

Weitere Propellerentwürfe für Z 36a.

(Modell Nr. 2711 und 2712)

Übersicht: Beim ersten Propellerentwurf für Z 36a (Modell Nr. 2547, vergl. AVA -Bericht 41/8/12 und 41/8/14) zeigten Schub und Moment bei maximaler Leistungsaufnahme deutlich eine, wenn auch nur geringe Verschlechterung durch Kavitation. Beim zweiten Entwurf (Modell Nr. 2658, vergl. AVA -Bericht 42/H/10) wurde ein solcher Kavitationseinfluß zwar nicht mehr festgestellt, jedoch ergab die nachträgliche Beobachtung im Kavitationstank der HSVA, daß immer noch ausgedehnte Saugseitenkavitation vorhanden ist, so daß mit der Zerstörung des Propellers im Laufe der Zeit gerechnet werden muß. Die nähere Untersuchung ergab, daß diese Kavitation auf die Vernachlässigung der Stromlinienkrümmung längs der Flügeltiefe beim Entwurf zurückzuführen ist. Im vorliegenden Bericht wird das Entwurfsverfahren unter näherungsweise Berücksichtigung der Stromlinienkrümmung besprochen. Anschließend werden die Ergebnisse der Hamburger Modellmessungen für zwei weitere Propellerentwürfe mitgeteilt.

Gliederung:

- I. Einleitung,
- II. Krümmungskorrektur,
- III. Entwurfsverfahren,
- IV. Meßergebnisse der Propeller 2711 und 2712.
- V. Schrifttum.

Der Bericht umfaßt:  
16 Seiten Text,  
6 Abbildungen.

INSTITUT FÜR HOCHGESCHWINDIGKEITSPROBLEME.

Bearbeiter:

*O. Walchner*

O. Walchner.

I. Einleitung.

Bei der Auswertung des Hamburger Modellversuches Prop. 2658 für die Verhältnisse am Schiff (vergl. AVA - Bericht 42/H/10 vom 20.5.42) konnte bei maximaler Leistungsaufnahme noch keine merkliche Schub- oder Momentenbeeinflussung durch Kavitation festgestellt werden. Die daraus gefolgerte Erwartung, daß der Propeller überhaupt kavitationsfrei arbeitet, erwies sich jedoch als irrig. Bei einer nachträglichen Beobachtung im Kavitationstank wurde bei dem Fortschrittsmaß  $\frac{v_e}{nD} = 0,85$  und der auf die Freifahrtgeschwindigkeit bezogenen Kavitationszahl  $\sigma_0 = 0,7$  Saugseitenkavitation festgestellt, die über einen Bereich von 0,4 bis 0,8 R von der Vorderkante bis etwa  $\frac{2}{3}$  der Flügeltiefe reichte. Diese Kavitation verschwindet bei gleichem  $\sigma_0$  erst, wenn das Fortschrittsmaß auf  $\frac{v_e}{nD} = 0,95$  erhöht wird, was einer Verminderung des Schubbeiwertes bzw. der Auftriebsbeiwerte der einzelnen Profile auf rund  $\frac{2}{3}$  ihres Wertes bei  $\frac{v_e}{nD} = 0,85$  entspricht.

Es ist also ein Kavitationszustand vorhanden, wie er früher im Göttinger Kavitationstank an Profilen beobachtet wurde, deren Anstellwinkel größer ist als bei stoßfreiem Eintritt. Hierbei kann sich die Kavitation von der Vorderkante aus etwas über die Mitte der Profiltiefe hinaus ausdehnen, ohne daß der Auftrieb verschlechtert bzw. der Widerstand vergrößert wird. Im Gegenteil werden die Profileigenschaften bei dieser Kavitationsart unter Umständen sogar etwas verbessert, was sich am Propeller 2658 auch tatsächlich in einer kleinen, allerdings sehr streuenden Wirkunggraderhöhung gegenüber kavitationsfreier Strömung ausdrückt. Im Bericht 42/H/10 wurde auf diese geringe Wirkunggraderhöhung schon hingewiesen, allerdings ohne daß die Kavitation als Ursache erkannt worden wäre, denn beim Entwurf war stoßfreier Eintritt angestrebt worden, wobei Kavitationsbeginn und Schub- bzw. Momentenbeeinflussung zusammenfallen müssen.

Wenn nun die Profile des Propellers 2658 offenbar nicht stoßfrei angeströmt werden, so kann dies nur dadurch erklärt werden, daß beim Propellerentwurf eine Stromlinienkrümmung vernachlässigt wurde, welche so beschaffen sein muß, daß die wirksame Profilwöl-

bung - d.h. die von der gekrümmten Stromlinie aus gemessene Profilwölbung - wesentlich geringer ist, als die von der Flügelsehne aus gemessene, mit der beim Entwurf seither auch gerechnet wurde. Der Auftriebsbeiwert eines stoßfrei angeströmten Profils ist aber der wirksamen Profilwölbung proportional. Wenn diese wirksame Wölbung durch Krümmungseinflüsse sehr klein wird, ist es also denkbar, daß der zur Aufnahme der vorgeschriebenen Leistung nötige Auftriebsbeiwert eben nur mit einem Anstellwinkel erreicht werden kann, der größer ist als stoßfreiem Eintritt entspricht. Damit wäre die Voraussetzung für die Entstehung der tatsächlich beobachteten Kavitationsart erfüllt.

## II. Krümmungskorrektur.

Nach dem oben Gesagten ergibt sich also die Notwendigkeit, bei breiten Propellern die Stromlinienkrümmung am Ort der Profile zu berücksichtigen. Mit anderen Worten heißt dies: Beim breitflügeligen Propeller müssen nicht nur die induzierten Geschwindigkeiten am Propeller, sondern auch deren Änderung längs der Blatttiefe berücksichtigt werden. Dies ist natürlich nur näherungsweise unter stark vereinfachten Annahmen möglich. Dabei wird der Propeller als vielflügelig angenommen und durch ein Wirbelsystem ersetzt, das aus gebundenen und freien Wirbeln besteht. Die gebundenen Wirbel stellen die Flügel dar, welche als Näherung konstante Zirkulation über dem Radius haben sollen, so daß die freien Wirbel schraubenförmig nur am Strahlrand und an der Nabe abgehen. Die schraubenförmigen freien Wirbel am Strahlrand kann man sich zerlegt denken in eine Vielzahl von Wirbelringen mit dem Mittelpunkt auf der Achse, d.h. in einen halb unendlich langen Wirbelzylinder und in Längswirbel, die zur Achse parallel sind. Die freien Wirbel an der Nabe können von vorn herein wegen des großen Fortschrittswinkels als zur Achse parallel angesehen werden und durch einen einzelnen Längswirbel in der Propellerachse ersetzt werden. Die Stromlinienkrümmung am Profil ergibt sich nun auf folgende Weise.

- 1.) Die Wirbelringe am Strahlrand induzieren eine längs des betrachteten Blattschnitts veränderliche Axialgeschwindigkeit. Dieser Effekt ist bereits vor längerer Zeit von H.B. Helmbold [1] behandelt worden.
- 2.) Die Längswirbel auf dem Strahlrand und der Nabenwirbel erzeugen eine längs der Profiltiefe veränderliche Tangentialgeschwindigkeit. Dieser Effekt ist in der Propellerliteratur bisher vernachlässigt. Erst in neuster Zeit hat H. Ludwig<sup>1)</sup> darauf hingewiesen und die Krümmung berechnet. Sie ist bei den üblichen Fortschrittsgraden hauptsächlich an den inneren Blattschnitten fühlbar und klingt nach außen hin ab.
- 3.) Auch die gebundenen Wirbel erzeugen am Ort eines betrachteten Blattschnittes ein Geschwindigkeitsfeld. Bei großer Flügelzahl kann man die daraus resultierende Stromlinienkrümmung näherungsweise dadurch berücksichtigen, daß man das betrachtete Blattelement als Element eines ebenen Flügelgitters auffaßt. Die Wirkungsweise eines Profils im ebenen Gitterverband ist von F. Weining berechnet worden [2]. Bei Schiffsschrauben ist jedoch die Flügelzahl so klein, daß eine Berücksichtigung des Einflusses der gebundenen Wirbel auf diese Weise fraglich erscheint.

In Ermangelung einer theoretisch befriedigenden Lösung, an der H. Ludwig zur Zeit noch arbeitet, seien deshalb als vorläufiger Notbehelf nur die unter 1.) und 2.) genannten Einflüsse berücksichtigt. Auf die Herleitung der Korrektur soll hier verzichtet werden und nur das Ergebnis und seine Anwendung mitgeteilt werden.

