänderung am Leitrad beträgt daher

$$J_T = J(TL) - CL \cdot J(QL) \quad 19.3$$

Diese Schubänderung wird bei einer Verkleinerung des Radius - bei einem negativen $\mathcal{J}$ RPM- zumeist negativ sein. Daraus kann aber noch nicht der Schluß gezogen werden, daß der Leitradradius vergrößert, das Leitrad so groß wie möglich gewählt werden muß. Denn es kommt nicht auf den absoluten Schub sondern auf den Schubbelastungsgrad und den Fortschrittsgrad an. Beide sind auf den Leitraddurchmesser bezogen. Das heißt, die Variation des Leitradradius hat zwar die Schubvariation 19.3 zur Folge, für Schubbelastungs- und Fortschrittsgrad ergeben sich jedoch die Änderungen (siehe 12.1 und 13.1)

$$\mathcal{J}(\text{CT}) = \mathcal{J}\left(\frac{T}{\text{RPM}^2}\right) = \frac{\text{RPM} \cdot \mathcal{J} T - 2 T \cdot \mathcal{J}(\text{RPM})}{\text{RPM}^3} \quad 20.3$$

$$\mathcal{J}(\lambda) = \mathcal{J}\left(\frac{1}{\text{RPM}}\right) = - \frac{\mathcal{J} \text{ RPM}}{\text{RPM}^2} \quad 21.3$$

und für den Wirkungsgrad

$$\mathcal{J} \eta = \eta \cdot \frac{\mathcal{J} T}{T}, \quad 22.3$$

da die mechanisch dem Organ zugeführte Leistung selbstverständlich bei dieser Variation am Leitrad unverändert bleibt. Als Schub T ist in 20.3 und 22.3 selbstverständlich nicht nur der Leitrad Schub, sondern der Schub des gesamten Organs einzuführen. Die durch die Variation des Außenradius RPM verursachten Änderungen 17.3 bis 22.3 können berechnet, und es kann dann an Hand des Diagramms (Fig. 15) beurteilt werden, ob diese Änderungen zu einer Verbesserung der Kurven dieses Diagramms oder zu einer Verschlechterung führen. Die optimale Auslegung hinsichtlich des Außenradius ist dann erreicht, wenn weder eine Verbesserung noch eine Verschlechterung resultiert, wenn die Änderung neutral bleibt. Diese Optimierungsbedingung kann allerdings erst geprüft werden, wenn das ganze Organ ausgelegt und das Diagramm (Fig. 15) bekannt ist. Mehr oder weniger gilt das aber für alle Optimierungsbedingungen, da sie ja alle gleichzeitig erfüllt sein sollen.

Es wird nun die in der Tabelle (Fig. 12) auf Platz 2 stehende Bedingung diskutiert, die aus der Variation der durch den Propeller induzierten Geschwindigkeit resultiert und die zu der optimalen radialen Verteilung dieser Geschwindigkeit führt.

Zunächst können aus 1. die Gleichungen 4.1 bis 6.1 übernommen werden. Es soll hier nur zu den Werten T und Q in 5.1 und 6.1 je ein P hinzugefügt werden, um erkennen zu können, daß es sich um Werte handelt, die direkt am Propeller entstehen. Am Leitrad ändern sich natürlich infolge einer Änderung der durch den Propeller induzierten Geschwindigkeit ebenfalls die Kräfte, so z.B. die Änderung des Schubelements nach 5.3

$$(dT_L) = RP \cdot [J_{YP} \cdot (Y_L - Y_P + EL(X_L - X_P)) + (Y_P + 1) \cdot (J_{YL} - J_{YP} + EL(J_{XL} - J_{XP}))] \cdot dRP$$

23.3

und analog die Änderung des Drehmomentenelementes nach 7.3, wobei J_{XP} und J_{YP} eine unmittelbare Folge der Variation der induzierten Geschwindigkeit sind, während J_{XL} und J_{YL} mittelbar aus der Bedingung 11.3 resultieren und aus 3.3 und 15.3 berechnet werden können. Die gesamte Schubänderung besteht aus drei Teilen

$$J(dT) = J(dTP) + J(dTL) - CL \cdot J(dQL) \quad 24.3$$

der unmittelbaren Änderung am Propeller selbst	$J(dTP)$
der mittelbaren Änderung am Leitrad	$J(dTL)$
und der am Leitrad erzeugten Drehmomentenänderung,	
die nach 11.3 im Propellerteil umgesetzt wird in	
den Schub	$CL \cdot J(dQL)$

Es ändert sich aber auch das am Propeller selbst erzeugte Drehmoment gemäß 6.1. Analog schon angestellten Überlegungen wird die optimale Verteilung der durch den Propeller induzierten Geschwindigkeit erhalten, wenn CP in

$$\frac{J(dT)}{J(dQP)} = \frac{J(dTP) + J(dTL) - CL \cdot (dQL)}{J(dQP)} = CP \quad 25.3$$

für alle Radien des Propellers gleich groß ist.

Eine weitere Optimierungsbedingung erhält man, wenn man bei gleichem Außenradius des Leitrades den Außenradius des Propellers oder das Durchmesser Verhältnis variiert.

Wenn z.B. der Außenradius des Propellers um J_{RP} verkleinert wird, fallen weg

$$J_{TP}, J_{QP}, J_{TL}, J_{QL} \quad 26.3$$

Die ersten beiden Werte werden berechnet direkt aus 2.1 und 3.1, die letzten beiden aus 5.3 und 7.3, wobei in allen Formeln d_{RP} durch J_{RP} ersetzt und alle weiteren Werte für den Außenradius des Propellers eingesetzt werden müssen. Dafür wird der Außenradius des Leitrades um den Betrag J_{RP} größer, und es kommen hinzu die Werte

$$J_{TL}, J_{QL}, \quad 27.3$$

die wie in 17.3 berechnet werden, nur daß nun nicht der Außenradius des Leitrades, sondern der Außenradius des Propellers genommen werden muß.

Insgesamt erhält man die resultierende Schubänderung

$$J_T = J(TP) + J(TL)_1 - J(TL)_2 - CL \cdot [J(QL)_1 - J(QL)_2], \quad 28.3$$

wobei die Leitradwerte nach 26.3 mit dem Index 1, die nach 27.3 mit dem Index 2 bezeichnet sind. Und man erhält die Drehmomentenänderung am Propeller. Offenbar muß auch für diese Variation gelten

$$\frac{J_T}{J_{QP}} = CP, \quad 29.3$$

da man sonst durch Einleitung des Drehmomentes an anderen Radien des Propellers nach 25.3 eine Vergrößerung oder Verkleinerung des resultierenden Schubes erhalten würde, während im optimalen Falle auf diesem Wege keine Veränderung erzielt werden darf.

Damit sind alle Optimierungsbedingungen diskutiert bis auf die für das Drehzahlverhältnis, die aber nur durch Probieren gefunden werden kann.

Praktisch werden die Berechnungen wie folgt ausgeführt:
Es werden willkürlich 4 Werte vorgegeben

UE das Übersetzungsverhältnis
CP die Konstante nach 25.3 und 29.3 30.3
CL die Konstante nach 11.3
und ein Radius RP für die Flügelspitzen des Propellers

Damit können die Berechnungen ausgeführt werden. Der Außenradius des Leitrades resultiert dann aus der Forderung 10.3. Die Bedingungen der Tabelle (Fig. 12), Platz 3 und 4, sind dann noch nicht erfüllt. Die Berechnungen werden wiederholt für verschiedene Radien RP der Flügelspitzen des Propellers unter Beibehaltung der ersten drei Werte 30.3, bis die Bedingung 29.3 (Tabelle Platz 3) erfüllt ist. Dann ist nur noch die Bedingung (Tabelle Platz 4) nicht explizit erfüllt. Sie kann erfüllt werden, indem die Berechnungen auch noch für verschiedene Verhältnisse CL:CP ausgeführt werden. Es hat sich jedoch gezeigt, daß das nicht mehr viel bringt.

Damit wäre dieser Punkt, Berechnung von Propeller und Leitrad, abgeschlossen. Es hat sich jedoch gezeigt, daß durch diese Optimierung die Belastung sehr stark nach innen zu den kleinen Radien verschoben wird. Da an diesen Radien möglicherweise die dafür notwendige Flügelfläche nicht untergebracht werden kann, wurde - zunächst etwas willkürlich - eine Begrenzung eingeführt. Es wurde ein XP berechnet

$$XP = -2 \cdot \frac{(1-EP \cdot RP \cdot CP) \cdot (RP-EP \cdot RP^2 \cdot CP-RP \cdot CP)}{1 + RP^2 \cdot CP^2} , \quad 31.3$$

und dieses XP und die daraus resultierende, durch den Propeller induzierte Geschwindigkeit gewählt, wenn die Optimierungsbedingung 25.3 zu einem kleineres XP und damit zu einer größeren Geschwindigkeit geführt hätte. Diese Optimierungsbedingung wurde

dann für diesen Radius außer Kraft gesetzt; das wirkte an den inneren Radien im Sinne einer Entlastung. Durch Spielen mit dem Zahlenfaktor 31.3 wurde gefunden, daß eine nennenswerte Einbuße erst erzielt wurde, wenn anstelle von 2 in 31.3 der Faktor 1.5 oder ein kleinerer Faktor gesetzt wurde.

Für dieses Beispiel P+LR wird die Leistungsbilanz besprochen und dabei die Verluste analysiert.

In dem Strahl weit hinter dem Organ existieren die Geschwindigkeiten XL und (YL-1). Die kinetischen Verluste betragen daher für ein Ringelement

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \cdot RP \cdot (YP+1) \cdot (YL-1)^2 \, dRP \\ \text{und} \quad & \frac{1}{2} \cdot RP \cdot (YP+1) \cdot XL^2 \, dRP \end{aligned} \quad 32.3$$

im Innenraum und

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \cdot RP \cdot (YL+1) \cdot (YL-1)^2 \, dRP \\ & \frac{1}{2} \cdot RP \cdot (YL+1) \cdot XL^2 \, dRP \end{aligned} \quad 33.3$$

im Außenraum, verursacht durch die axiale und tangential Komponente der Austrittsgeschwindigkeit.

Die Reibungsverluste am Propeller betragen

$$\begin{aligned} & -RP \cdot (YP+1) \cdot EP \cdot XP \, dRP \\ \text{und} \quad & RP^2 \cdot (YP+1) \cdot EP \cdot (YP-1) \, dRP \end{aligned} \quad 34.3$$

infolge der Komponenten der Reibungskraft in axialer (Schubverlust) und tangentialer Richtung (Drehmomentenverlust).

Die Reibungsverluste am Leitrad betragen

$$\begin{aligned} & + RP \cdot (YP+1) \cdot EL \cdot (XL-XP) \, dRP \\ \text{und} \quad & + RP \cdot RL \cdot (YP+1) \cdot EL \cdot (YP-YL) \, dRP \end{aligned} \quad 35.3$$

im Innenraum, wobei wie oben das obere Vorzeichen für den Turbinen-, das untere für den Propellerteil gilt, sowie

$$-RP \cdot (YL+1) \cdot EL \cdot XL \, dRP$$

36.3

$$\text{und } RP \cdot RL \cdot (YL+1) \cdot EL \cdot (YL-1) \, dRP$$

für den Außenraum.

Alle Ausdrücke sind dank der Normierung auch Leistungselemente. Integriert über den Propeller bzw. Leitradradius ergeben sie zusammen die gesamte Verlustleistung, und diese Verlustleistung zusammen mit der gesamten Schubleistung

$$\int_{\text{Propeller}} dTP + \int_{\text{Leitrad}} dTL$$

37.3

muß die gesamte Drehleistung des Propellers ergeben.

$$\int_{\text{Propeller}} dQP$$

38.3

Das trifft auch zu.

4. Gegenläufiger Propeller

Für den ersten, vorderen Propeller dieses Organs werden die Formeln von Punkt 1. übernommen. Der zweite, der hintere Propeller findet im Propellerstrahl wie der Leitapparat oder das Leitrad die Geschwindigkeit $\overline{EB}$ vor. Er induziert die Geschwindigkeit $\overline{LE}$ (Fig. 32), wobei wieder zur Bestimmung der Richtung der induzierten Geschwindigkeit eine Normalbedingung vorausgesetzt ist. Es wird auch hier die Strahleinschnürung nicht beachtet und damit gerechnet, daß die Flüssigkeitsmasse

$$RP \cdot (YP+1) \, dRP$$

1.4

sowohl durch das Scheibenelement RP , dRP des vorderen Propellers

als auch durch das Scheibenelement RP, dRP des hinteren Propellers fließt. Die Koordinaten des Punktes L werden mit XL, YL bezeichnet. Es gilt für den hinteren Propeller die 2. Kreisgleichung

$$Y_P^2 + (R_P - X_P)^2 = Y_L^2 + (R_P - X_L)^2 \quad 2.4$$

und es gelten die Kraftgleichungen

$$\begin{aligned} dT_h &= R_P(Y_P+1) \cdot [Y_L - Y_P - EP \cdot (X_L - X_P)] \cdot dR_P \\ dQ_h &= R_P^2(Y_P+1) \cdot [X_L - X_P + EP \cdot (Y_L - Y_P)] \cdot dR_P \end{aligned} \quad 3.4$$

Zuerst wird die durch den hinteren Propeller induzierte Geschwindigkeit variiert. Aus der Kreisgleichung 2.4 und den Kraftgleichungen 3.4 folgt

$$\begin{aligned} Y_L \cdot J Y_L - (R_P - X_L) \cdot J X_L &= 0 \\ J(dT_h) &= R_P \cdot (Y_P+1) \cdot [J Y_L - EP \cdot J X_L] \cdot dR_P \\ J(dQ_h) &= R_P^2(Y_P+1) \cdot [J X_L + EP \cdot J Y_L] \cdot dR_P \end{aligned} \quad 4.4$$

und mittels der Optimierungsbedingung für die durch den hinteren Propeller induzierte Geschwindigkeit

$$\frac{J(dT_h)}{J(dQ_h)} = CP \quad 5.4$$

folgt

$$CP = \frac{R_P - X_L - EP \cdot Y_L}{R_P \cdot [Y_L + EP \cdot (R_P - X_L)]} \quad 6.4$$

oder
$$\frac{R_P - X_L}{Y_L} = \frac{EP + R_P \cdot CP}{1 - EP \cdot R_P \cdot CP}$$

und daraus und der Kreisgleichung resultieren XL und YL z.B.

$$Y_L^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{EP + R_P \cdot CP}{1 - EP \cdot R_P \cdot CP} \right)^2 \right] = Y_P^2 + (R_P - X_P)^2 \quad 7.4$$

Hieraus kann evtl. auch eine Grenze für den Durchmesser des hinteren Propellers bestimmt werden. Sie ist erreicht, wenn 7.4 zu

YL=YP führt.

Aus 2.1 und 3.4 setzen sich die resultierenden Kraftelemente zusammen

$$\begin{aligned}dT_{\text{res}} &= dT_v + dT_h = RP \cdot (YP+1) \cdot \left[YL-1+EP \cdot (2 \cdot XP-XL) \right] \cdot dRP \\dQ_{\text{res}} &= dQ_v + dQ_h = RP^2 \cdot (YP+1) \cdot \left[XL-2 \cdot XP+EP \cdot (YL-1) \right] \cdot dRP\end{aligned}\tag{8.4}$$

wobei XL und YL schon durch 7.4 und 6.4 als Funktionen von XP, YP der Koordinaten der durch den vorderen Propeller induzierten Geschwindigkeit bestimmt sind.

Für diese resultierenden Kräfte bzw. die Bestimmung der durch den vorderen Propeller induzierten optimalen Geschwindigkeit ist eine analoge Optimierungsbedingung wie 5.4 gültig

$$\frac{\delta (dT_{\text{res}})}{\delta (dQ_{\text{res}})} = CP\tag{9.4}$$

Diese Bedingung, die Kraftgleichungen 8.4, die Kreisgleichung 1.1 führen zu der optimalen radialen Verteilung der induzierten Geschwindigkeit des vorderen Propellers.

Es wird ein Wert CP und ein Außenradius vorgegeben. Damit wird die Berechnung ausgeführt, die zu den Kräften, dem Wirkungs-, Schubbelastungs- und Fortschrittsgrad wie unter Punkt 1. führt.

5. Ruder als Leitapparat

Dieser Punkt sowie die folgenden beiden werden in engster Anlehnung an die von Isay beschriebene Methode (W.H. Isay, Moderne Probleme der Propellertheorie, Seite 67 usw.) behandelt. Auch werden hier, anders als in der übrigen Arbeit, die von Isay verwendeten Bezeichnungen benutzt.

Der Ruderwinkel δ wird hier Null gesetzt, auch wird kein Nachstrom vorausgesetzt. Die Randbedingung (Isay (89)) lautet dann

$$W_P(y) + W_R(y) = 0 \quad 1.5$$

wobei $W(y)$ Geschwindigkeiten quer zur Ruderebene sind, und zwar $W_P(y)$ die der ankommenden rotationssymmetrisch vorausgesetzten Anströmung und $W_R(y)$ die vom Ruder induzierte. Mit der Zirkulation Γ_R des das Ruder darstellenden gebundenen Wirbels wird aus 1.5 (bzw. Isay (90))

$$-W_P(y) = \frac{1}{4\pi} \cdot \int_{-b}^{+b} \frac{d\Gamma_R(\eta)}{d\eta} \cdot \frac{1}{y-\eta} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{y-\eta}{a}\right)^2}\right) \cdot d\eta \quad 2.5$$

wobei a und b die Seitenlängen des rechteckförmigen Ruders und y die Koordinate in Richtung der Ruderachse bezeichnen (Fig.).