Für die Umströmung eines dünnen Profils in ebener Parallelströmung ist außer dem Anstellwinkel das Wölbungsverhältnis  $f/l$  des Profils maßgebend. ( $f =$  Wölbungspfeil <sup>der Mittellinie</sup> von der Sehne aus gemessen,  $l =$  Profiltiefe). Befindet sich das Profil in einer kreisförmig gekrümmten Strömung mit dem Krümmungspfeil  $f^+$  der Stromlinie, bezogen auf eine Länge gleich der Profiltiefe, so wirkt es näherungsweise so wie ein Profil in nicht gekrümmter Strömung, dessen Wölbungsverhältnis um  $f^+/l$  verkleinert wird.

<sup>1)</sup> Veröffentlichung von H. Ludwig in Vorbereitung.

Die wirksame Profilwölbung, mit der man bei Berücksichtigung dieser Stromlinienkrümmung zu rechnen hat, wird also

$$\frac{f'}{l} = \frac{f}{l} - \frac{f^+}{l} \quad (1)$$

Dabei ist die Wölbungskorrektur  $f^+/l > 0$ , wenn die Stromlinie gleichsinnig gekrümmt ist, wie die Profilmittellinie, und im umgekehrten Fall  $< 0$ . Der Zusammenhang zwischen Wölbungskorrektur und Stromlinienkrümmung (vergl. Skizze) ergibt sich aus

$$\frac{l^2}{4} = f^+ (2\kappa - f^+),$$

was für kleine Werte  $\frac{l}{\kappa}$  in

$$\frac{f^+}{l} = \frac{1}{8} \frac{l}{\kappa}$$

übergeht.

Aus den Rechnungen von Helmbold und Ludwig erhält man die Wölbungskorrektur

$$\frac{f^+}{l} = \frac{c_a}{8\pi} \frac{l/D}{t/l} \left( \frac{E_1}{1-x^2} \cos^2 \varphi_w + E_2 \sin^2 \varphi_w \right) \quad (2)$$

bzw. für einen Optimumpropeller ( $\eta_1$  über  $r$  konstant)

$$\frac{f^+}{l} = \frac{c_a}{8\pi} \frac{l/D}{t/l} \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda_i}{x}\right)^2} \left( \frac{E_1}{1-x^2} + E_2 \left(\frac{\lambda_i}{x}\right)^2 \right) \quad (2a)$$

wobei  $E_1$  und  $E_2$  folgende Werte annehmen

x	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$E_1$	1,571	1,566	1,555	1,534	1,505	1,468	1,418	1,356	1,276	1,172	1,0
$E_2$	$\infty$	15,6	7,85	5,30	4,07	3,42	3,07	3,05	3,52	5,34	$\infty$

Abgesehen davon, daß der ideale Fortschrittsgrad  $\lambda_i = \frac{\lambda}{\eta_1}$  in  $\eta_1$  den Auftriebsbeiwert implizit enthält, ist also die Wölbungskor-

rektur im wesentlichen dem Auftriebsbeiwert  $c_a$ , sowie dem Blattbreitenverhältnis eines Flügels  $l/D$  direkt und dem Teilungsverhältnis  $t/l = \frac{2r\pi}{zt}$  umgekehrt proportional. Daraus ergibt sich übrigens, daß sich die Stromlinienkrümmung auf einen 4-flügeligen Propeller in geringerem Maß auswirkt als auf einen 3-flügeligen, wenn beide Propeller die gleiche Fläche, also auch das gleiche  $t/l$  haben.

Will man nun einen gegebenen Propeller nachrechnen, dann muß zunächst der Auftriebsbeiwert in erster Näherung ohne Berücksichtigung des Krümmungseinflusses berechnet werden. Dann erst kann die Wölbungskorrektur nach Gl. (2) oder (2a) ebenfalls nur näherungsweise ermittelt werden, und nun muß die Rechnung mit der "wirksamen Profilwölbung" wiederholt werden. Diese Iteration kann vermieden werden, wenn man die Wölbungskorrektur in einer Änderung des Auftriebsgradienten  $\frac{dc_a}{d\alpha}$  ausdrückt, was folgendermaßen geschieht.

In nicht gekrümmter Strömung sei

$$\frac{dc_a}{d\alpha} = c_a' \quad (\text{theoretisch für dünne Profile } c_a' = 2\pi)$$

Mit Berücksichtigung der Stromlinienkrümmung bzw. der dem Auftriebsbeiwert proportionalen Wölbungskorrektur  $f^+/l$  schreiben wir

$$\frac{dc_a}{d\alpha} = k c_a',$$

wobei definitionsgemäß  $k > 1$  für  $f^+/l < 0$  und  $k < 1$  für  $f^+/l > 0$  werden muß. Es ist jetzt nur noch die Beziehung zwischen  $k$  und  $f^+/l$  herzustellen. Wir gehen dabei von einem Profil aus, das mit dem Wölbungsverhältnis  $f/l$  in nicht gekrümmter Strömung den Auftriebsbeiwert  $c_a$  beim Anstellwinkel

$$\alpha = \frac{c_a}{c_{a1}} - 2 f/l \quad (3)$$

erreicht. Bringen wir dieses Profil in eine gekrümmte Strömung, so wird, wie oben schon erwähnt, die wirksame Profilwölbung

$$f'/l = f/l - f^+/l,$$

und zur Erzielung des gleichen Auftriebes ist jetzt der Anstell-

winkel

$$\alpha' = \frac{c_a}{c_a'} - 2 \left( \frac{f}{l} - \frac{f^+}{l} \right)$$

nötig. Soll nun der Einfluß der Stromlinienkrümmung dadurch erfaßt werden, daß unser Profil mit dem Wölbungsverhältnis  $f/l$  bei diesem Anstellwinkel  $\alpha'$  ebenfalls den Auftriebsbeiwert  $c_a$  ergibt, so ist der hierzu nötige Auftriebsgradient  $k c_a'$  analog Gleichung (3) durch

$$\alpha' = \frac{c_a}{k c_a'} - 2 f/l$$

gegeben. Durch Gleichsetzen der beiden Gleichungen für  $\alpha'$  wird

$$k = \frac{1}{1 + 2 \frac{f^+}{l} \frac{c_a'}{c_a}} \quad (4)$$

oder mit Gl. (2) bzw. (2a), wenn man noch  $c_a' = 2\pi$  setzt,

$$k = \frac{1}{1 + 0,5 \frac{l/D}{t/l} \left( \frac{E_1}{1-x^2} \cos^2 \varphi_w + E_2 \sin^2 \varphi_w \right)} \quad (5)$$

bzw. für den Optimumpropeller

$$k = \frac{1}{1 + 0,5 \frac{l/D}{t/l} \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda_i}{x}\right)^2} \left( \frac{E_1}{1-x^2} + E_2 \left(\frac{\lambda_i}{x}\right)^2 \right)} \quad (5a)$$

In Abb. 1 ist  $k$  nach Gl. (5a) für  $\frac{l/D}{t/l} = 0,1$  und  $1,0$  und die idealen Fortschrittsgrade  $\lambda_i = 0 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,3$  und  $0,4$  in Abhängigkeit von  $x$  dargestellt. Man sieht, daß eine Abhängigkeit von  $\lambda_i$  nur für die mittleren und inneren Blattzonen besteht und daß diese auch dort so gering ist, daß man unbedenklich  $\lambda_i$  durch  $\lambda$  ersetzen kann. Entscheidend für die Größenordnung von  $k$  ist jedoch der Wert  $\frac{l/D}{t/l}$ . In Abb. 2 ist deshalb  $k$  für  $\lambda_i = 0,3$  und verschiedene  $\frac{l/D}{t/l}$  zwischen 0 und 1,5 <sup>aufgetragen</sup>  $\lambda$  <sup>Wegen der geringen Abhängigkeit von  $\lambda$  wird dieses Diagramm zur näherungsweisen Berücksichtigung des Krümmungseinflusses für viele praktisch vorkommende Fälle bei ähnlichem  $\lambda$  genügen. Als Beispiel hierfür sei erwähnt, daß der Propeller 2658 beim Radius  $x = 0,7$  den Wert  $\frac{l/D}{t/l} = 0,93$</sup>

hat, wofür sich aus Abb.2  $k = 0,44$  ergibt. Das heißt nun freilich nicht, daß der Schub- bzw. Momentenbeiwert bei Berücksichtigung des Krümmungseinflusses auf 44% des Wertes sinkt, den man ohne Berücksichtigung des Krümmungseinflusses errechnen würde. Eine Verringerung des Auftriebsgradienten ergibt zwar geringere  $c_a$ -Werte. Diese haben aber ebenfalls eine Verkleinerung der induzierten Geschwindigkeiten bzw. des induzierten Anstellwinkels zur Folge, so daß der effektive Anstellwinkel zunimmt. Die Schubverringerng ist also geringer als die Verkleinerung des Auftriebsgradienten. Sie ist aber trotzdem recht erheblich und die nach den bisherigen Entwurfsverfahren gewohnte Unstimmigkeit zwischen Rechnung und Modellmessung wird bei Berücksichtigung der Krümmungskorrektur wesentlich gemildert. So wurde beispielsweise durch Nachrechnung des Propellers 2658 festgestellt, daß der Unterschied von 30% des ohne Krümmungskorrektur gerechneten Schubes gegenüber dem gemessenen jetzt auf etwa 7% zurückgeht.

Eine vollkommen befriedigende Übereinstimmung von Rechnung und Messung ergibt sich also immer noch nicht. Dies kann mit Rücksicht auf die doch ziemlich große, noch unvollständige und nur in grober Näherung erfaßbare Korrektur und die vielen sonstigen idealisierten Annahmen auch nicht erwartet werden. Vermutlich handelt es sich bei dem noch bleibenden Unterschied um einen weiteren Krümmungseinfluß, der beim Propellerentwurf empirisch dadurch berücksichtigt werden könnte, daß man den Faktor  $k$  um etwa 20% kleiner ansetzt als nach Gl.(5) bzw. (5a). Damit wurden beim Propeller 2711 gute Ergebnisse erzielt.

### III. Entwurfsverfahren.

Es soll nun der Entwurf eines kavitationsfrei arbeitenden Propellers kurz beschrieben werden. Auf die Ableitung von Formeln sei dabei verzichtet, nachdem das Schrifttum darüber genügend Aufschluß gibt.

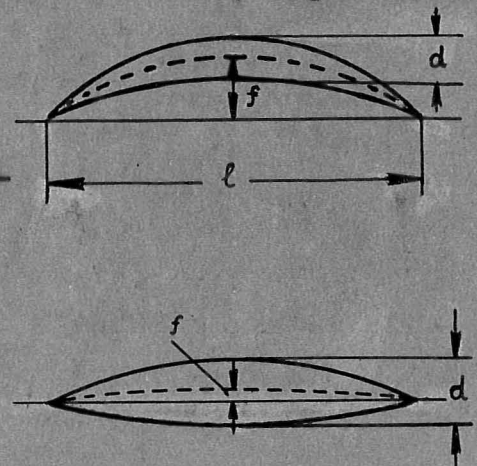
Gegeben seien:



Flügelzahl	$z$
Durchmesser	$D$ (m)
Drehzahl	$n$ ( $s^{-1}$ )
Leistung	$N$ ( $\text{mkg s}^{-1}$ )
Freifahrtgeschwindigkeit	$v_e$ ( $\text{m s}^{-1}$ )
Dichte des Wassers	$\rho$ ( $\text{kg m}^{-4} \text{s}^2$ )
Kavitationszahl (bezogen auf $v_e$ )	$\sigma_0 = \frac{p - e}{\frac{\rho}{2} v_e^2}$

Damit ist auch die Leistungsziffer  $k_l = \frac{N}{\frac{\rho}{2} U^3 D^2 \frac{\pi}{4}}$  bzw. der Momentenbeiwert  $C_2 = \frac{\pi^3}{16} k_l$  und der Fortschrittsgrad  $\lambda = \frac{v_e}{U} = \frac{v_e}{\pi n D}$  gegeben. Gesucht sei die Form des Propellers, der die verlangte Leistung ohne Kavitation aufnimmt.

Als Grundform der Profile legen wir Kreiszweiecke mit verschiedenem Wölbungs- und Dickenverhältnis zu Grunde (vergl. nebenstehende Skizze). Ferner verlangen wir, daß die Profile stoßfrei angeströmt werden sollen, weil bei diesem Zustand keine Unterdruckspitzen an der Eintrittskante auftreten und die Kavitationsgefahr im Verhältnis zum erreichbaren Auftrieb am geringsten ist. Stoßfreier Eintritt ergibt sich bei diesen Profilen aber gerade beim Anstellwinkel  $\alpha = 0^\circ$ . Nach der im AVA-Bericht 41/8/14 angedeuteten Näherungsrechnung ist für diese Profiltypen der gerade noch ohne Kavitation in Potentialströmung erreichbare Auftriebsbeiwert bei stoßfreiem Eintritt durch



$$c_a = 1,57 (\sigma_w - 2,55 \delta) \quad (6)$$

gegeben ( $\sigma_w$  = örtliche Kavitationszahl bezogen auf die Profilschwindigkeit,  $\delta = \frac{d}{l}$  = Dickenverhältnis).

Wir nehmen nun den Verlauf des Dickenverhältnisses  $\delta$  an, etwa nach einem ähnlichen Propeller. Von vornherein soll dabei  $\delta$  so klein gewählt werden, als es festigkeitsmäßig noch tragbar er-

scheint. Denn Gl.(6) zeigt, daß bei stoßfreiem Eintritt mit dünnen Profilen ein größerer Auftriebsbeiwert erzielt werden kann als bei gleicher Kavitationszahl mit dickeren. Dies beruht darauf, daß bei gleichen Übergeschwindigkeiten auf dem Profil, also bei gleicher Kavitationsgefahr das dünnere Profil stärker gewölbt sein darf als das dickere und daß der Auftriebsbeiwert bei stoßfreiem Eintritt dem Wölbungsverhältnis  $f/l$  proportional ist. Ein möglichst großer Auftriebsbeiwert ist aber erwünscht, damit die Profilgleitzahl, bzw. der Profilgütegrad möglichst günstig wird, ferner damit die Flügel mit Rücksicht auf die Herstellung nicht breiter als unbedingt nötig werden.

Nun berechnen wir für den wirksamen Blattschnitt, also etwa für  $x = 0,7$  die örtliche Kavitationszahl. Sie wird

$$\sigma_w = \sigma_0 \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{\lambda}\right)^2}$$

Die Druckänderung durch Strahldrehung ist bei diesem Radius noch zu vernachlässigen. Mit diesem  $\sigma_w$  und dem angenommenen  $\delta$  wird nach Gl.(6) der Auftriebsbeiwert für  $x = 0,7$  bestimmt und mit einem angenommenen Widerstandsbeiwert (etwa  $c_w = 0,008$ ) die mittlere Profilgleitzahl  $\epsilon = \frac{c_w}{c_a}$  gebildet. Die ideale Leistungsziffer wird dann bekanntlich nach Bienen-Karman [3]

$$k_{\lambda_i} = k_{\lambda} \frac{1}{1 + \frac{2}{3} \frac{\epsilon}{\lambda}}$$

Die Propellertheorie liefert uns nun aus vorliegenden Kurventafeln den ideellen Wirkungsgrad  $\eta_i$  als Funktion von  $z$ ,  $\lambda$  und  $k_{\lambda_i}$  [4]. Bei optimaler Schubverteilung ist  $\eta_i$  über dem Radius konstant, so daß der ideale Fortschrittsgrad  $\lambda_i = \frac{\lambda}{\eta_i}$  ebenfalls bekannt ist. Ferner kann der durch die endliche Flügelzahl bedingte Zirkulationsverminderungsfaktor  $\kappa$  als Funktion von  $z$  und  $\lambda_i$  ermittelt werden [4].

Bevor wir nun die Kavitationszahl für die anderen Schnitte ausrechnen können, muß noch der Druckabfall durch die Strahldrehung bestimmt werden. Nimmt man an der Mitte eines Profils, das sich im Abstand  $r$  von der Achse befindet, die mittlere induzierte

Tangentialgeschwindigkeit  $\kappa \frac{w_t}{2}$  an, so ist die Druckänderung gegenüber dem Strahlrand

$$\Delta p = - \int_r^R \rho \kappa^2 \frac{w_t^2}{4} \frac{1}{r} dr$$

Durch Einführen des ideellen Wirkungsgrades wird daraus

$$\frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2} v_e^2} = - 2 \left( \frac{1 - \eta_i}{\eta_i} \right)^2 \lambda_i^2 \int_x^1 \left( \frac{1}{x^2 + \lambda_i^2} \right)^2 \kappa^2 x dx \quad (7)$$

Sämtliche Größen auf der rechten Seite dieser Gleichung sind bereits bekannt, so daß nunmehr die örtliche Kavitationszahl für jeden Schnitt

$$\sigma_w = \left( \sigma_o + \frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2} v_e^2} \right) \frac{1}{1 + \left( \frac{x}{\lambda} \right)^2} \quad (8)$$

berechnet werden kann. Das Glied  $\Delta p / \frac{\rho}{2} v_e^2$  nach Gl.(7) wird sich erst in Nabennähe bemerkbar machen, ist aber dort zu berücksichtigen, nachdem eine frühere Untersuchung gezeigt hat, daß die der Nabe nächstliegenden Profile unter Umständen mehr kavitationsgefährdet sind als die äußeren.

Ebenso, wie es bereits für  $x = 0,7$  geschehen ist, sind nun die Auftriebsbeiwerte der übrigen Schnitte mit Gl.(6) und (8) und den angenommenen Werten für  $\delta$  zu bestimmen.