Die am Ruder infolge der Leitwirkung erzeugte Kraft in x-Längsrichtung beträgt (Isay (91)):

$$K_x^R(y) = -\rho \cdot \left[W_P(y) - \frac{1}{4\pi} \int_{-b}^{+b} \frac{d\Gamma_R(\eta)}{d\eta} \cdot \frac{d\eta}{y-\eta} \right] \cdot \Gamma_R(y) \quad 3.5$$

Isay nimmt eine rotationssymmetrische Drallströmung - ein $W_P(y)$ - an, berechnet aus 2.5 die dadurch erzeugte Zirkulation Γ_R und danach die Kraft K_x . Hier wird in teilweiser Umkehr dieses Weges eine Zirkulation angenommen

$$\Gamma_R(y) = A \cdot \frac{y}{a} \cdot \left[\left(\frac{y}{a}\right)^2 - \left(\frac{b}{a}\right)^2 \right] \quad 4.5$$

dafür aus 2.5 die Drallgeschwindigkeit $W_P(y)$ und danach aus 3.5 die Kraft berechnet.

Wenn die Geschwindigkeit in axialer Richtung der ankommenden rotationssymmetrischen Drallströmung wie bei Isay mit u bezeichnet und für den ganzen Querschnitt als gleich groß vorausgesetzt wird, beträgt die in dem Drall enthaltene ankommende (Drall-) Leistung

$$\rho \cdot \int_0^b 2\pi y u \cdot \frac{w_p^2(y)}{2} dy \quad 5.5$$

und die durch die Leitwirkung gewonnene Schubleistung

$$u \cdot K_x^R = u \cdot \int_{-b}^{+b} K_x^R(y) \cdot dy \quad 6.5$$

Wenn man 6.5 durch 5.5 dividiert, erhält man den im Vortragstext als "ideellen Wirkungsgrad des Ruders" bezeichneten Wert. Hierbei fällt die Geschwindigkeit u weg und auch der Faktor A in 4.5, der die Intensität der Leitwirkung bzw. der Drallströmung bezeichnet, da dieses A dann sowohl im Zähler als auch im Nenner mit der 2. Potenz steht.

Reibungskräfte am Ruder sind hierbei nicht in Rechnung gestellt, da das Ruder als Manövrierorgan sowieso vorhanden ist und die Leitwirkung daher als Nebenprodukt, das nicht nochmals mit den Reibungsverlusten belastet zu werden braucht, abfällt.

Eine Reduktion des ideellen Wirkungsgrades ist jedoch erforderlich. Das Ruder liegt in dem Propellerstrahl, die Geschwindigkeit u ist daher größer als die Fahrtgeschwindigkeit. Das Ruder liegt in einem negativen Nachstrom.

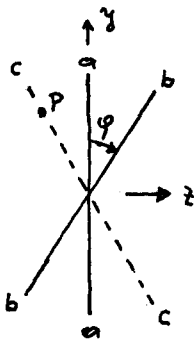
Es ist zwar richtig, die Dralleistung wie in 5.5 mit der Geschwindigkeit u zu berechnen. Die Schubleistung, die dem Schiffsantrieb zugute kommt, muß jedoch anstelle von u mit der kleineren Fahrgeschwindigkeit berechnet werden. Es ist also der ideelle Wirkungsgrad noch mit dem Faktor

$$\frac{V}{u}$$

der kleiner als Eins und von der Propellerbelastung abhängig ist, zu multiplizieren. (Das Ruder liegt in einem negativen Nachstrom; Nachstromziffer = $1 - \frac{u}{V}$).

6. Leitapparat mit endlicher Flügelzahl

Die unter 5. beschriebene Untersuchung kann erweitert werden. Wenn zusätzlich zu dem Flügel a-a in $z=0$ (dem Ruder) ein weiterer Flügel b-b, der um den Winkel φ gedreht, aber sonst identisch ist, in der Drallströmung liegt, muß 1.5 bzw. 2.5 erweitert werden. Anstelle von 1.5 wird geschrieben



$$W_p(y) + W_a(y) + W_b(y) = 0$$

1.6

Die durch den Flügel a-a induzierte Geschwindigkeit ist identisch mit der oben durch ein Ruder induzierten Geschwindigkeit; die durch den Flügel b-b induzierte Geschwindigkeit $W_b(y)$ an dem Flügel a-a ist identisch mit der durch den Flügel a-a an einem hypothetischen Flügel c-c induzierten Geschwindigkeit senkrecht zu diesem Flügel.

Das von dem in der y-Achse liegenden gebunden Wirbel und den hierzu gehörenden freien Wirbeln induzierte Geschwindigkeitsfeld ist von Isay in den Formeln (88) angegeben. An dem Punkt P des Flügels c-c liefert dieses Geschwindigkeitsfeld die Quergeschwindigkeit

$$W_R \cdot \cos \varphi + v_R \cdot \sin \varphi$$

2.6

wobei W_R und v_R mittels der genannten Formeln bestimmt sind für die Koordinaten

$$X = X_0 + a$$

$$y = r \cdot \cos \varphi$$

$$z = -r \sin \varphi$$

$$\varepsilon = \frac{a}{2}$$

3.6

Aus 2.6 wird damit

$$\begin{aligned} & - \frac{1}{4\pi} \cdot \int_{-b}^{+b} \Gamma_R(\eta) \cdot \frac{a \cdot \cos \varphi}{(a^2 + r^2 + \eta^2 - 2r\eta \cos \varphi)^{3/2}} \cdot d\eta - \\ & - \frac{1}{4\pi} \cdot \int_{-b}^{+b} \frac{d\Gamma_R(\eta)}{d\eta} \cdot \frac{r - \eta \cos \varphi}{r^2 + \eta^2 - 2r\eta \cos \varphi} \cdot \left[1 + \frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2 + \eta^2 - 2r\eta \cos \varphi}} \right] \cdot d\eta \end{aligned} \quad 4.6$$

und dies ist identisch mit

$$\begin{aligned} & - \frac{1}{4\pi} \cdot \int_{-b}^{+b} \frac{d\Gamma_R(\eta)}{d\eta} \cdot \left\{ \frac{r - \eta \cos \varphi}{r^2 + \eta^2 - 2r\eta \cos \varphi} + \right. \\ & \left. + \left[\frac{r - \eta \cos \varphi}{r^2 + \eta^2 - 2r\eta \cos \varphi} + \frac{\cos \varphi \cdot (r \cos \varphi - \eta)}{a^2 + r^2 \sin^2 \varphi} \right] \cdot \frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2 + \eta^2 - 2r\eta \cos \varphi}} \right\} d\eta \end{aligned} \quad 5.6$$

Dies ist die von dem Flügel a-a an der Linie c-c erzeugte Geschwindigkeit. Gebrauchte wird für die Bedingung 1.6 die von dem Flügel b-b an der Linie a-a erzeugte Geschwindigkeit, und diese ist identisch mit 5.6, wenn nur r durch y ersetzt.

Die dann aus 1.6 mit der gleichen Zirkulationsverteilung wie unter 5. errechnete Geschwindigkeit $W_p(y)$ der Drallgeschwindigkeit ist natürlich größer als die in Punkt 5. berechnete, von einem Flügel "erzeugte" Drallgeschwindigkeit.

Die Berechnung der Längs-(= Schub-)Kraft am Flügel a-a führt auf

6.6

$$K_x(y) = -\rho \cdot \left[W_p(y) - \frac{1}{4\pi} \cdot \int_{-b}^{+b} \frac{d\Gamma_R(\eta)}{d\eta} \cdot \frac{d\eta}{y - \eta} + W_b(y) \right] \cdot \Gamma_R(y)$$

d.h. es muß wieder gegenüber 3.5 die von dem Flügel b-b an dem Flügel a-a erzeugte Quergeschwindigkeit hinzugefügt werden. Diese Geschwindigkeit ist jedoch nicht exakt dieselbe wie sie in 5.6 berechnet ist, denn 5.6 gilt entsprechend der erweiterten Traglinientheorie für den 3/4 Punkt des Profils, während für die Kraftberechnung in 6.6 die Quergeschwindigkeit an dem 1/4 Punkt des Profils gebraucht wird. Dies führt auf

$$K_x(y) = -\rho \cdot \left\{ W_p(y) - \frac{1}{4\pi} \int_{-b}^{+b} \frac{d\Gamma_R(\eta)}{d\eta} \cdot \left[\frac{1}{y-\eta} + \frac{y-\eta \cos \varphi}{y^2 + \eta^2 - 2y\eta \cos \varphi} \right] d\eta \right\} \cdot \Gamma_R(y)$$

7.6

Selbstverständlich sind für einen Leitapparat mit einer größeren Zahl von Flügeln weitere Glieder $W_b(y)$ in 1.6 und 6.6 zu addieren und selbstverständlich wirkt die Kraft $K_x(y)$ an jedem Flügel(paar).

Die weitere Berechnung läuft sinngemäß wie unter Punkt 5.

7. Leitapparat mit unendlich vielen Flügeln

Es ist interessant, die unter Punkt 5. und 6. für endliche Flügelzahlen ausgeführten und auf einer Wirbeltheorie fußenden Berechnungen in einem Grenzübergang überzuführen auf den Fall unendlich vieler Flügel oder einer rotationssymmetrischen Strömung und die Ergebnisse dazu den oben unter Punkt 2. erhaltenen Ergebnissen gegenüberzustellen. Aus der Randbedingung 1.6 zur Bestimmung der Drallgeschwindigkeit wird

$$W_p(y) - \frac{1}{4\pi} \int_{-b}^{+b} \frac{d\Gamma_R(\eta)}{d\eta} \cdot d\eta \int_0^{\pi} \left\{ \frac{y - \eta \cos \varphi}{y^2 + \eta^2 - 2y\eta \cos \varphi} + \right. \\ \left. + \left[\frac{y - \eta \cos \varphi}{y^2 + \eta^2 - 2y\eta \cos \varphi} + \frac{\cos \varphi \cdot (y \cos \varphi - \eta)}{a^2 + y^2 \sin^2 \varphi} \right] \cdot \frac{a}{\sqrt{a^2 + y^2 + \eta^2 - 2y\eta \cos \varphi}} \right\} \cdot d\varphi = 0 \quad 1.7$$

und aus 7.6 für die Bestimmung der Längskraft

$$K_x = -\rho \pi \int_{-b}^{+b} \left\{ W_p(y) - \frac{1}{4\pi} \int_{-b}^{+b} \frac{d\Gamma_R(\eta)}{d\eta} \cdot d\eta \int_0^{\pi} \frac{y - \eta \cos \varphi}{y^2 + \eta^2 - 2y\eta \cos \varphi} d\varphi \right\} \cdot \Gamma_R(y) dy \quad 2.7$$

wobei durch die Multiplikation mit π erreicht ist, daß nun die resultierende Kraft auf alle Flügel bestimmt ist. Die Multiplikation nur mit π und nicht mit 2π ist ebenso wie die Integration nur über π darauf zurückzuführen, daß wie unter den Punkten 5. und 6. als ein Flügel immer ein Flügelpaar gemeint ist, d.h. ein Flügel, der von $y = -b$ bis $y = +b$ reicht.

Die Berechnung auf dieser Basis wurde ausgeführt und sie lieferte tatsächlich einen ideellen Wirkungsgrad von 100 %. Erinnert wird hier daran, daß Reibungsverluste nicht in Rechnung gestellt sind, sowie daß auch dieser Wirkungsgrad noch mit dem Reduktionsfaktor 7.5 multipliziert werden muß.

Nun wird dieses Ergebnis dem unter Punkt 2. auf einem anderen, einfacheren Wege erhaltenen Ergebnis gegenübergestellt. Selbstverständlich muß dafür auch in den dort erhaltenen Formeln die Reibung weggelassen werden, 8.2 gab an das Schubelement, das von dem ganzen Organ P+LA erzeugt wird

$$RP \cdot (YP+1) \cdot \left[\sqrt{YP^2 + XP^2} - 1 \right] \cdot dRP \quad 3.7$$

Da an dem Propeller des Organs das Schubelement 2.1

$$RP \cdot (YP+1) \cdot (YP-1) \cdot dRP \quad 4.7$$

erzeugt wird, erzeugt der Leitapparat die Differenz der beiden Werte

$$dTL = RP \cdot (YP+1) \cdot \left[\sqrt{YP^2 + XP^2} - YP \right] \cdot dRP \quad 5.7$$

Das ist dank der Normierung identisch mit der durch den Leitapparat erzeugten Schubleistung. Die gesamte Dralleistung, bezogen auf das gleiche Ringelement, beträgt Masse pro Zeiteinheit

$$RP \cdot (YP+1) \cdot dRP \quad 6.7$$

mal $\frac{1}{2}$ mal Quadrat der Drallgeschwindigkeit, die der Propeller hinterläßt und die den Leitapparat trifft

$$\frac{1}{2} XP^2 \quad 7.7$$

d.h. die Dralleistung pro Ringelement beträgt

$$\frac{1}{2} \cdot RP \cdot (YP+1) \cdot XP^2 \cdot dRP \quad 8.7$$

Bildet man für das Ringelement entsprechend der oben benutzten Definition einen ideellen Wirkungsgrad, erhält man 5.7 durch 8.7, d.h.

$$\frac{\sqrt{YP^2 + XP^2} - YP}{XP^2/2} \quad 9.7$$

Für kleinere Verhältnisse XP/YP , d.h. für einen schwachen Drall, beträgt dieses Verhältnis

$$\frac{1}{YP} \quad 10.7$$

und es wird für einen starken Drall kleiner. Dieser Bruch ist identisch mit dem Reduktionsfaktor 7.5, da in Punkt 2. vorausgesetzt ist, daß der Propellerstrahl vor dem Leitapparat voll-

entwickelt ist und da Y_P die mit der Fahrtgeschwindigkeit V normierte axiale Geschwindigkeit des vollentwickelten Propellerstrahls ist.

Die Übereinstimmung der auf völlig verschiedenen Wegen erhaltenen Ergebnisse ist daher nahezu vollständig, die Brauchbarkeit der benutzten einfachen Methode hierdurch für P+LA bestätigt.