Bei optimaler Schubverteilung wird dann die Blattbreite

$$\frac{l}{D} = \frac{4\pi}{z} \frac{x\kappa}{c_a} \sin \varphi_w \operatorname{tg} (\varphi_w - \varphi) \quad (9)$$

wobei  $\varphi_w = \operatorname{arctg} \frac{\lambda_i}{x}$  und  $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\lambda}{x}$  sind.

Wir müssen jedoch prüfen, ob dieser Blattbreitenverlauf praktisch möglich ist, (z.B. könnte der Flügel in Nabennähe zu breit werden) und ändern ihn nötigenfalls entsprechend ab. Damit weichen wir freilich von der optimalen Schubverteilung ab. Aus Gl.(9) ermitteln wir nun rückwärts für das geänderte  $\frac{l}{D}$  den wirksamen Fortschrittswinkel  $\varphi_w$  unter Beibehaltung von  $c_a$  und des

strenggenommen nur für optimale Verteilung gültigen  $\kappa$ . Zur Kontrolle prüfen wir ferner, ob der Propeller mit dem geänderten Blattbreitenverlauf das verlangte Moment noch aufnimmt. Die Formel hierzu lautet

$$\frac{dM}{\rho n^2 D^5} = dC_2 = z \frac{\pi^2}{8} c_a \frac{l}{D} (x^2 + \lambda^2) \sin \varphi_w \left(1 + \frac{\varepsilon}{\operatorname{tg} \varphi_w}\right) x dx \quad (10)$$

Die Steigung wird  $H/D = x \pi \operatorname{tg} (\varphi_w + \alpha)$ , also in unserem Fall mit  $\alpha = 0$  (stoßfreier Eintritt)

$$H/D = \pi x \operatorname{tg} \varphi_w \quad (11)$$

Jetzt ist nur noch die Profilwölbung zu bestimmen. Das wirk-  
same Wölbungsverhältnis, das bei  $\alpha = 0$  den Auftriebsbeiwert  $c_a$   
liefert, ist

$$\frac{f'}{l} = \frac{1}{2} \frac{c_a}{c_a'} = \frac{c_a}{4\pi}$$

Das Wölbungsverhältnis des Propellerprofils unterscheidet sich  
davon durch die Krümmungskorrektur und wird gemäß Gl.(1) und (4)

$$\frac{f}{l} = \frac{f'}{l} \frac{1}{k}$$

wobei  $k$  aus Gl.(5) oder (5a) oder Abb.2 zu entnehmen ist. Mit  
Rücksicht auf die jetzt noch verbleibende Unstimmigkeit zwischen  
Rechnung und Messung versehen wir die Korrektur  $k$  noch mit dem  
empirischen Faktor 0,8 und erhalten somit das Wölbungsverhältnis  
der Profile

$$\frac{f}{l} = \frac{c_a}{4\pi} \frac{1}{0,8 k} \quad (12)$$

Mit Blattbreite, Steigung, Profildicke und Wölbung ist nun  
die Propellerform grundsätzlich gefunden. Die Propellerprofile  
ändern wir noch durch leichtes Abrunden der Eintrittskanten ge-  
genüber der Kreiszwieckform ab, damit der Anstellwinkelbereich

für stoßfreien Eintritt möglichst groß wird. Dies geschieht aus dem Grunde, weil der Propeller am Schiff je nach dem Widerstand (Änderung des Widerstandes beispielsweise infolge verschiedener Verdrängung, durch Bewuchs der Außenhaut, bei U - Booten je nach Über- oder Unterwasserfahrt u.a.) bei etwas verschiedenen Fortschrittsgraden und dementsprechend mit verschiedenen Auftriebsbeiwerten arbeitet. Es bleibt jetzt nur noch übrig, nachzurechnen, ob der gewählte Dickenverlauf festigkeitsmäßig tragbar ist. Der hierfür nötige Verlauf des Schubs und der Tangentialkraft ist durch folgende Formeln gegeben:

$$\frac{dS}{\rho n^2 D^4} = dC_1 = z \frac{\pi^2}{4} c_a \frac{l}{D} (x^2 + \lambda^2) \cos \varphi_w (1 - \varepsilon \operatorname{tg} \varphi_w) dx \quad (13)$$

$$\frac{dT}{\rho n^2 D^4} = z \frac{\pi^2}{4} c_a \frac{l}{D} (x^2 + \lambda^2) \sin \varphi_w \left(1 + \frac{\varepsilon}{\operatorname{tg} \varphi_w}\right) dx \quad (14)$$

#### IV. Meßergebnisse der Propeller 2711 und 2712.

Nach dem im vorigen Abschnitt beschriebenen Verfahren wurde zunächst der Propeller 2711 entworfen. Vorgeschrieben bzw. angenommen wurden die Leistung  $N = 35000$  Ps, die Drehzahl  $n = 390 \text{ min}^{-1}$ , der Durchmesser  $D = 3550$  mm, die Flügelzahl  $z = 3$  und als wahrscheinliche Schiffsgeschwindigkeit  $V_s = 38,5$  Kn, was bei  $1 \frac{1}{2} \%$  Mitstrom der Eintrittsgeschwindigkeit  $v_e = 19,5$  m/s entspricht. Nach den Angaben im HSVA - Bericht "Z 36a" beträgt die Kavitationszahl bei dieser Geschwindigkeit  $\sigma_0 = 0,7$ . Der angenommene Verlauf des Dickenverhältnisses  $\frac{d}{l}$  ist in Abb.3 zusammen mit den sich aus der Rechnung ergebenden Werten für Blattbreite  $l/D$ , Steigung  $H/D$ , Wölbungs - Dickenverhältnis  $f/d$  aufgetragen.

Beim Propellerentwurf 2712 ist die aus der Potentialtheorie gewonnene Gleichung (6) für den Kavitationsbeginn durch die Gleichung

$$c_a = 1,70 (\sigma_w - 2,30)$$

ersetzt, die mehr den Ergebnissen der Profilmessungen im Göttinger Kavitationstank entspricht. Da es nicht ganz sicher war, ob dieser Unterschied zwischen Profilmessungen und Potentialtheorie auf einen Einfluß der bei den Profilmessungen recht kleinen Reynoldsschen Zahlen zurückzuführen ist, sollte durch den Propellerversuch 2712 geklärt werden, ob tatsächlich ohne Kavitation ein größeres  $c_a$  erreicht werden kann, als nach Gleichung (6). Für die Propellerfertigung hätte ein größeres  $c_a$  den Vorteil, daß die Blattbreite nach Gleichung (9) kleiner gehalten werden könnte, was sich nebenbei in einer Wirkungsgradverbesserung ausdrücken würde. Das Dickenverhältnis wurde gleich angenommen wie beim Propeller 2711. Dagegen führt das größere  $c_a$  bei stoßfreiem Eintritt zu einer größeren wirksamen Wölbung. Die Wölbungskorrektur ist aber wegen der geringeren Blattbreite wieder kleiner als bei 2711 und zwar so, daß sich zufällig in beiden Fällen die gleiche Profilmölbung = wirksame Wölbung + Wölbungskorrektur ergab. Ebenso wurde die Steigung praktisch gleich. Man hat also den interessanten Fall, daß zwei Propeller mit geometrisch ähnlichen Profilen, gleicher Steigung, aber verschiedenen Flächen ( $F_a/F \approx 0,95$  bzw.  $0,8$ ) beim Betriebsfortschrittsgrad rechnerisch den gleichen Schub ergeben. Da ferner der Schub in beiden Fällen wegen der Ähnlichkeit der Profile und der gleichen Steigung bei demselben Fortschrittsgrad verschwinden muß, müßten also die über dem Fortschrittsgrad aufgetragenen Schubkurven praktisch zusammenfallen.

Die von der HSVa an Modellen mit  $250 \text{ mm } \phi$  bei einer Eintrittsgeschwindigkeit  $v_e = 5,5 \text{ m/s}$  gemessenen Schübe und Momente, sowie die daraus gerechneten Wirkungsgrade sind in den Abb. 4 und 5 über  $\frac{v_e}{nD}$  aufgetragen. Der Propeller 2711 ergab bei  $\frac{v_e}{nD} = 0,845$  den Schub  $S = 34,0 \text{ kg}$  und das Moment  $M = 1,74 \text{ mkg}$ , was mit der Rechnung ( $S = 33,4 \text{ kg}$  und  $M = 1,77 \text{ mkg}$ ) gut in Einklang steht. Ferner wurde durch Beobachtung festgestellt, daß bei  $\sigma_0 = 0,7$  abgesehen von einigen wenigen Kavitationsschläuchen, die von Schmutzstellen oder kleinen Unebenheiten an der Propellereintrittskante ausgingen, keine Kavitation auf dem Flügel vorhanden ist. Lediglich in der Nabenhohlkehle zeigte sich auf der Saugseite blasenförmige Kavitation, deren Ursache noch nicht geklärt ist. Eine merkliche Beeinflussung von Schub und Moment findet jedoch dadurch nicht statt.