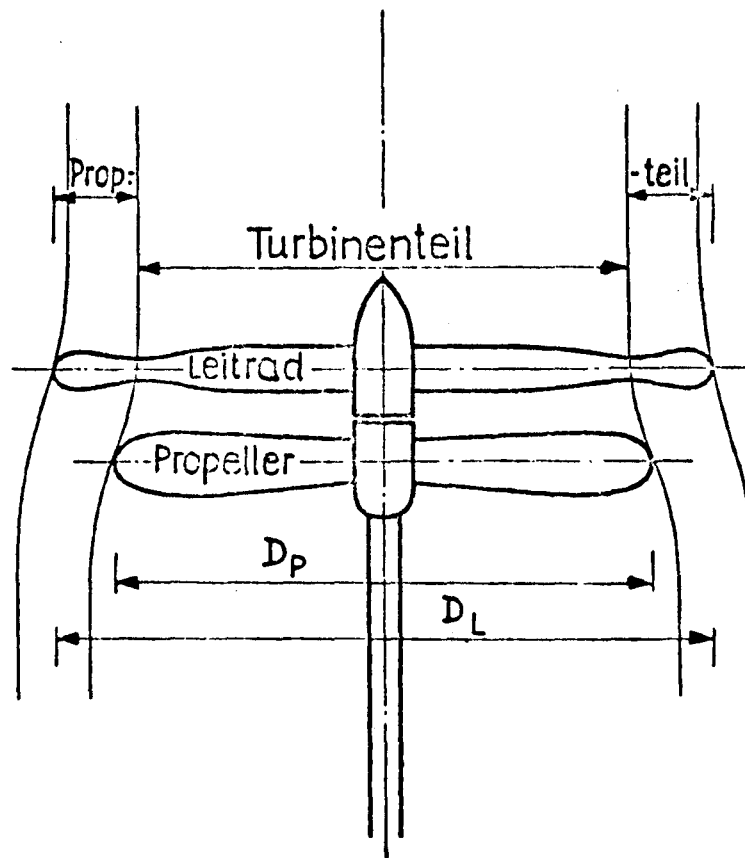


Bild 1 Propeller und rotierendes Leitrad

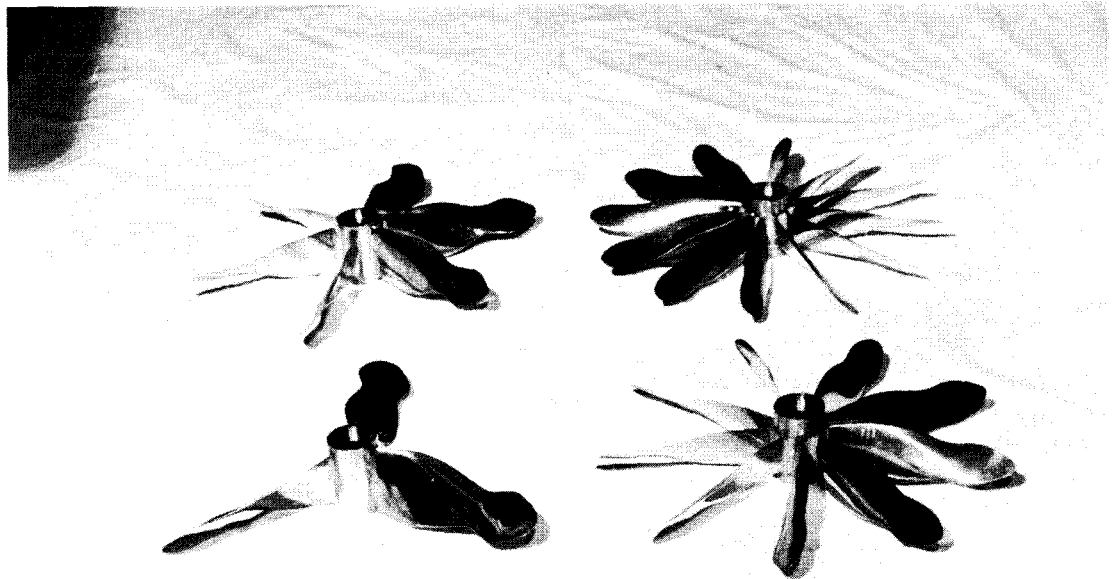


Bild 2 Leiträder mit 3; 6; 9; 12 Flügeln

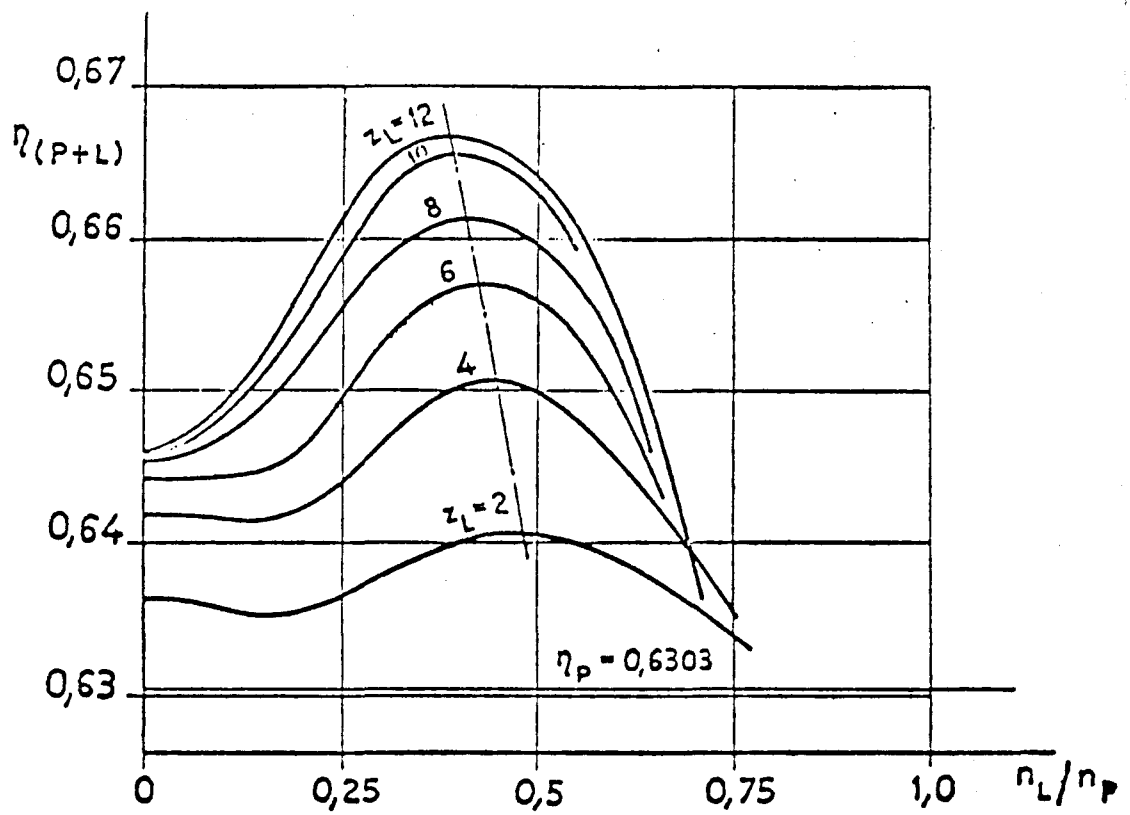


Abb. 3 Flügel des Leitrades auf Festigkeit und Kavitation berechnet für $v = 8 \text{ m/sec}$

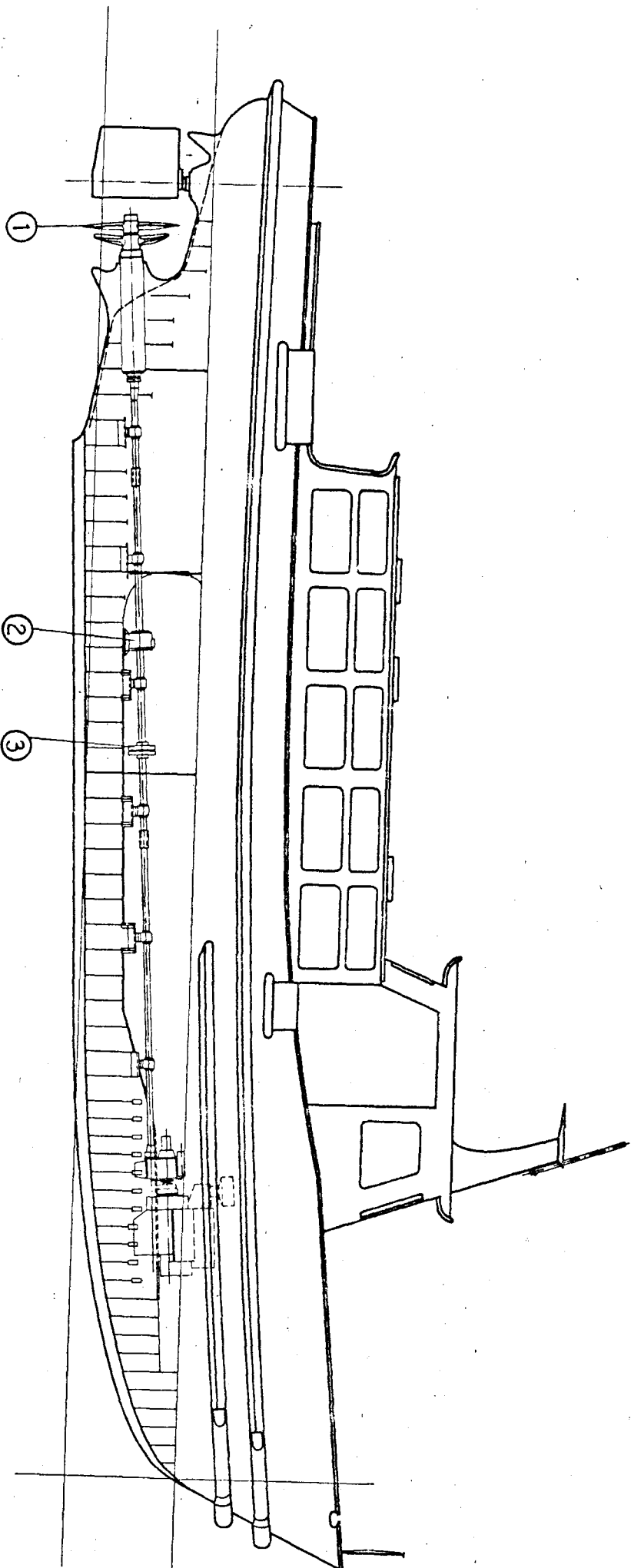


Abb.4

Ansicht der Barkasse 'HDW 1' mit Propeller und Leitrad

① = Leitrad , ② = SIMPLEX - Schubmeßgerät , ③ = MAIHAK - Torsionsindikator

Abb. 5

Ergebnisse der Propulsionsmessungen mit 'HDW 1'; Schub und Leistung über Drehzahl

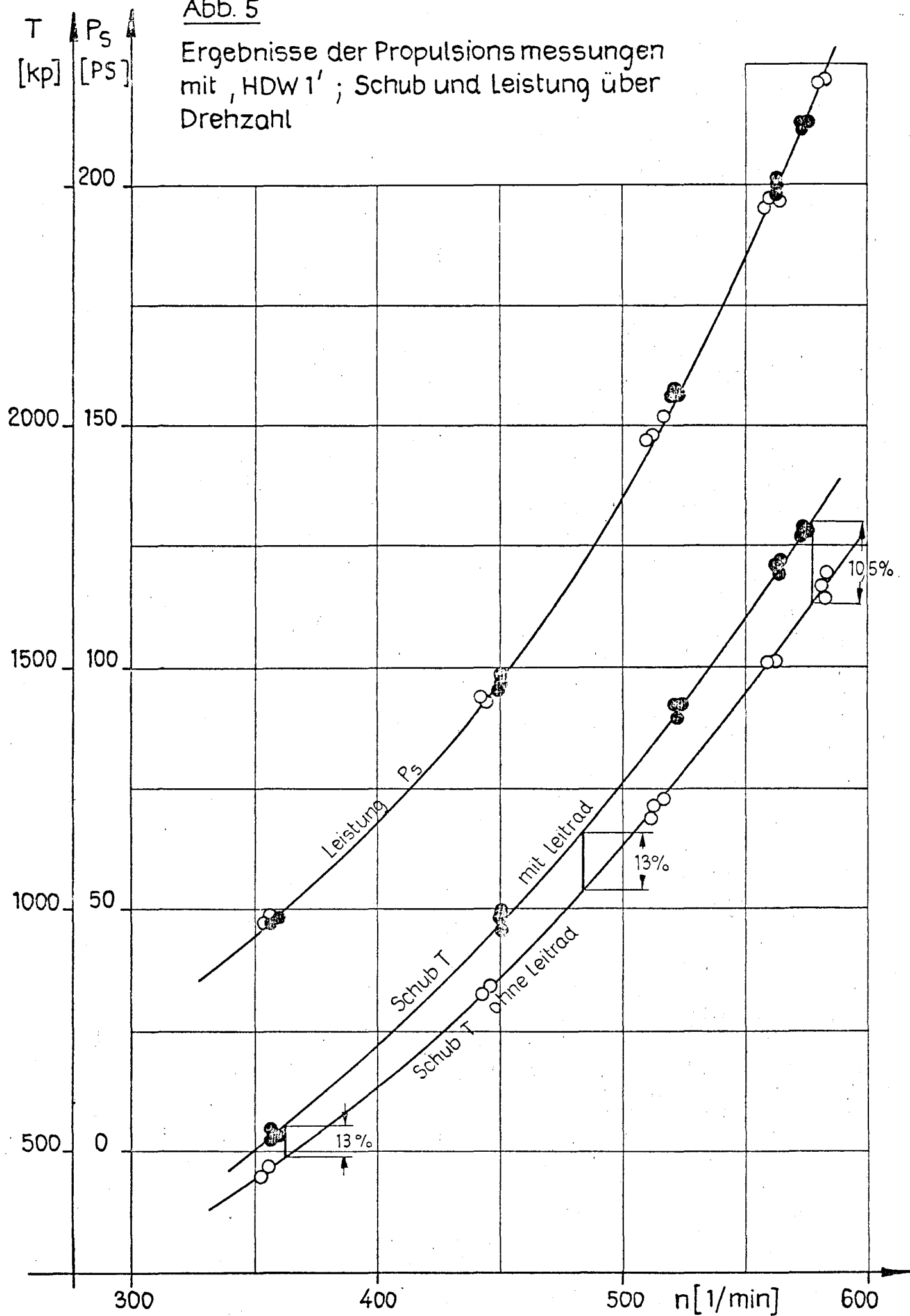


Abb. 6 Massengutschiff

$L = 243 \text{ m}$
 $B = 32.2 \text{ m}$
 $T = 12.8 \text{ m}$
 $D = 83150 \text{ m}^3$
 $\delta = 0.831$
 $v = 15.6 \text{ kn}$
 $P = 16800 \text{ PS bei}$
 $n = 105 \text{ U/min}$
 Leitradurchmesser
 $D_L = 8.15 \text{ m}$
 Ausgeführter Propeller
 $D_P = 6.6 \text{ m}$