Die Meßergebnisse des Propellers 2712 enttäuschen insofern, als die Schubkurve nicht mit der des Propellers 2711 zusammenfällt. Wohl sind die Neigungen beider Schubkurven mit abnehmendem Fortschrittsgrad ungefähr gleich groß, was auf die Richtigkeit der Krümmungskorrektur deutet. Aber die Fortschrittsgrade für verschwindenden Schub sind verschieden! Eine Erklärung hierfür ist noch nicht gefunden, nachdem eine Kontrolle der Propelleraufmaße, insbesondere der Steigung keine Abweichungen vom Sollwert ergab. Als wesentliches Ergebnis zeigt die Propellerform 2712 jedoch, daß trotz des zu kleinen Schubes bei den dem Entwurf zugrunde gelegten Werten  $\sigma_0 = 0,7$  und  $\frac{v_e}{nD} = 0,845$  bereits ausgedehnte Saugseitenkavitation von etwa halber Flügeltiefe bis etwa Hinterkante (also stoßfreier Eintritt) vorhanden ist und zwar von der Nabe bis etwa  $\frac{3}{4}$  R. Die Dampfschicht ist jedoch sehr dünn, sodaß auch hier noch keine Beeinflussung von Schub und Moment festzustellen ist. Der Versuch spricht also dafür, daß bei gegebener Kavitationszahl und gegebenem Dickenverhältnis ohne Kavitation kein größerer Auftriebsbeiwert erreicht werden kann, als nach Gleichung (6) und daß beim Entwurf tatsächlich mit Gleichung (6) gerechnet werden muß.

In Abb.6 sind die Modellmessungen für die Großausführung entsprechend 46 % Zuladung ausgewertet. Bei maximaler Leistungsaufnahme <sup>ergeben</sup> sich mit dem Durchmesser von 3550 mm folgende Resultate:

Propeller		2711	2712
$V_{\max}$	(Kn)	39,1	39,5
$n$	( $\text{min}^{-1}$ )	392	408
$\frac{v_e}{nD}$		0,85	0,82
$\sigma_0$		0,68	0,66
$\eta$		0,65	0,66

Während der Propeller 2711 noch keine Beeinflussung von Schub und Moment zeigt, ist eine solche beim Propeller 2712 vorhanden (vergl. Abb.5), allerdings ohne, daß der Wirkungsgrad beeinträchtigt würde. Durch eine geringe Vergrößerung des Durchmessers auf schätzungsweise 3620 mm bei sonst geometrisch ähnlicher Propellerform könnte die Drehzahl auf das verlangte Maß ( $390 \text{ min}^{-1}$ ) herabgedrückt werden. Dabei würde sich der Fortschrittsgrad auf

$\frac{v_e}{nD} = 0,835$  erhöhen, die Beeinflussung von Schub und Moment aber nicht ganz verschwinden. Wegen der mit der Kavitation verbundenen Gefahr der Materialzerstörung scheidet jedoch der Propeller 2712 sowieso für die Großausführung aus.

V. Schrifttum.

- [1] H.B. Helmbold, Über den Einfluß der Strahlkontraktion auf die Wirkungsweise breitflügeliger Schiffsschrauben. WRH XIV 1933.
- [2] F. Weinig, Strömung durch Profilvergitter und einige Anwendungen auf die Strömung in Propellern. Hydromech. Probleme des Schiffsantriebs 1932.
- [3] Th. Bienen und Th. v. Karman, Zur Theorie der Luftschrauben. Z VDI Bd 68 (1924) S. 1237 und 1315.
- [4] K. N. Kramer, Über einige Rechenblätter zur Berechnung von Schraubenpropellern, Bericht der DVL (Dir. Flugwerk) vom 25.9.1940.



k nach Gleichung (5a)