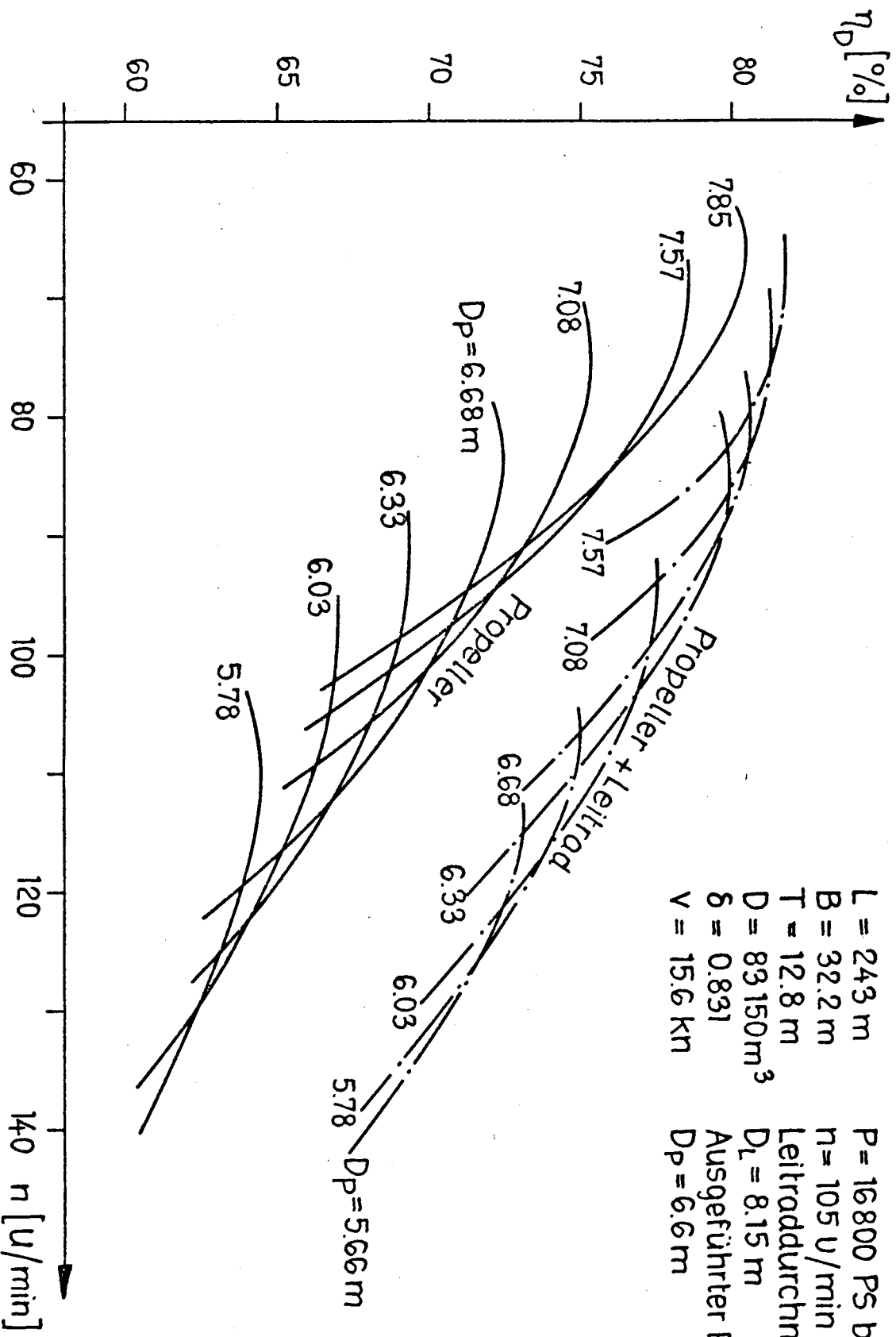


Fig. 7

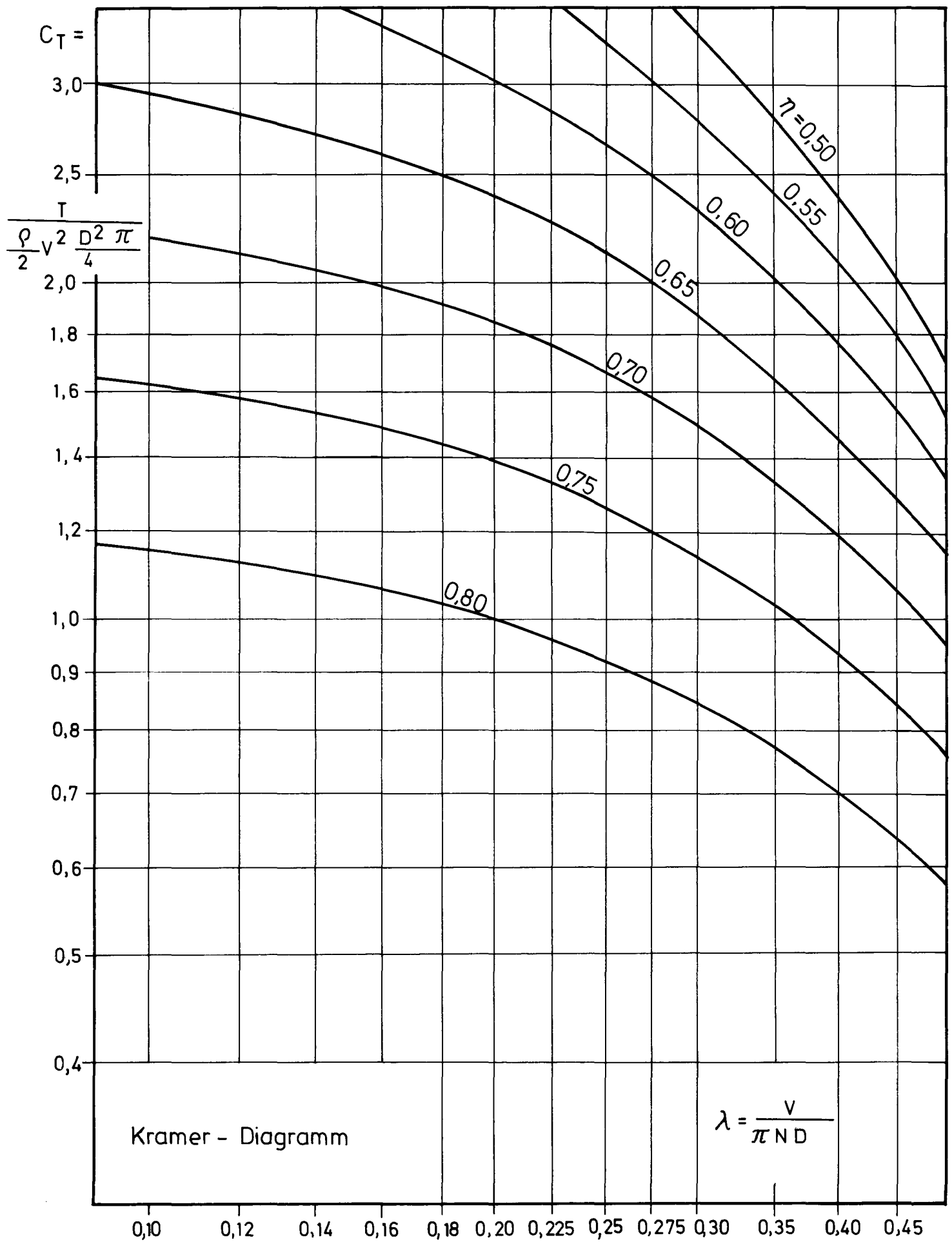


Fig. 8

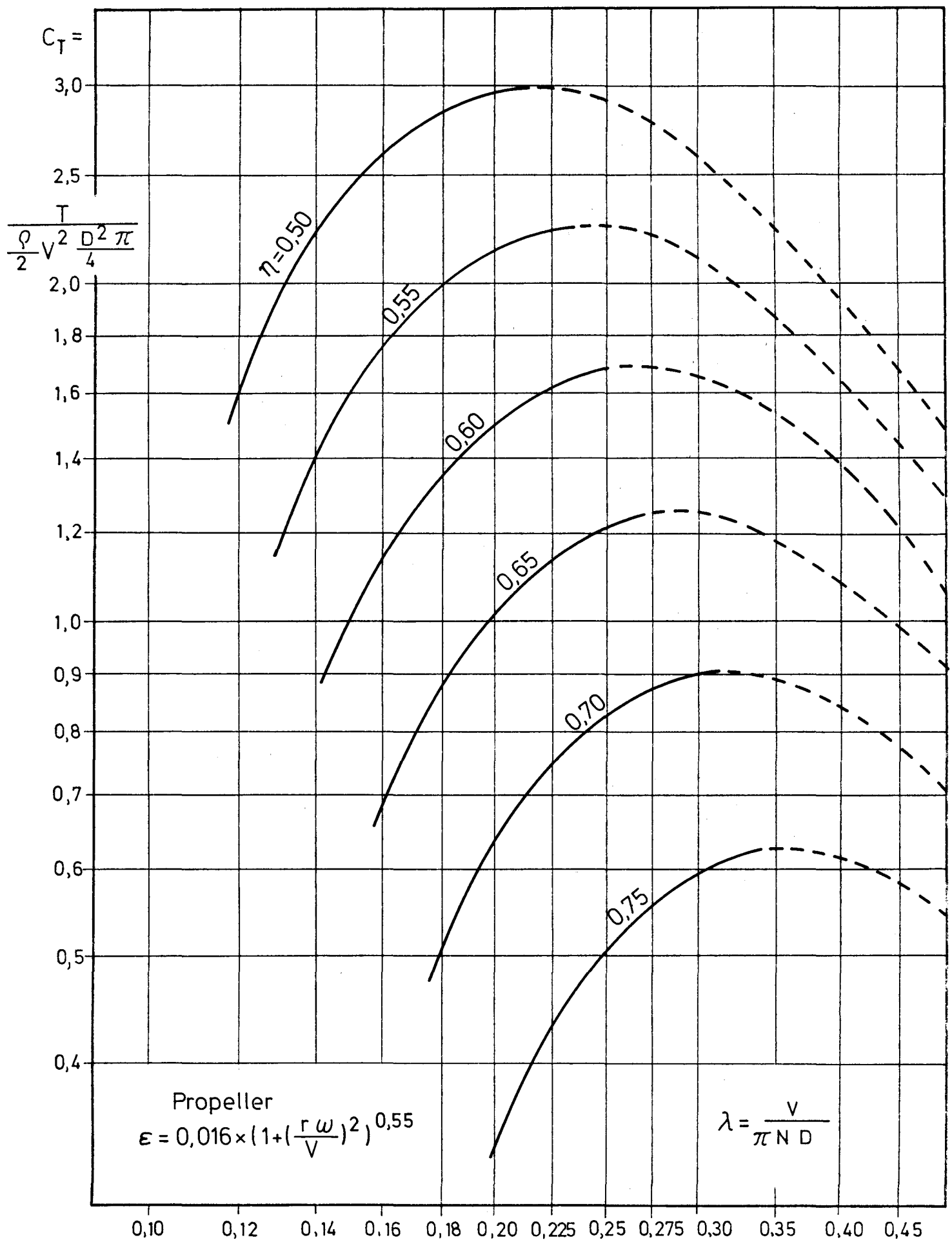
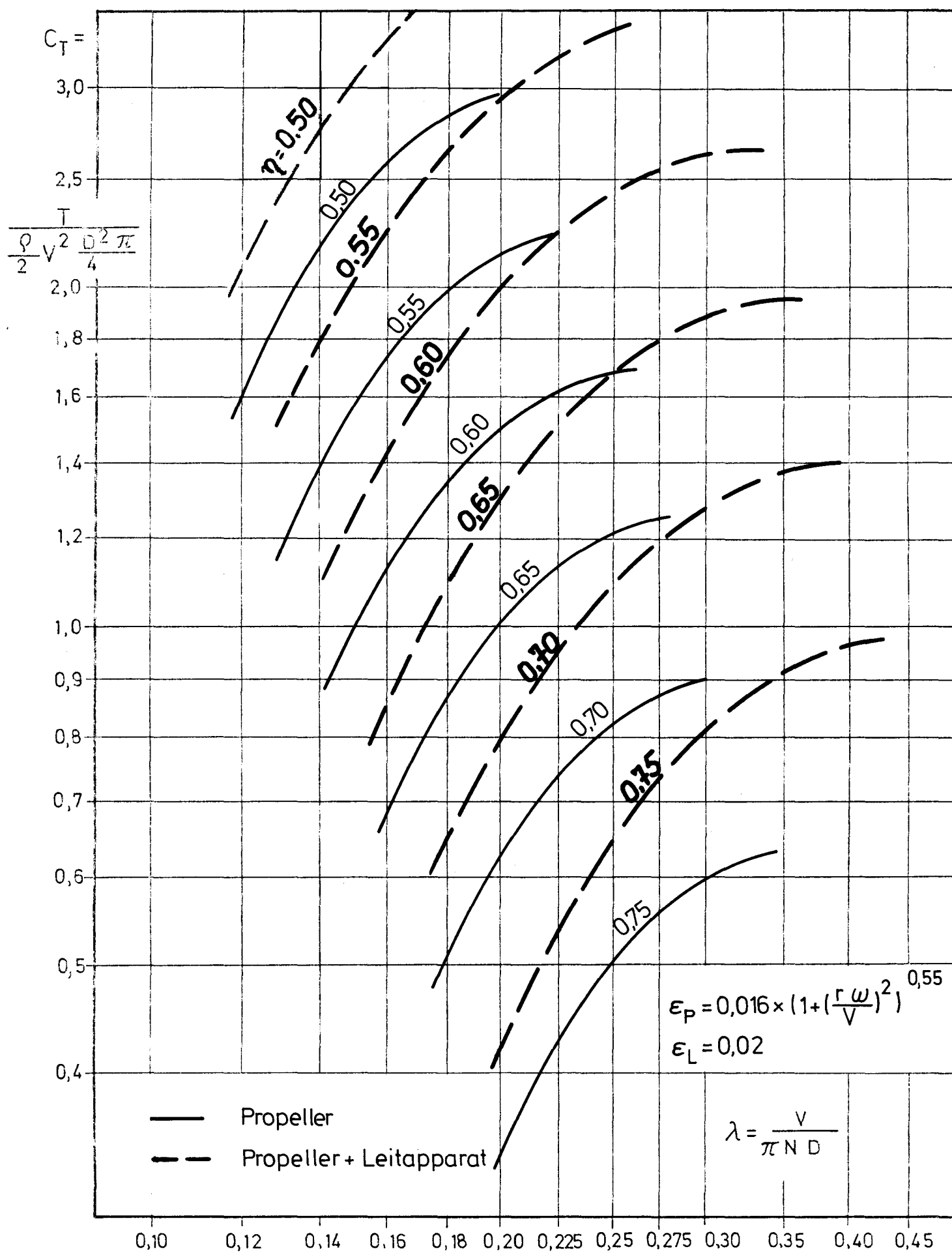
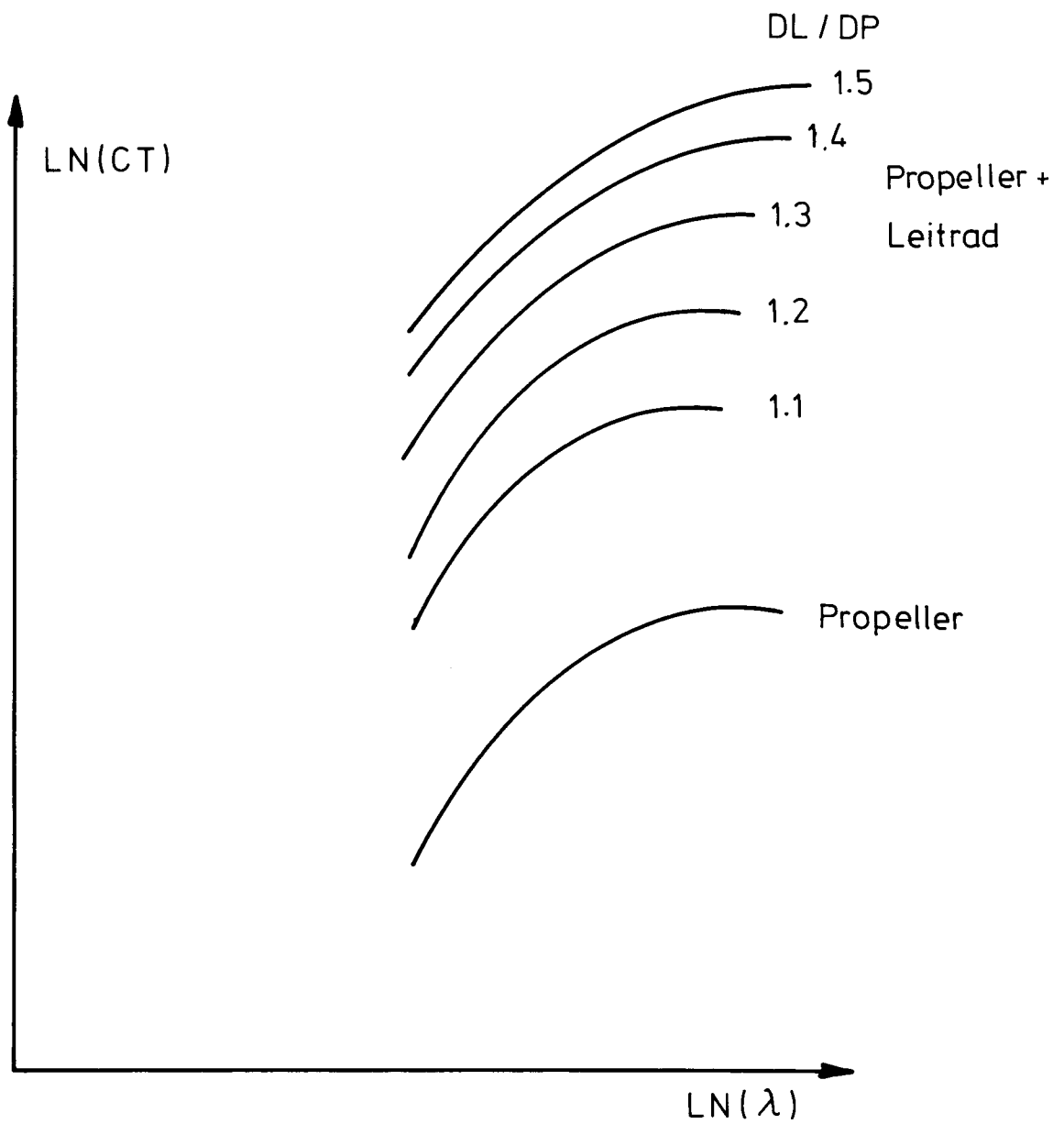


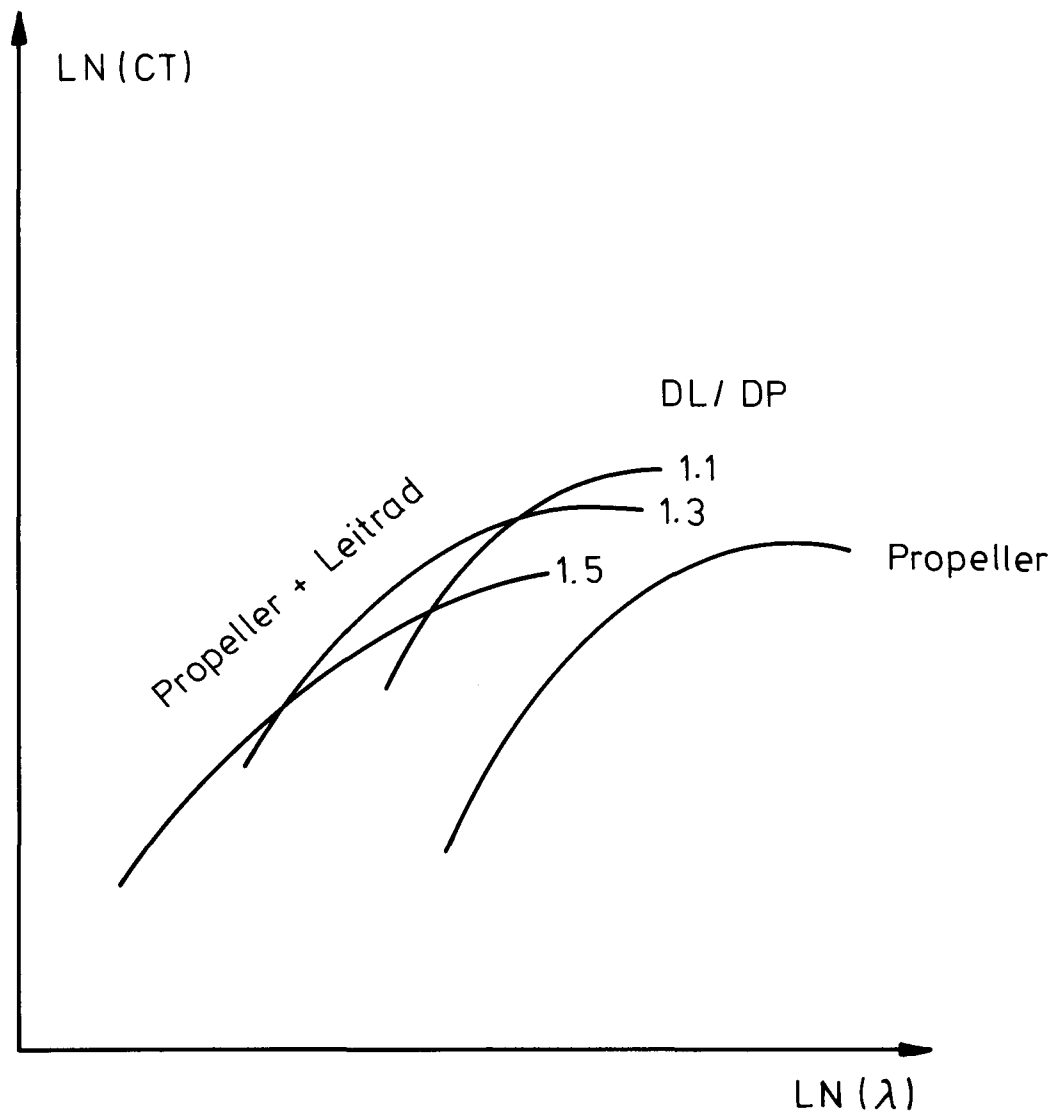
Fig. 9



Propeller und Leitrad $\eta = 0,70$
 CT und λ auf DP bezogen



Propeller und Leitrad $\eta = 0,70$
 CT und λ auf DL bezogen



Optimierung

Organ	Was wird optimiert ?	Methode	Kriterium	Bemerkung
Konv. Propeller	Radiale Verteilung der induzierten Geschwindigkeit	Variation dieser Geschw.	$\frac{\partial TP(r)}{\partial QP(r)} = C$	
Propeller + Leitapparat	Größe der durch den L.A. induz. Geschwindigkeit	"	$\partial TL(r) = 0$	
	Radiale Verteilung der durch den Propeller induz. Geschwindigkeit	"	$\frac{\partial TP(r) + \partial TL(r)}{\partial QP(r)} = C$	
Propeller + Leitrad	Radiale Verteilung der	durch das L.R. induz. Geschw.	$\frac{\partial TL(r)}{\partial QL(r)} = CL$	QL = 0
		durch den Prop. induz. Geschw.	$\frac{\partial TP(r) + \partial TL(r) \cdot CL \cdot \partial QL(r)}{\partial QP(r)} = CP$	
	Durchmesserverhältnis	Variation des Propellerdurchm.	$\frac{\partial TP + \partial TL}{\partial QP} = CP$	
	Belastungsverhältnis	Variation des Leitradurchm.	siehe Anhang	
	Drehzahlverhältnis	Probieren		

$TP(r)$, $TL(r)$, $QP(r)$, $QL(r)$ Schub- und Drehmomentelemente für Ringelement von Radius r und von der Breite 1
 TP , TL , QP , QL Resultierende Schub- und Drehmomentbeträge

Fig. 13

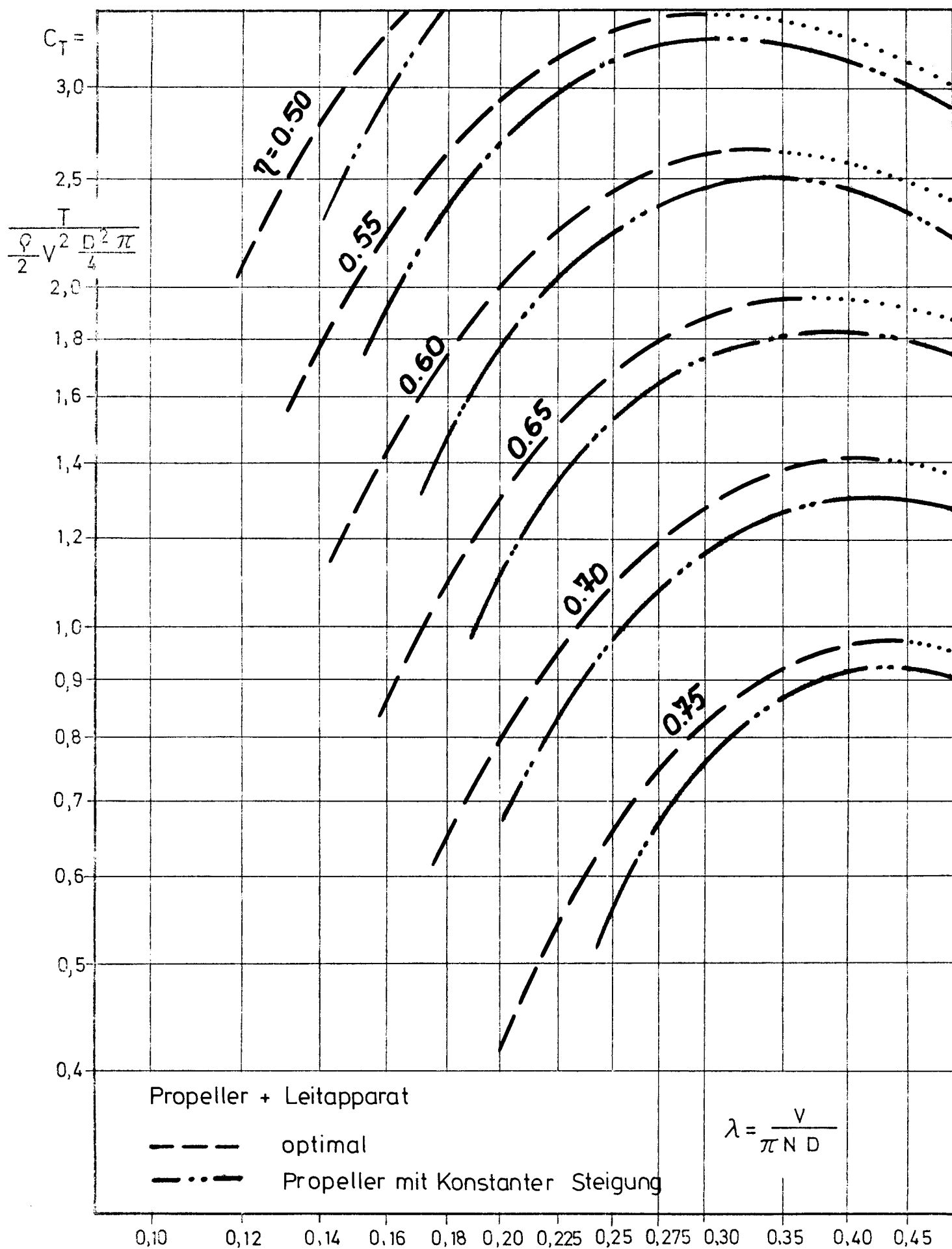
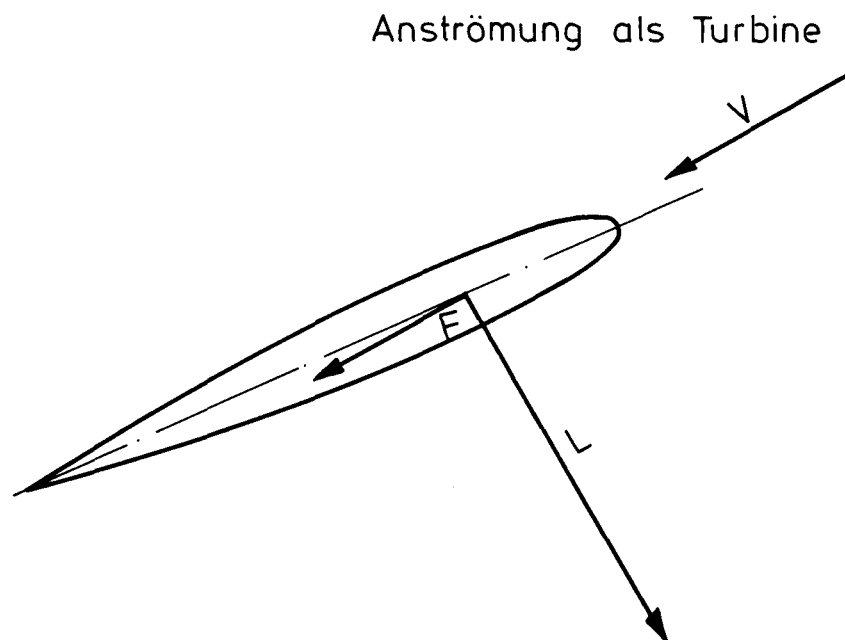
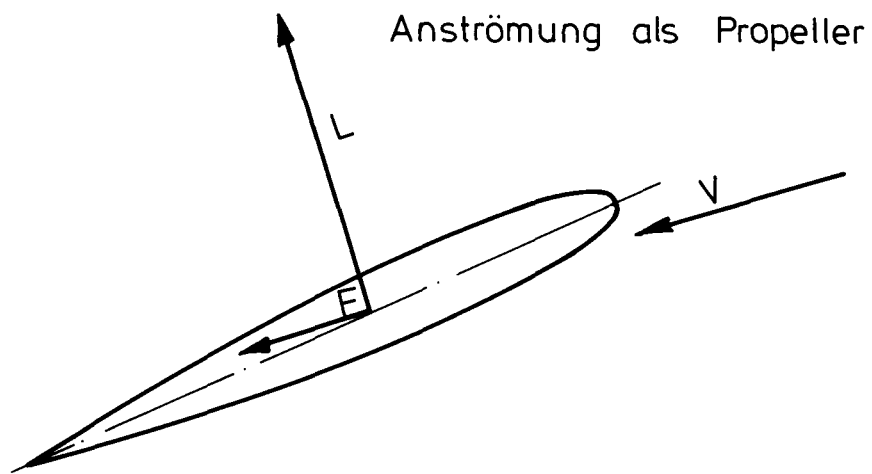


Fig. 14



L = Auftriebskraft

F = Zähigkeitskraft

Fig. 15

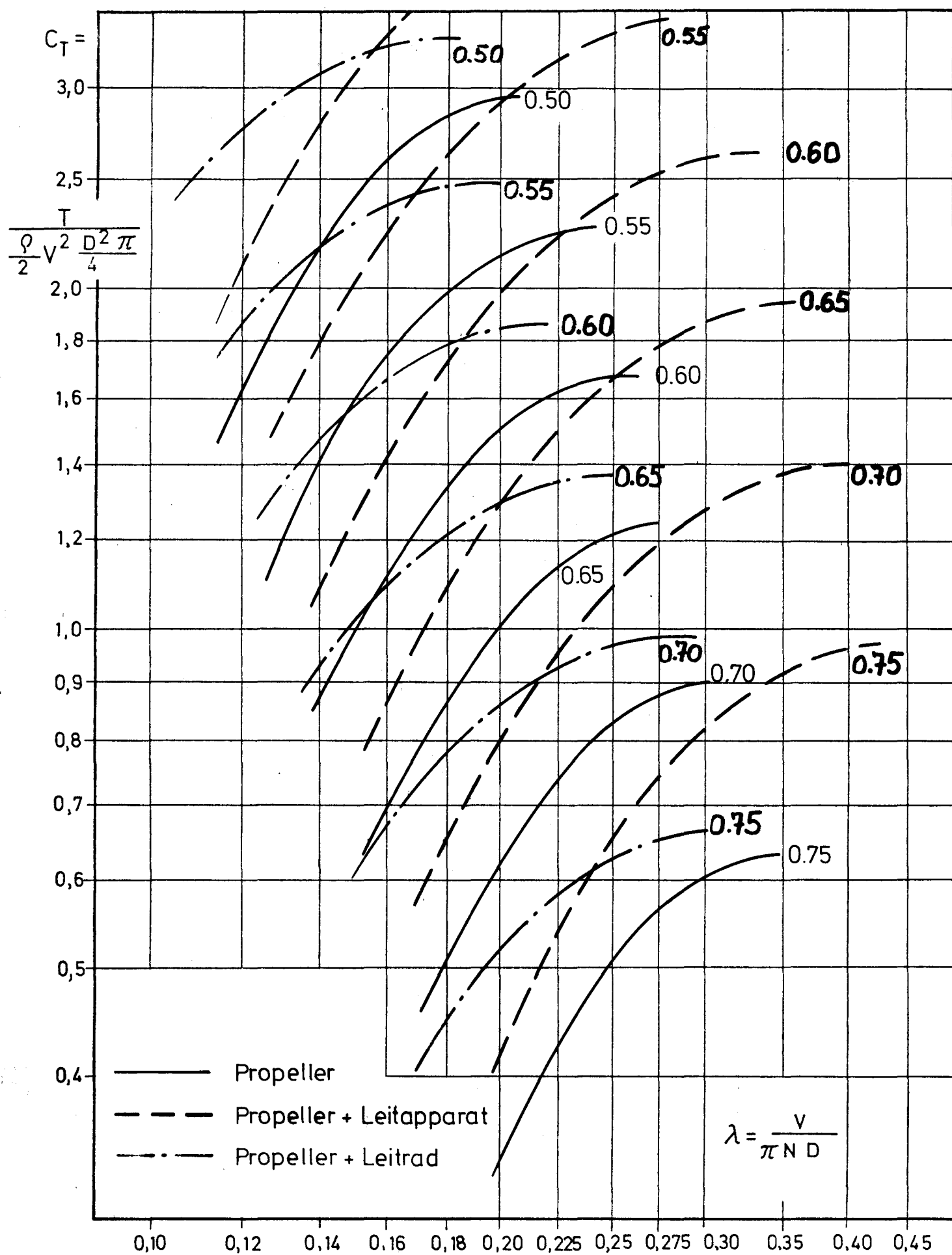
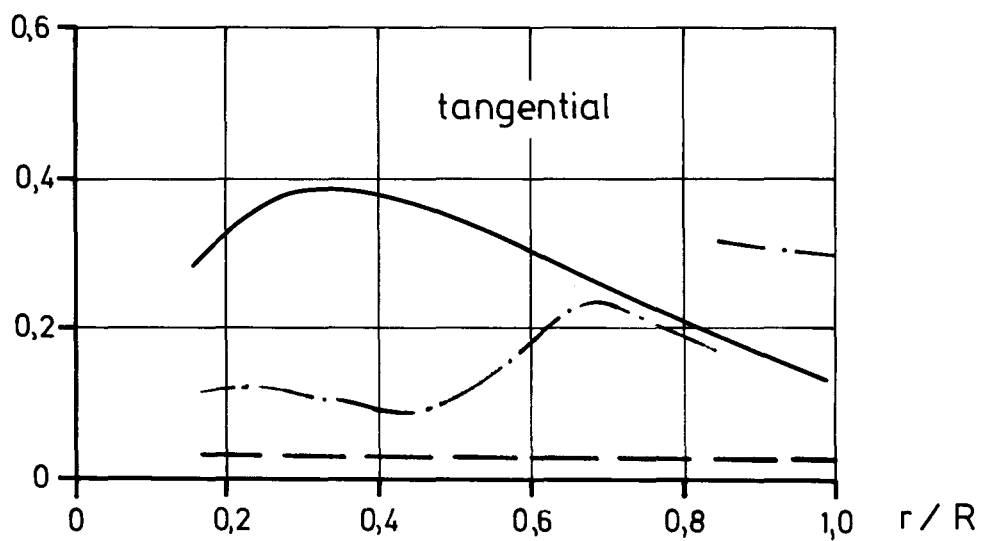
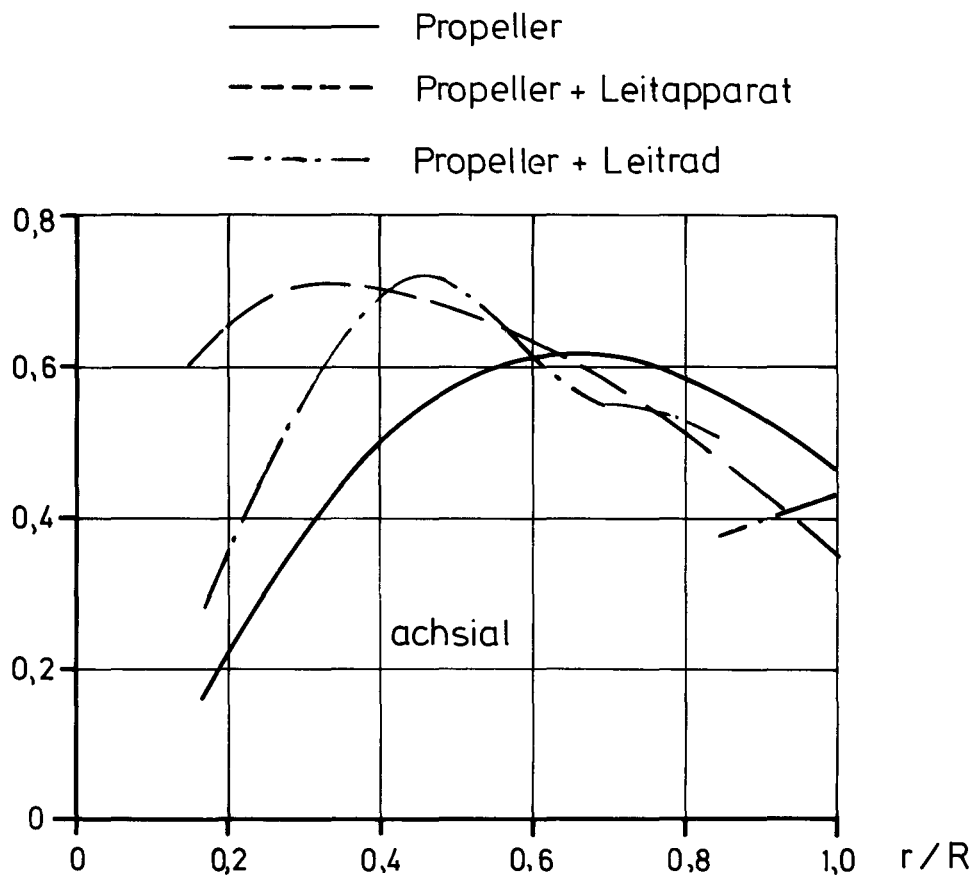