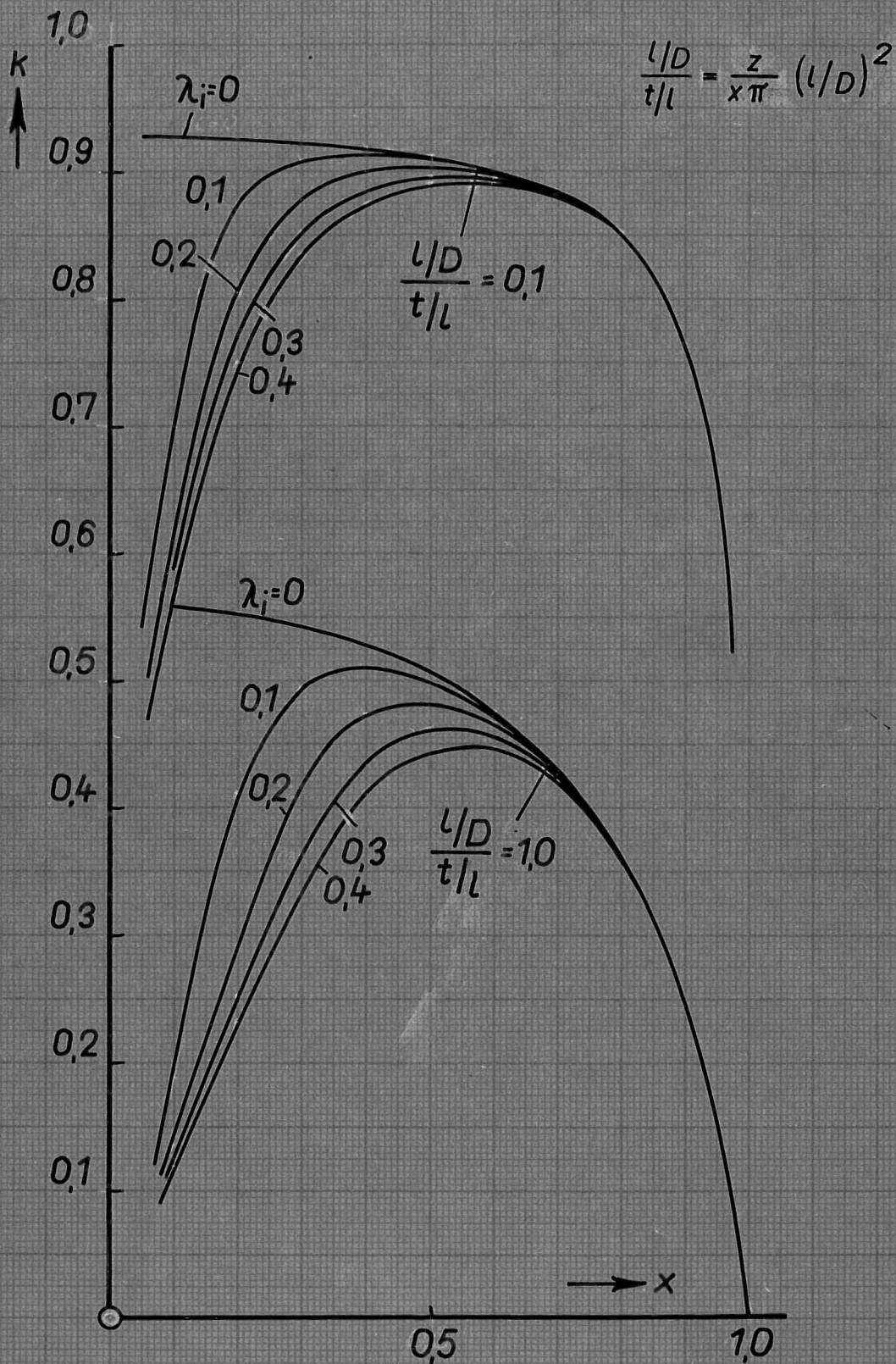


Abb.1

$k$  nach Gleichung (5a) für  $\lambda_j = 0,3$

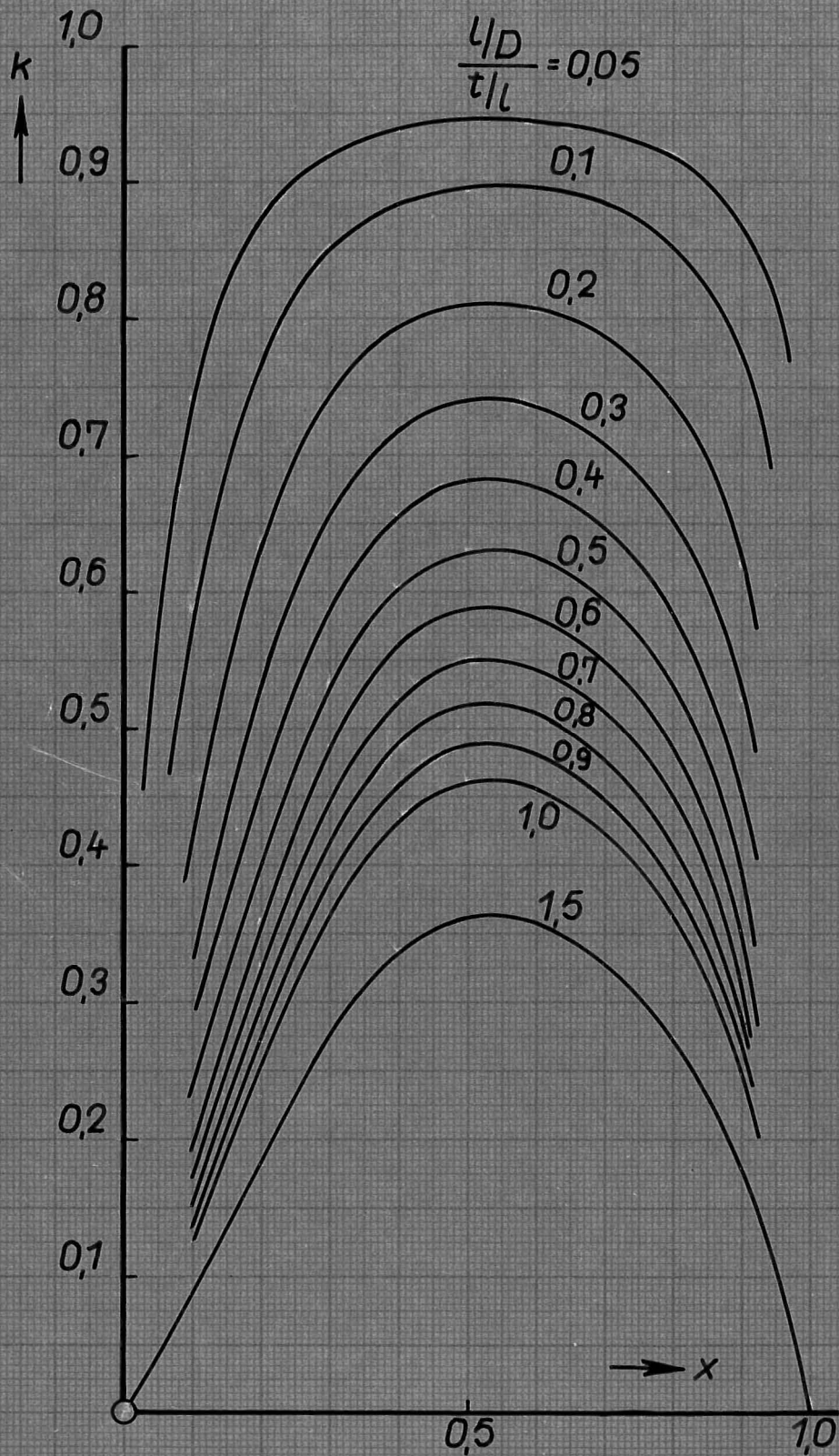


Abb.2

### Propellerformen 2711 u. 2712

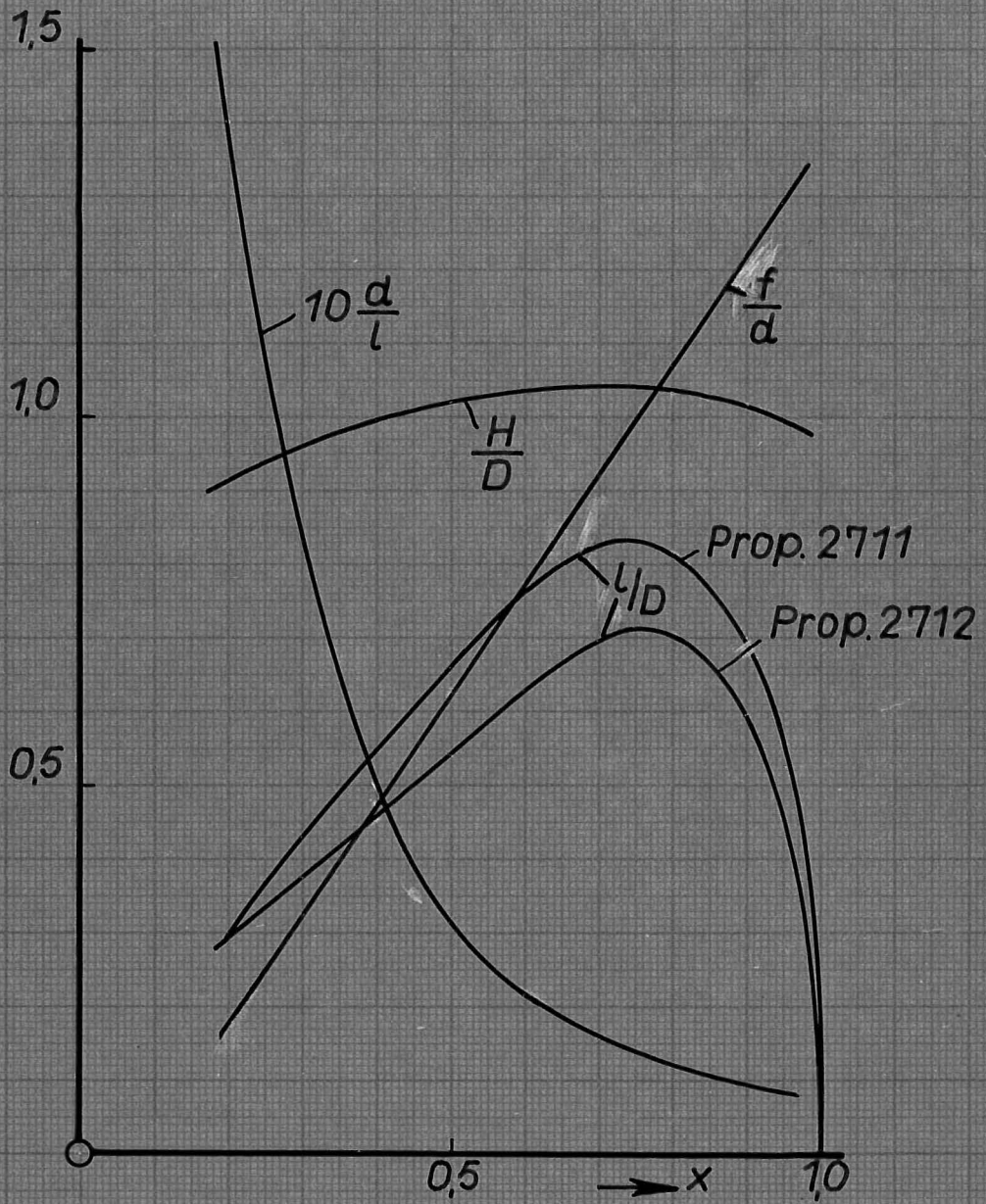