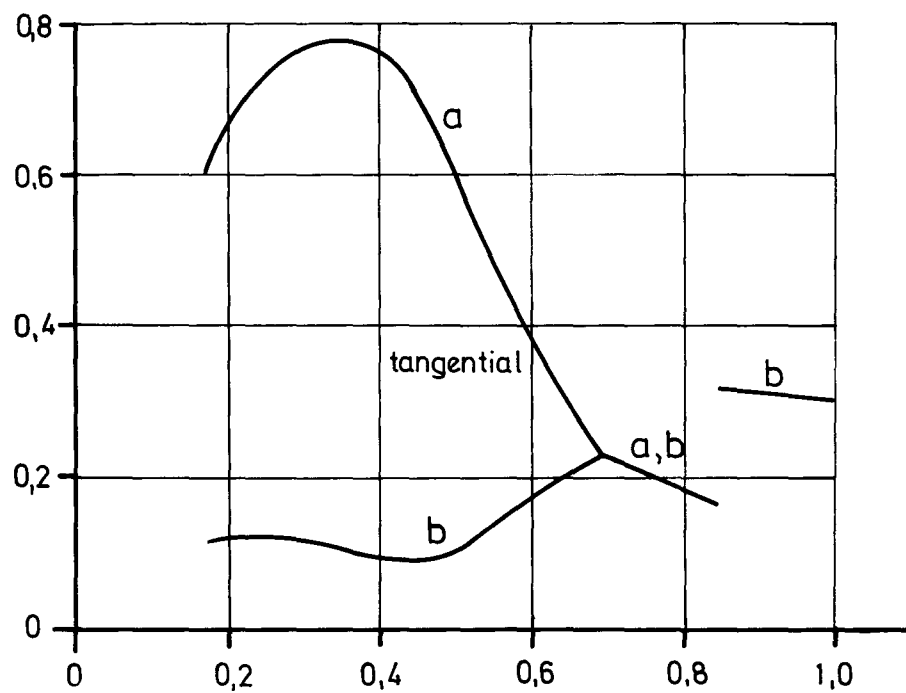
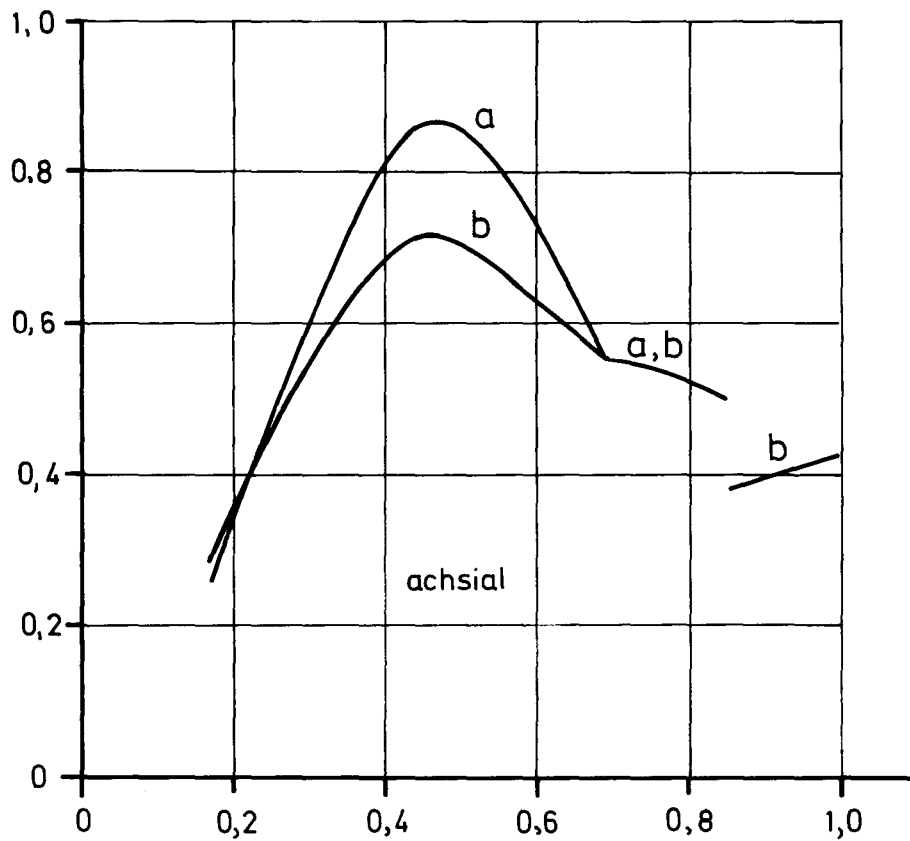
Fig. 16



Induzierte Geschwindigkeiten in dem Strahl
 weit hinter dem Antriebsorgan

$$C_T = 1,32 \quad \lambda = 0,212$$

Fig. 17



Induzierte Geschwindigkeit für P+LR

- a) hinter dem Propeller
- b) hinter dem Leitrad

Gegenüberstellung von Antriebsorganen

	Konv. Prop.	Prop.+ Leitapparat	Prop. + Leitrad	Prop. + Leitrad
Betriebspunkt	CT=1.32, $\lambda=0,21$	CT= 1.32, $\lambda=0.21$	CT=1.32, $\lambda=0.21$	CT=0.917, $\lambda = 0.175$ Durchmesser um 20% größer
Wirkungsgrad in%	62, 27	65,58	65,00	67,99

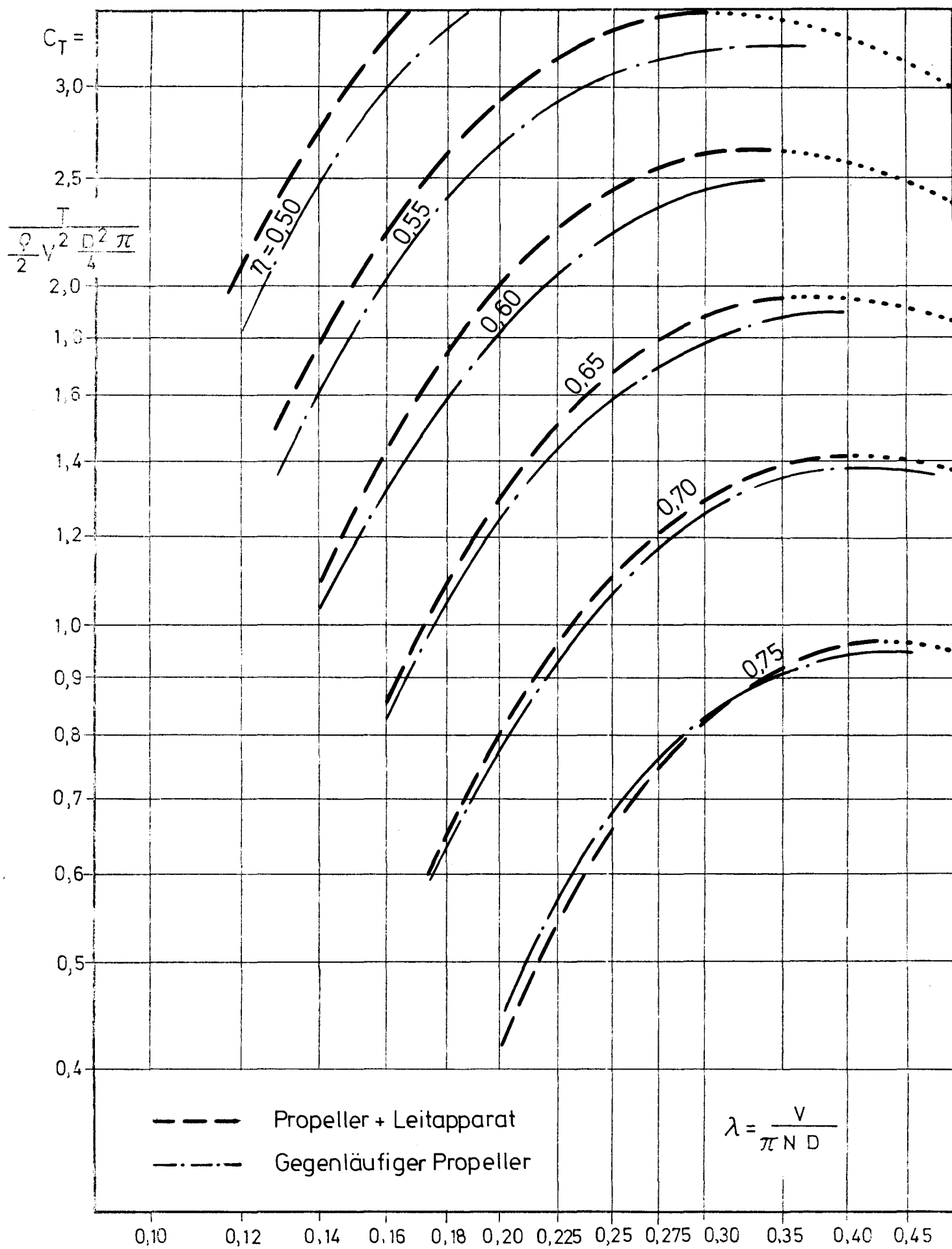
Verluste in %

Austrittsverluste d. achsiale, d. tangentiale Geschw. im Strahl	17.83 4.18 22.01	19.63 0.06 19.69	19.25 3.00 22.25	15.54 1.43 16.97
Reibungsverluste am Propeller an LA oder LR	15.72 15.72	14.06 0.67 14.73	10.30 2.45 12.75	11.27 3.77 15.04

Verbesserung des Wirkungsgrades in %

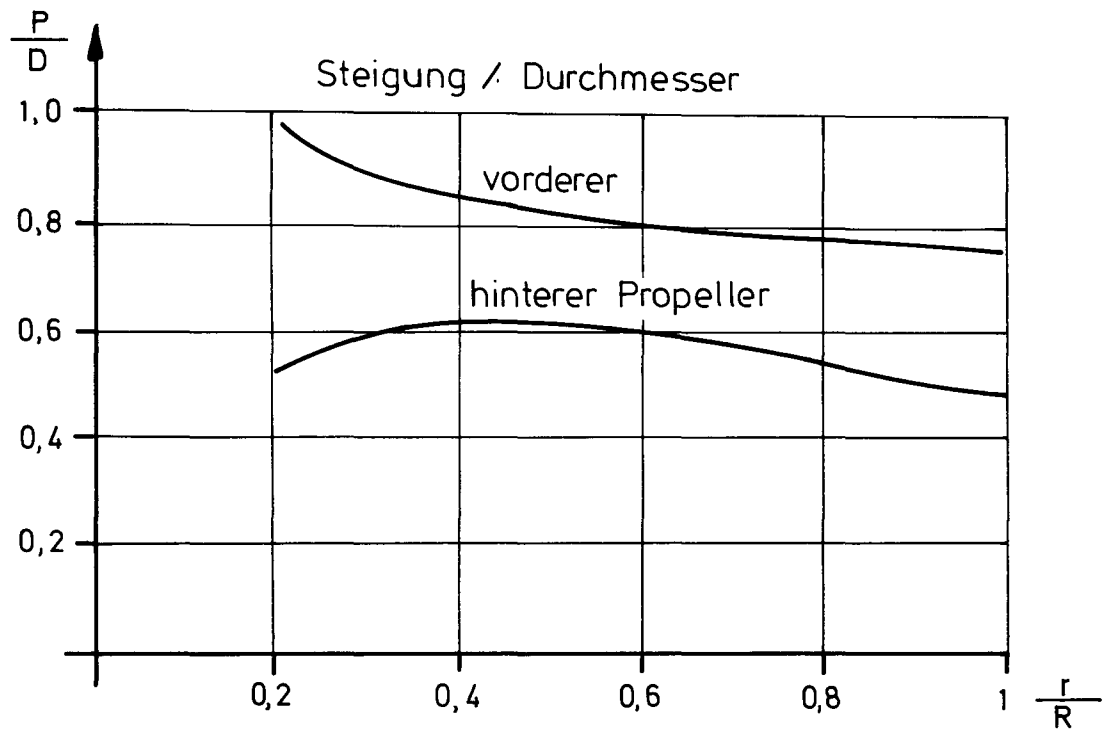
5.32	4.38	9.19
------	------	------

Fig. 19



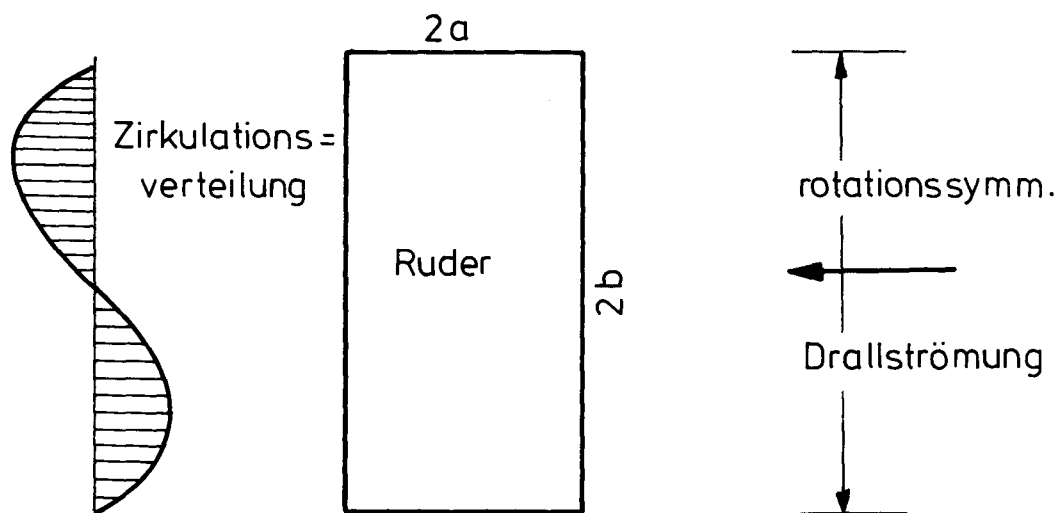
Gegenläufiger Propeller

$$C_T = 0,90; \quad \lambda = 0,22; \quad \eta = 0,70;$$



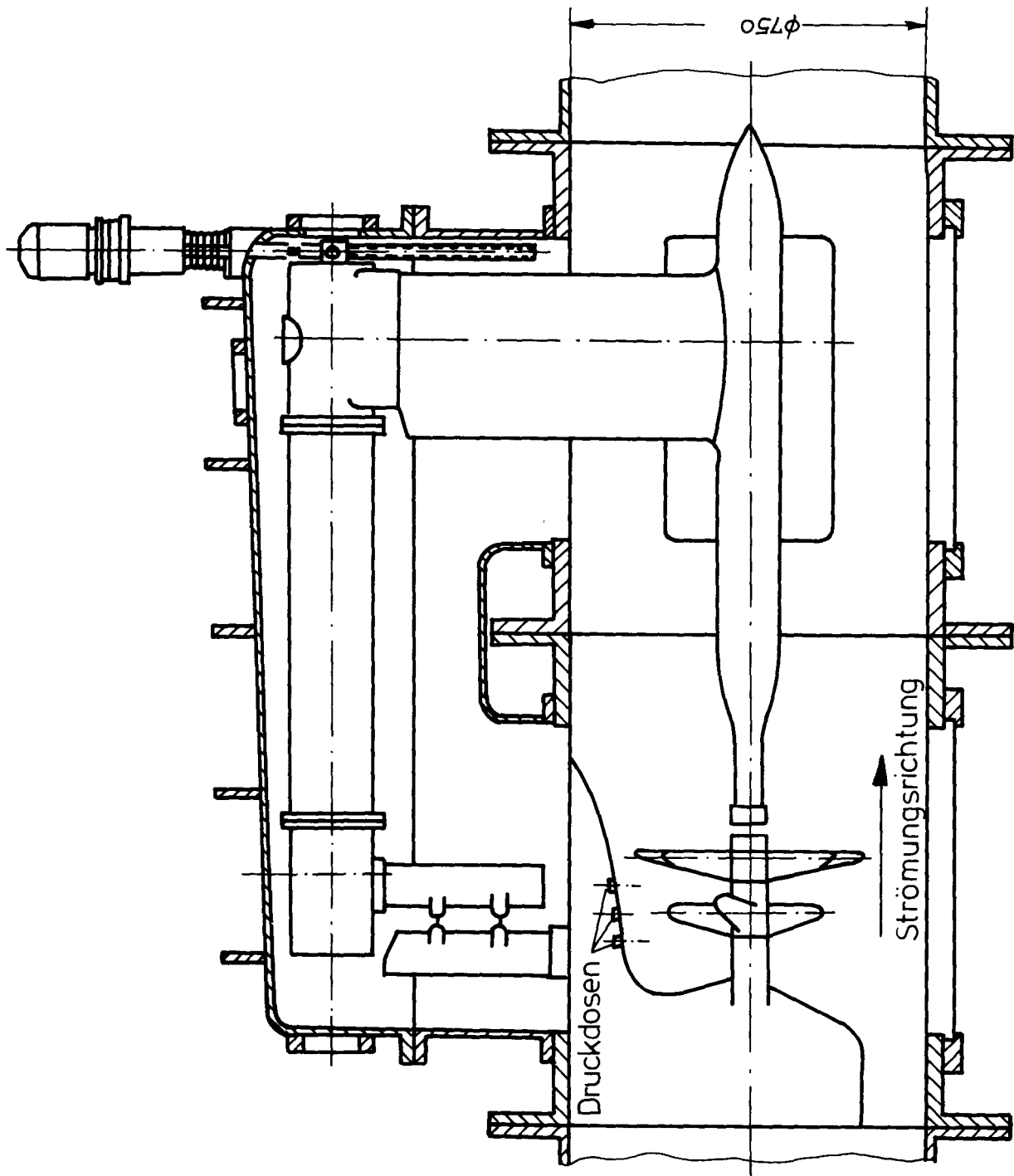
$$\frac{\text{Schub des vorderen Propeller}}{\text{Gesamter Schub}} = 0,536$$

Fig. 21



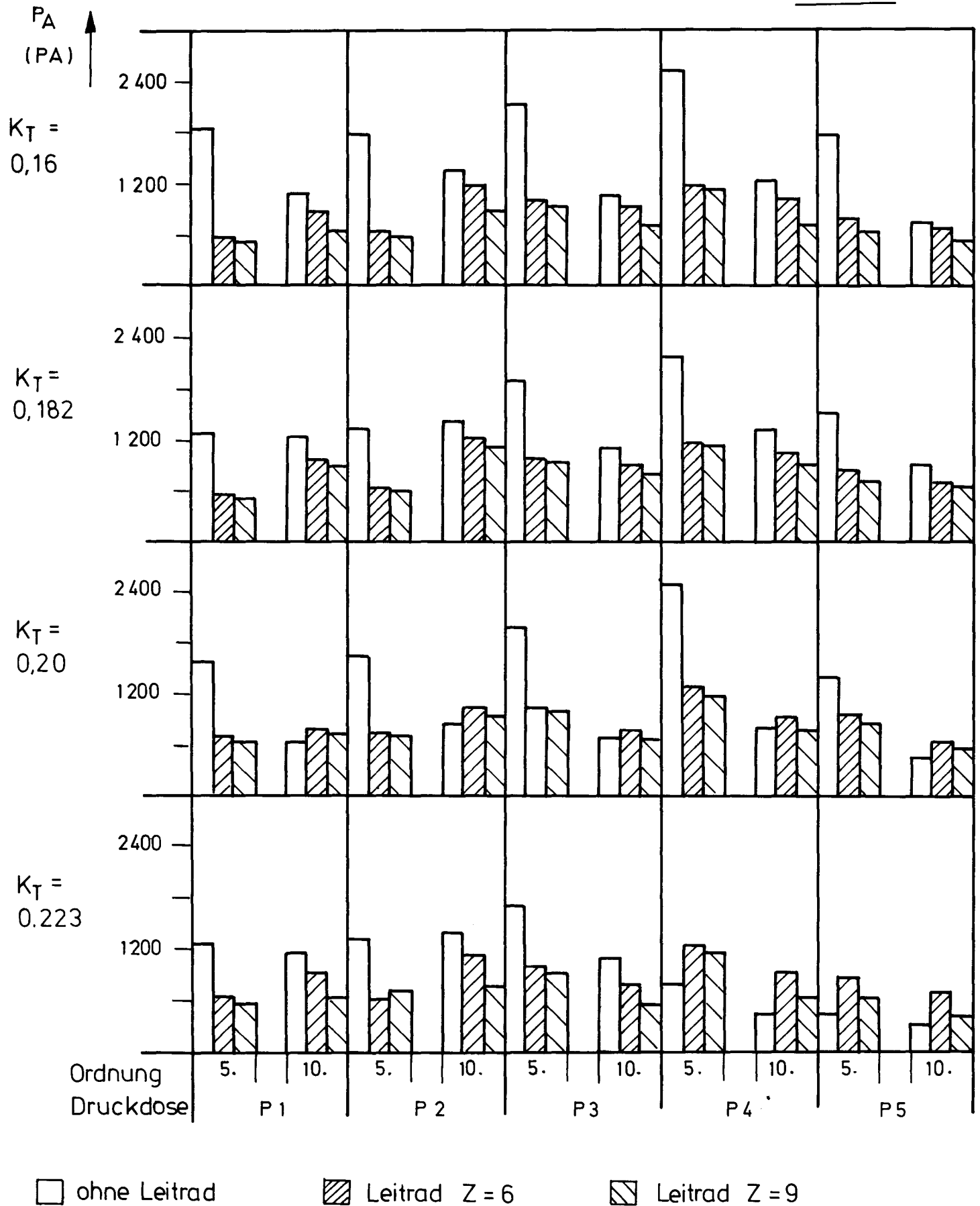
Durch das Ruder gewonnene Schubleistung _____ =
 Gesamte Dralleistung in der ankommenden Strömung

Flügelzahl	Seitenverhältnis $b : a$		
	5	3	1
2 (Ruder)	0,38	0,39	0,40
4 Leitapparat	0,65	0,66	0,67
8 Leitapparat	0,87	0,88	0,88