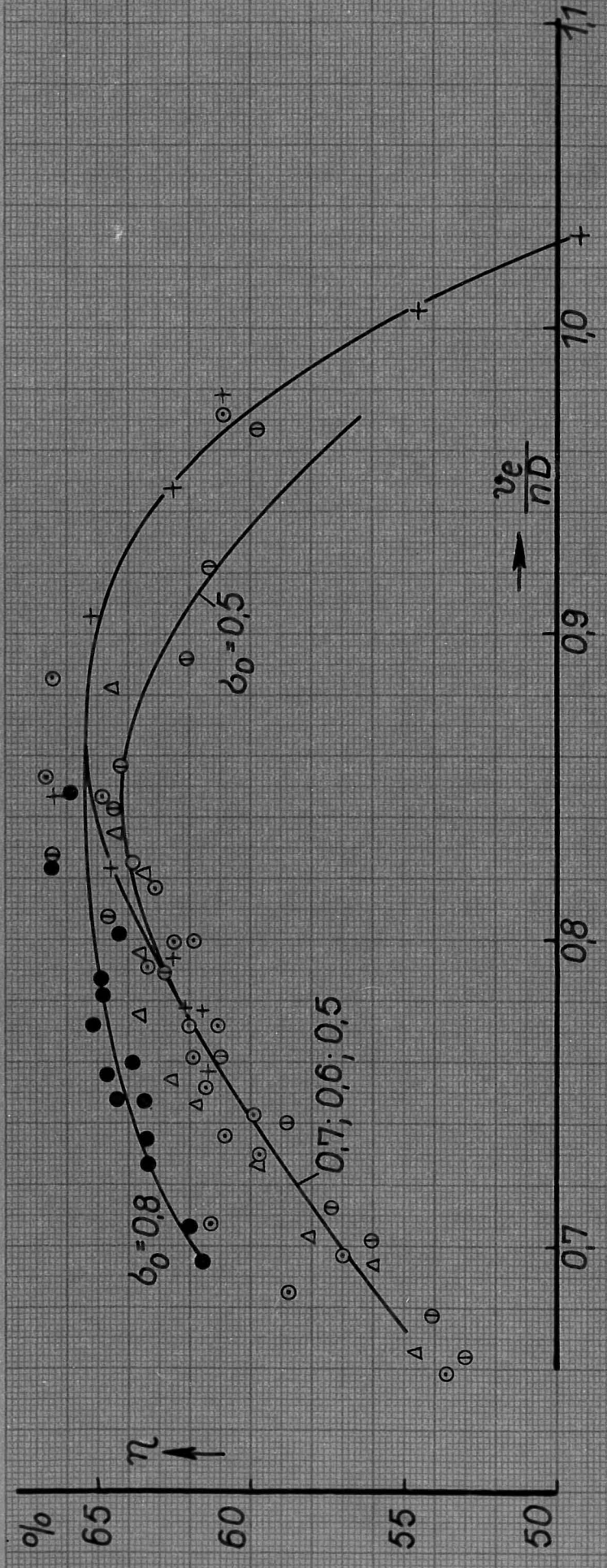
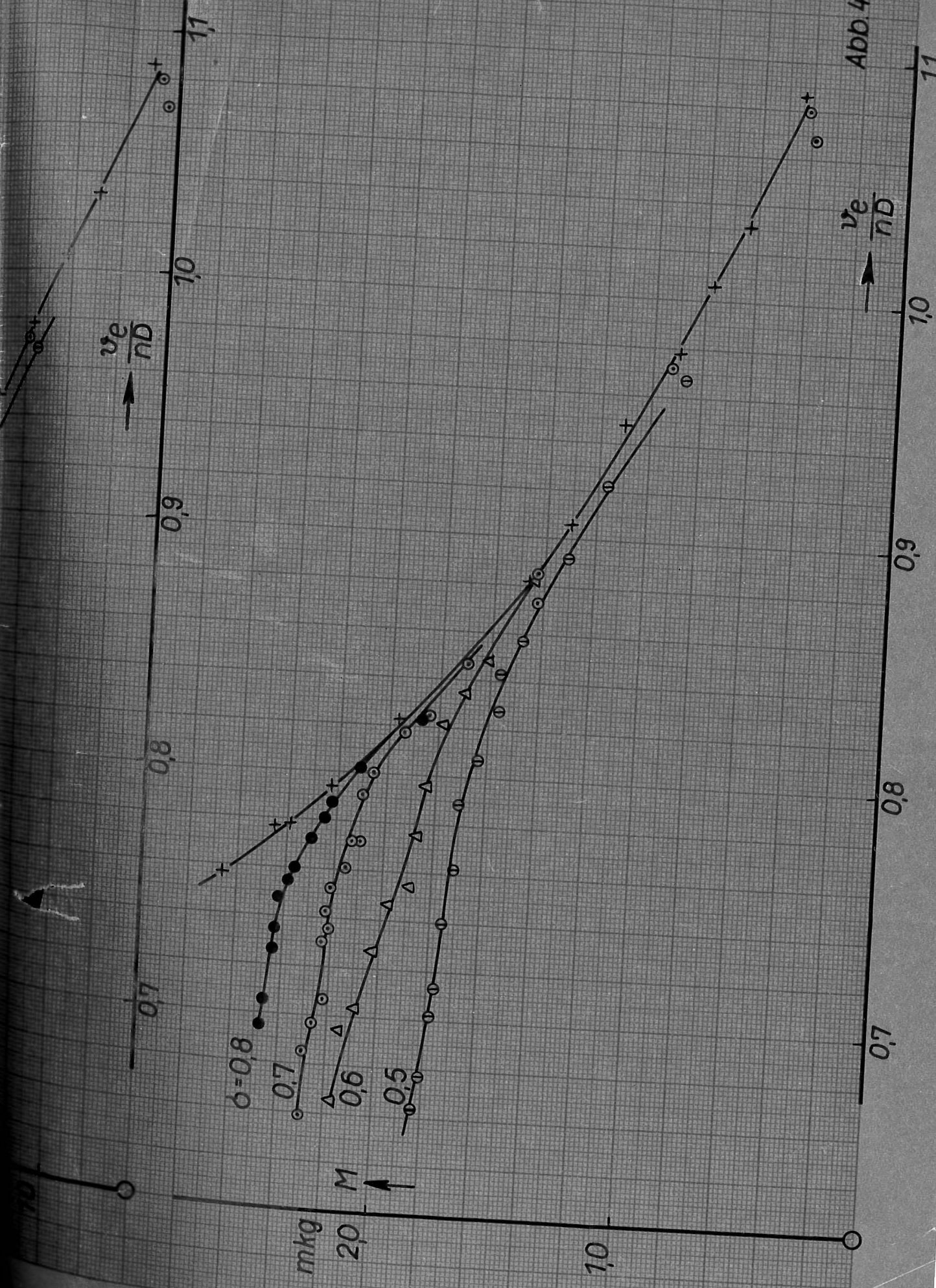
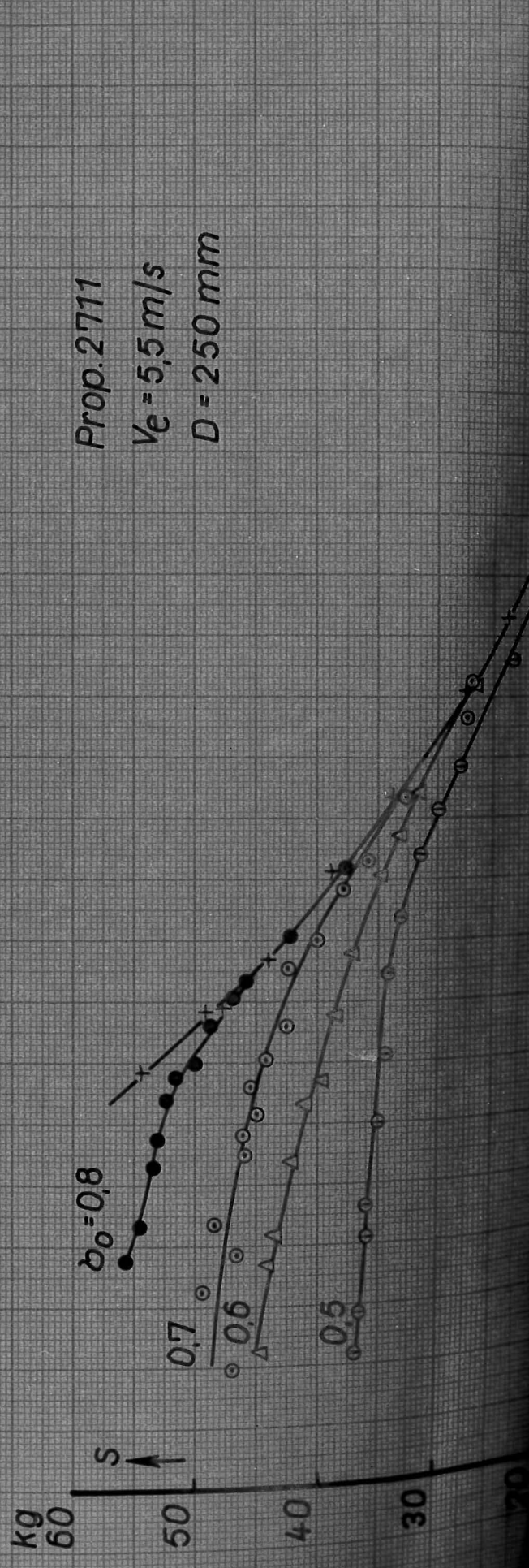
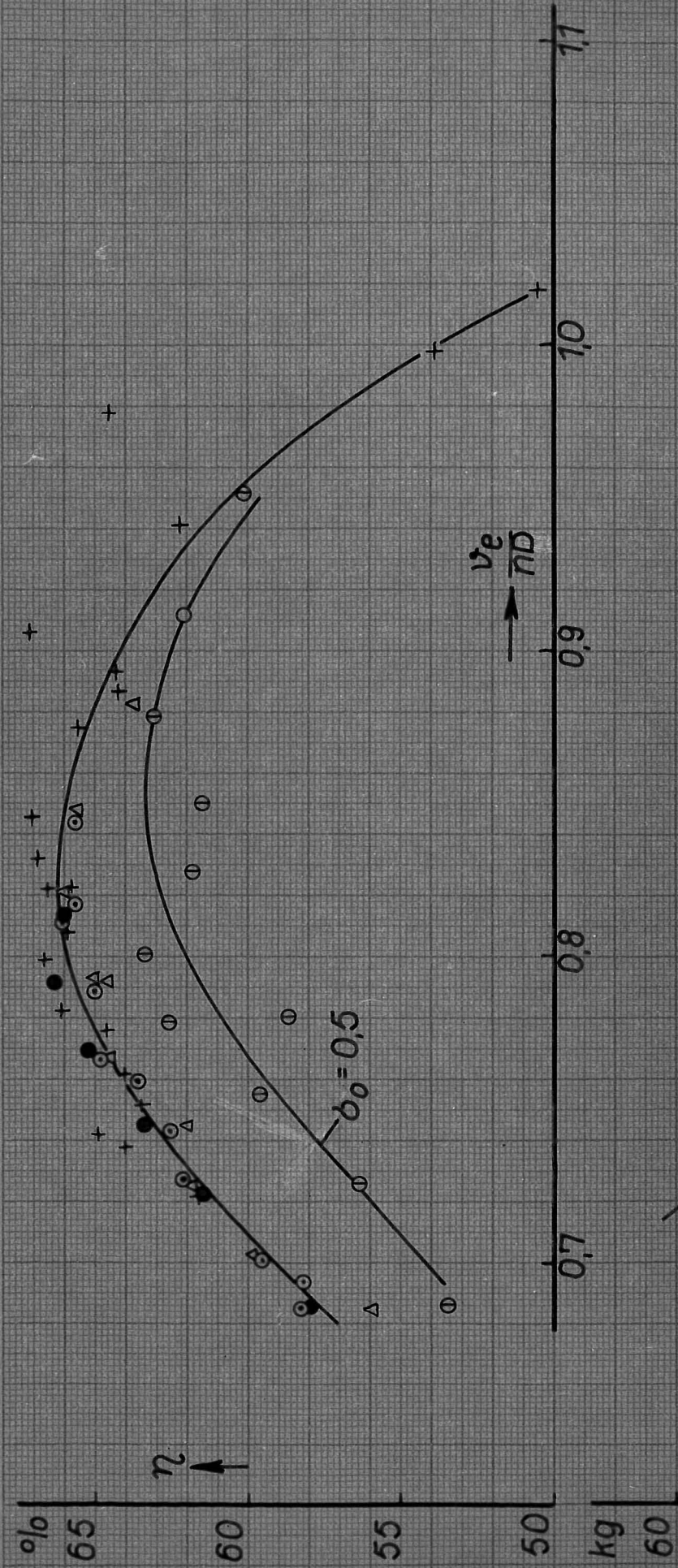