Meßstrecke im Kavitationstunnel mit Schräganströmdynamometer

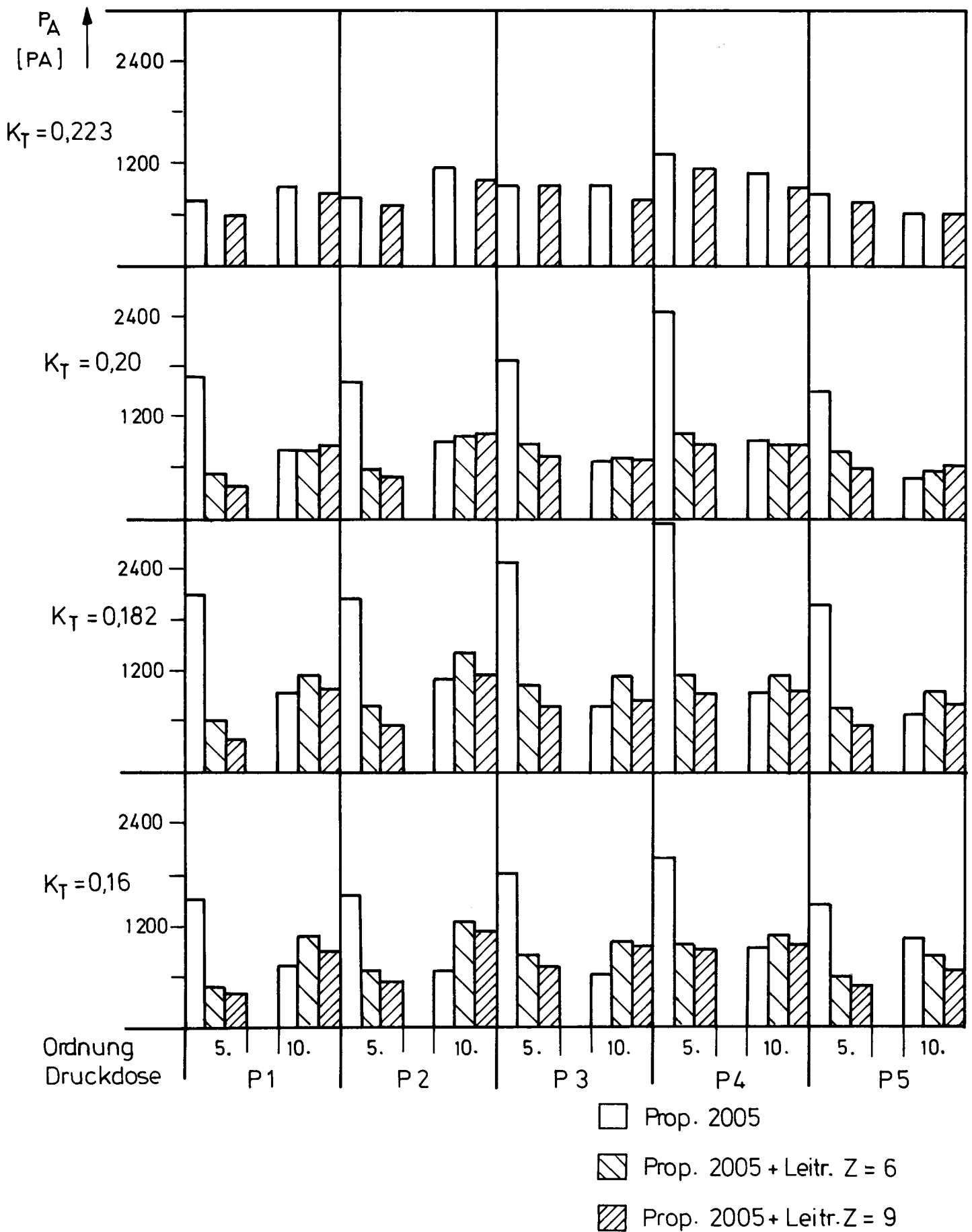
Fig. 23



Berechnete Druckamplituden 5. und 10. Ordnung

Prop. 1638 für $G_n = 0,24$

Fig. 24



HSVA Propeller Nr. 1638

$KT = 0,182$

$G_n = 0,21$

30° BB

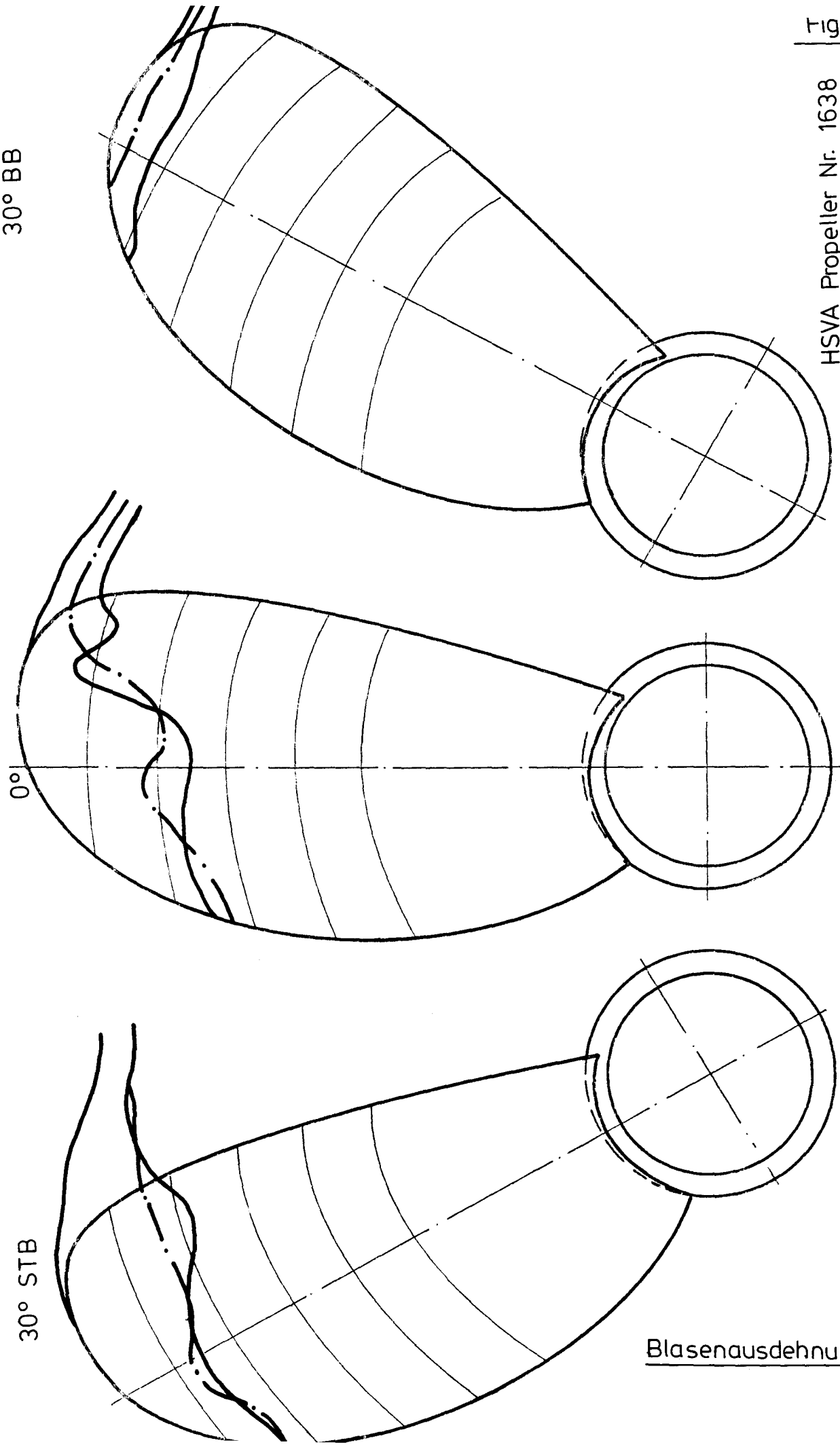
0°

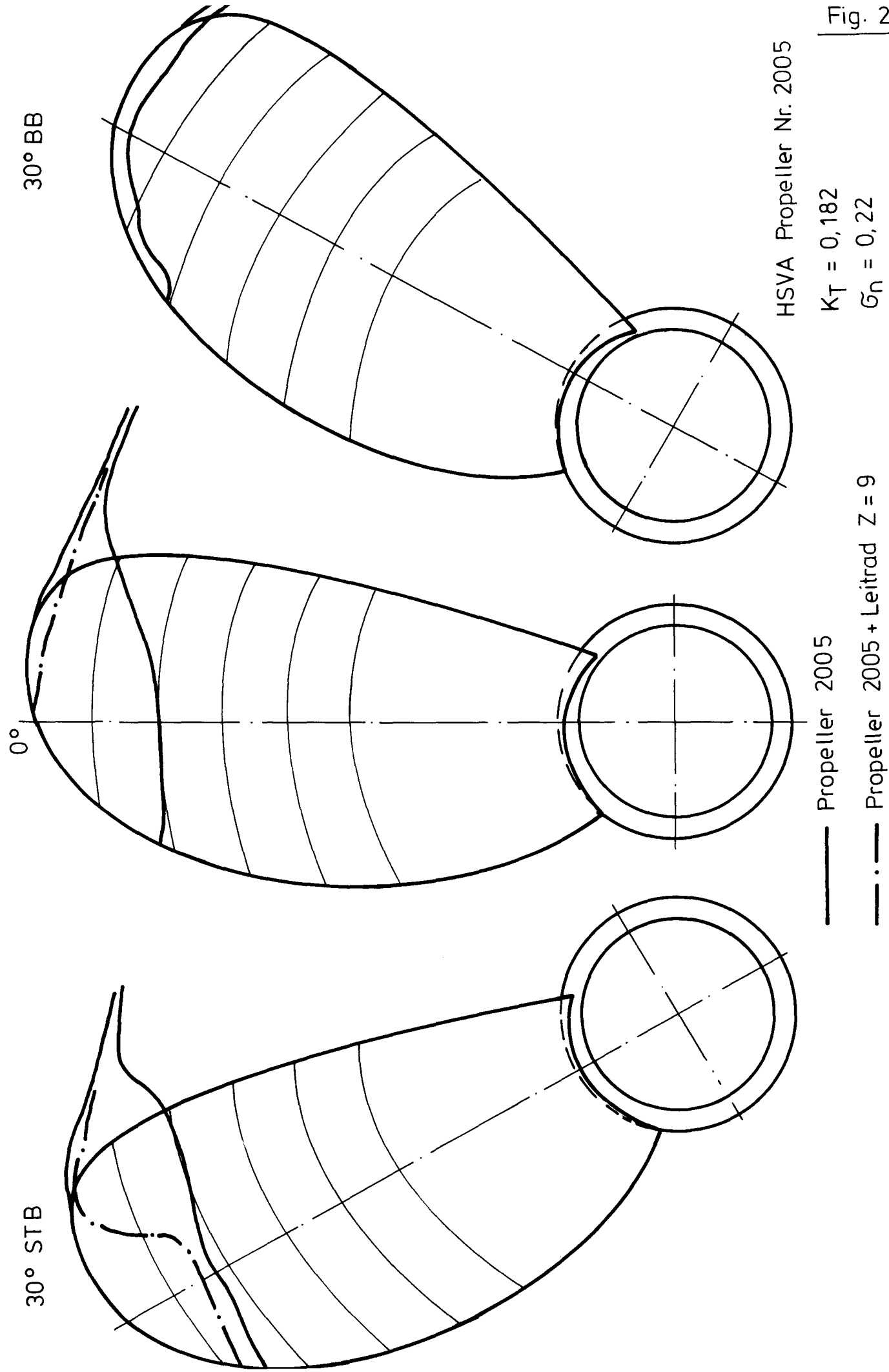
30° STB

— ohne Leitrad

- · - Leitrad Z = 9

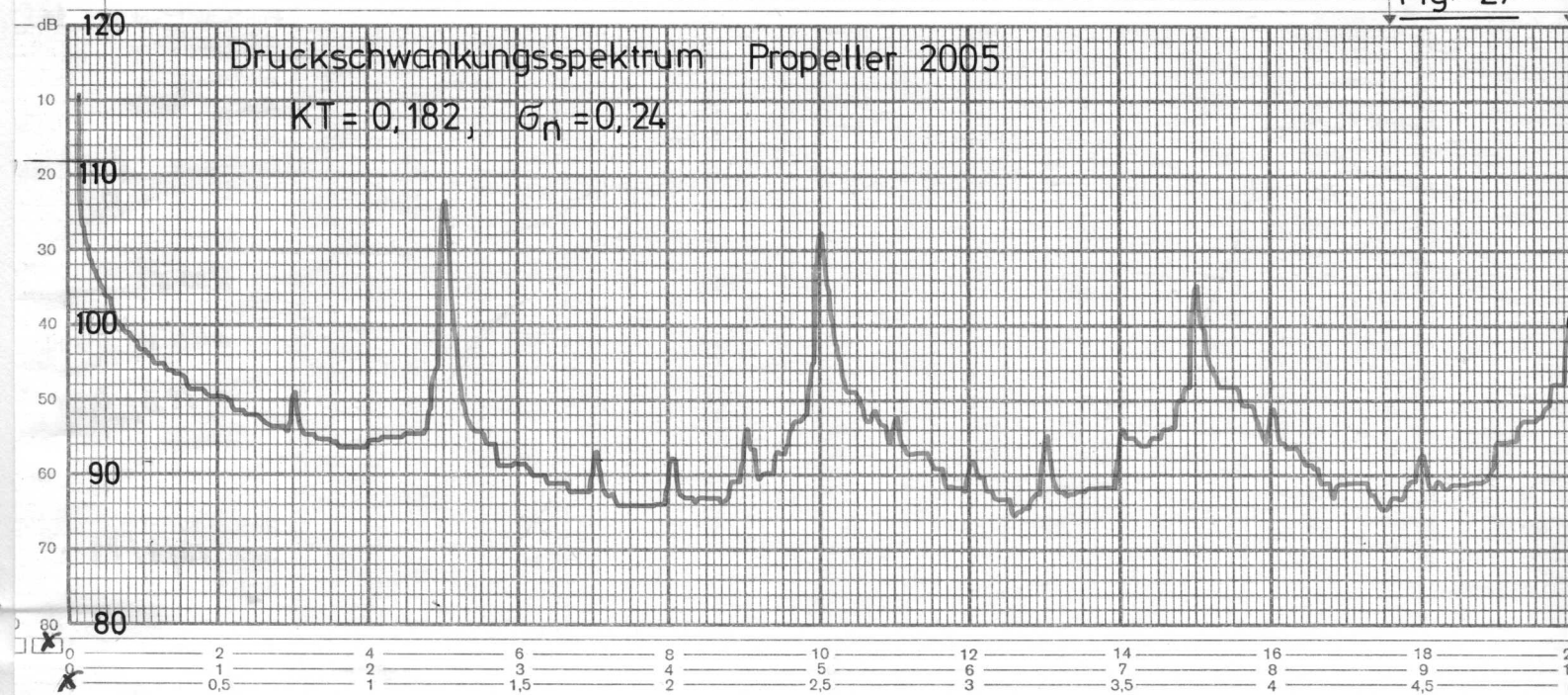
Blasenausdehnung —





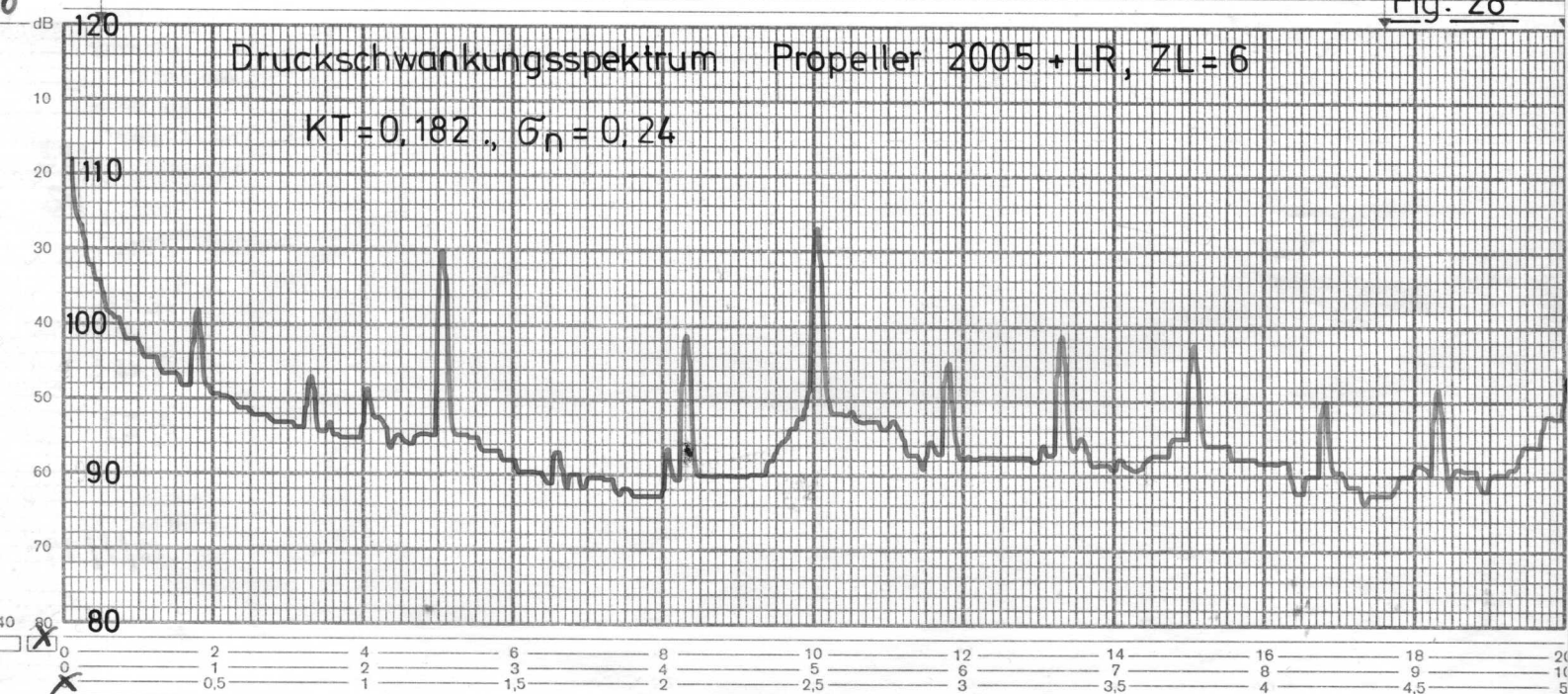
tion Start: seconds End: seconds Not Expanded: ☐ Expanded: ☐

Fig. 27



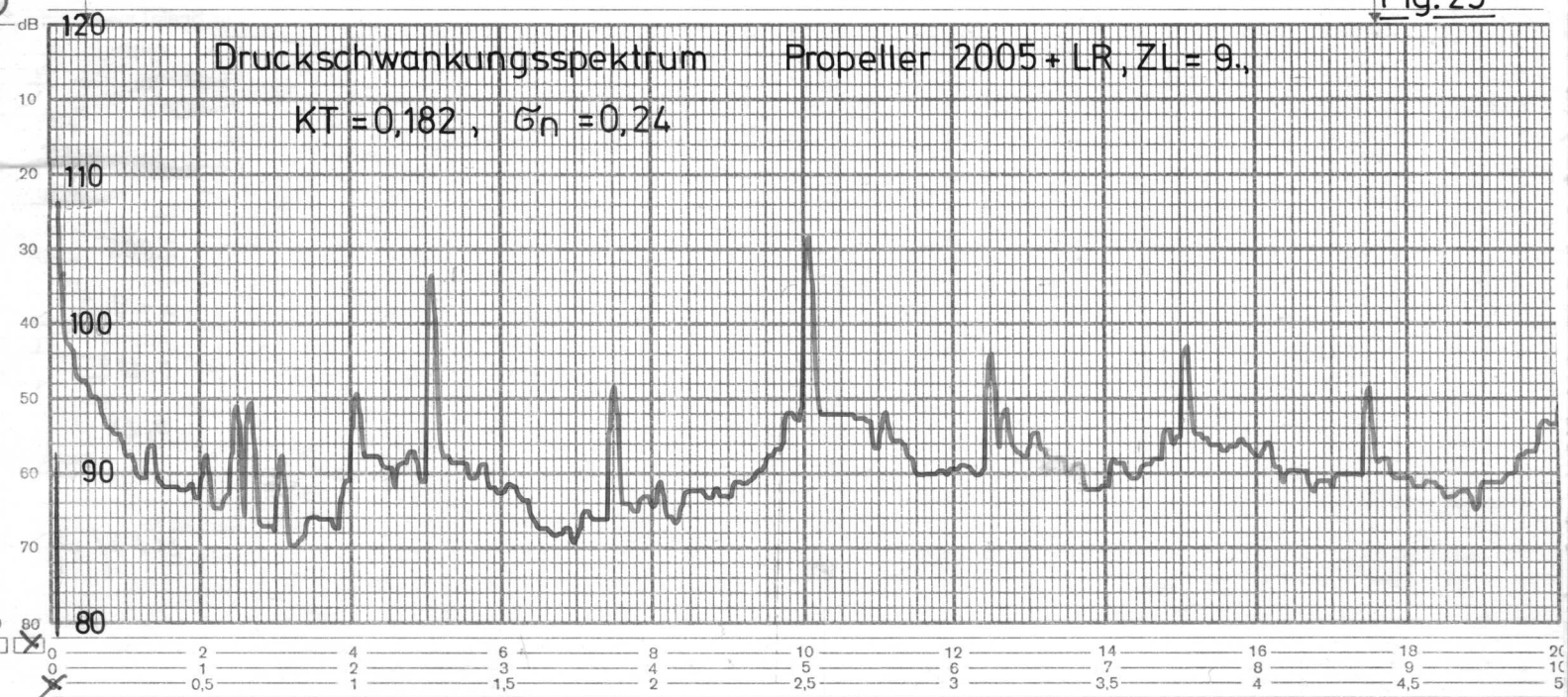
tion Start: seconds End: seconds Not Expanded: ☐ Expanded: ☐

Fig. 28



ion Start: seconds End: seconds Not Expanded: ☐ Expanded: ☐

Fig. 29



Measuring Object:

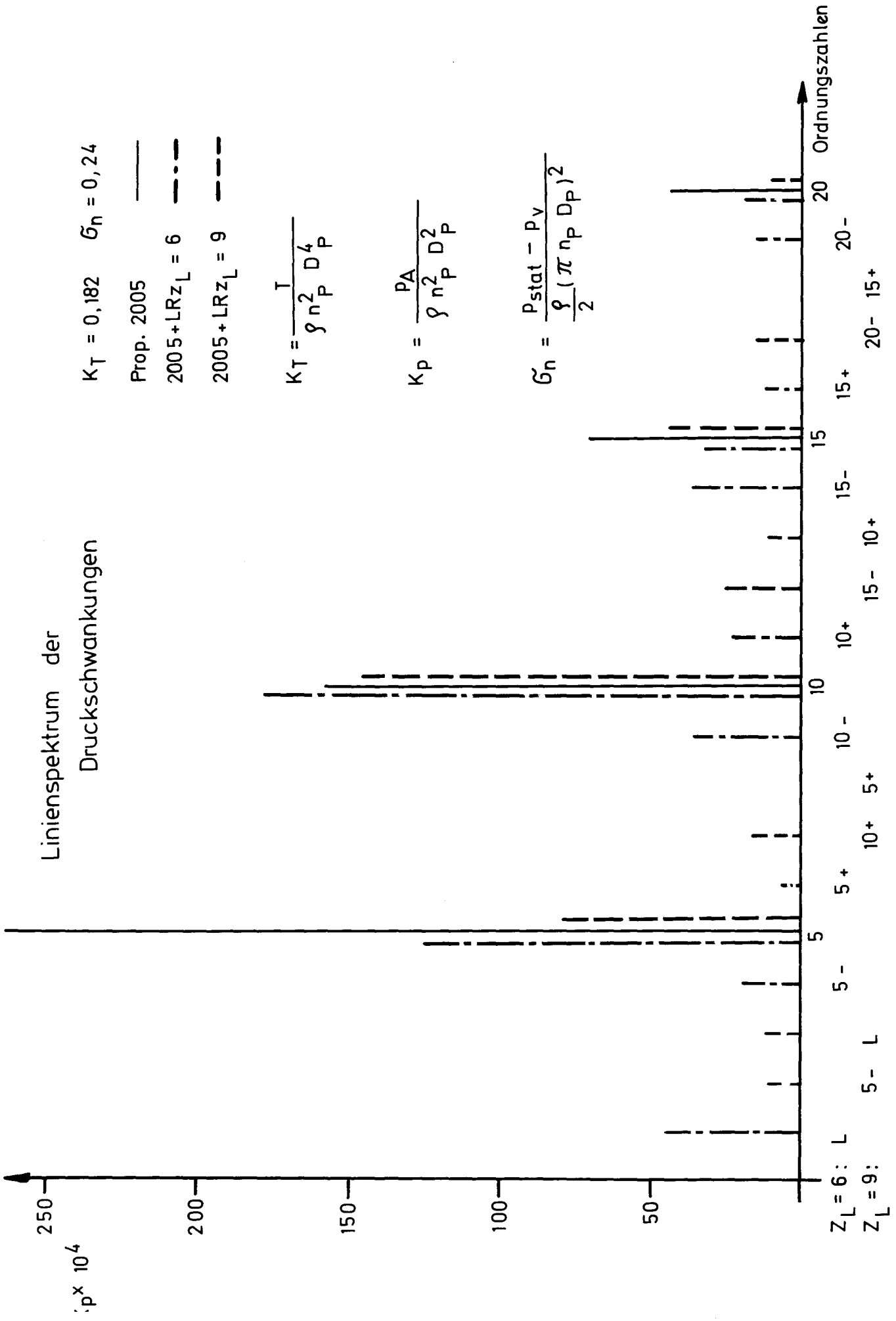


Fig. 31

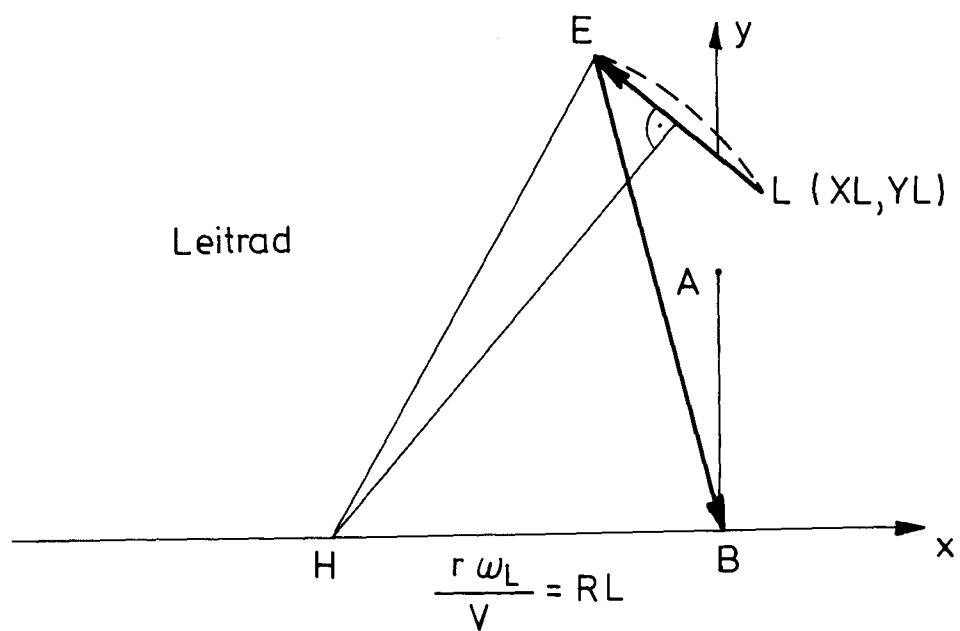
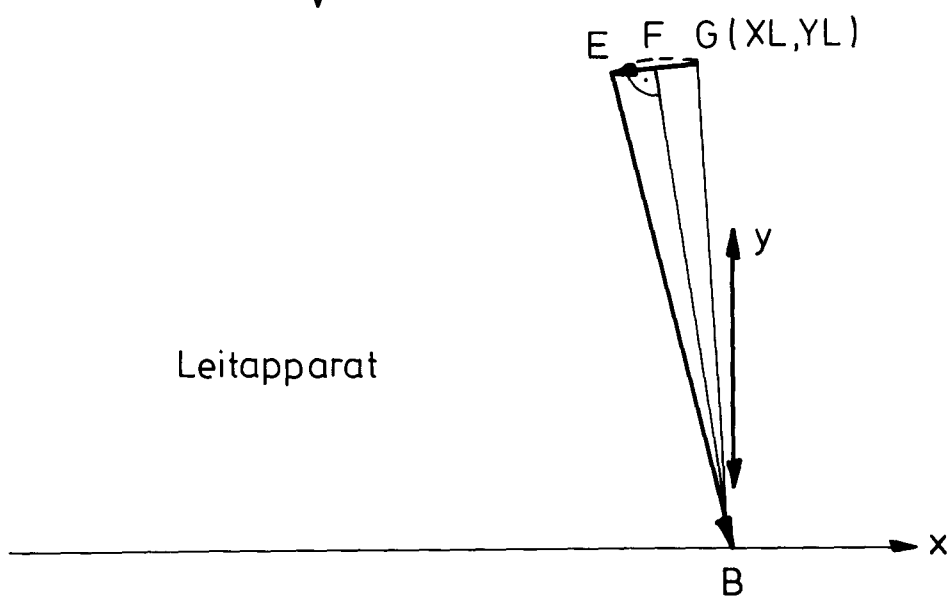
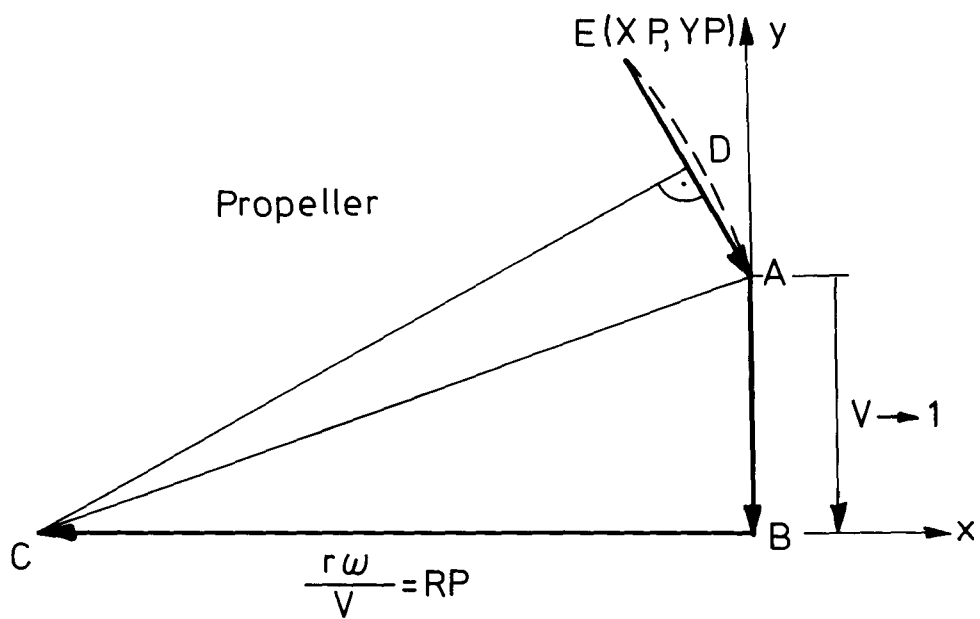


Fig. 32