Abb. 3

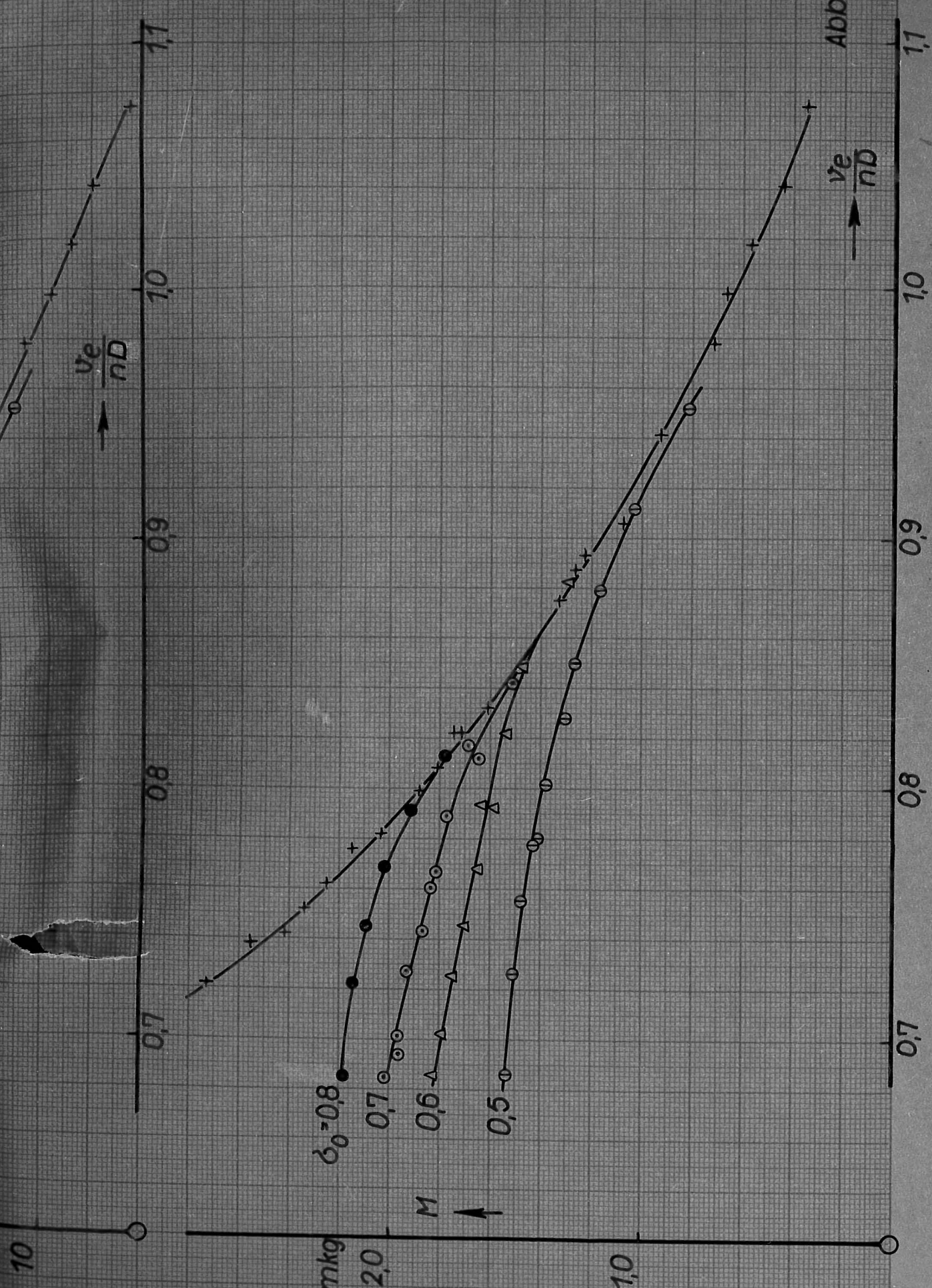
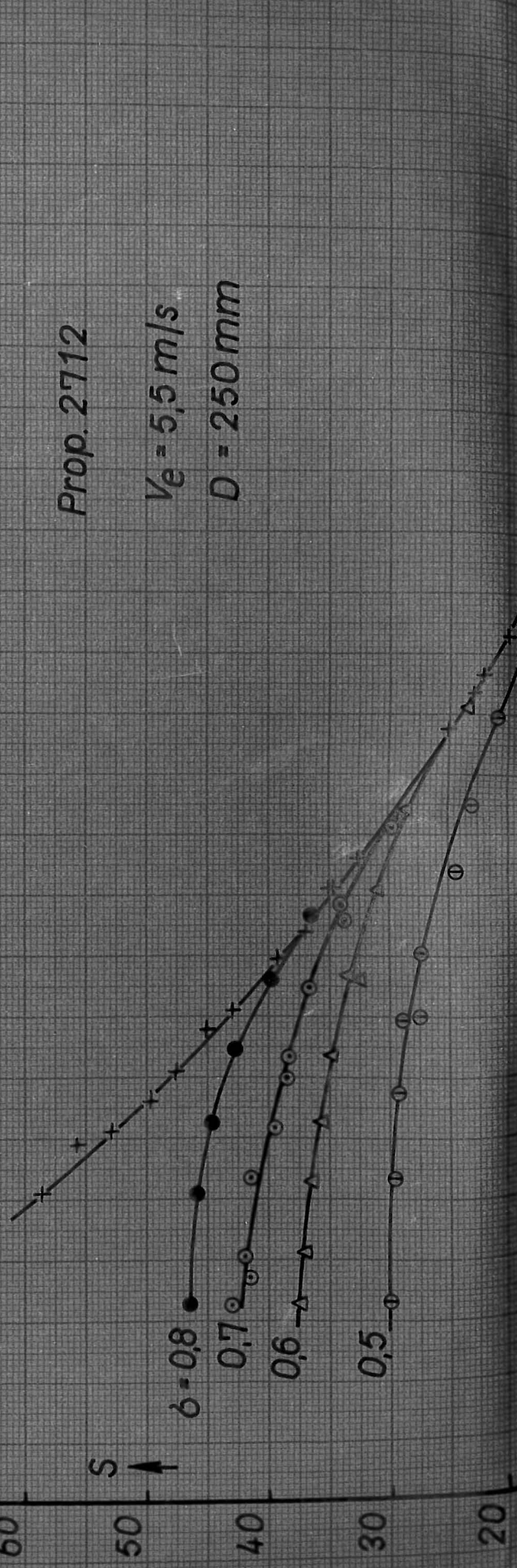


Prop. 2711  
 $V_e = 5.5 \text{ m/s}$   
 $D = 250 \text{ mm}$





Prop. 2712  
 $v_e = 5.5 \text{ m/s}$   
 $D = 250 \text{ mm}$



● Prop. 2711 } für Z 36 a bei 46% Zuladung  
 ○ Prop. 2712 } (D = 3550 mm)

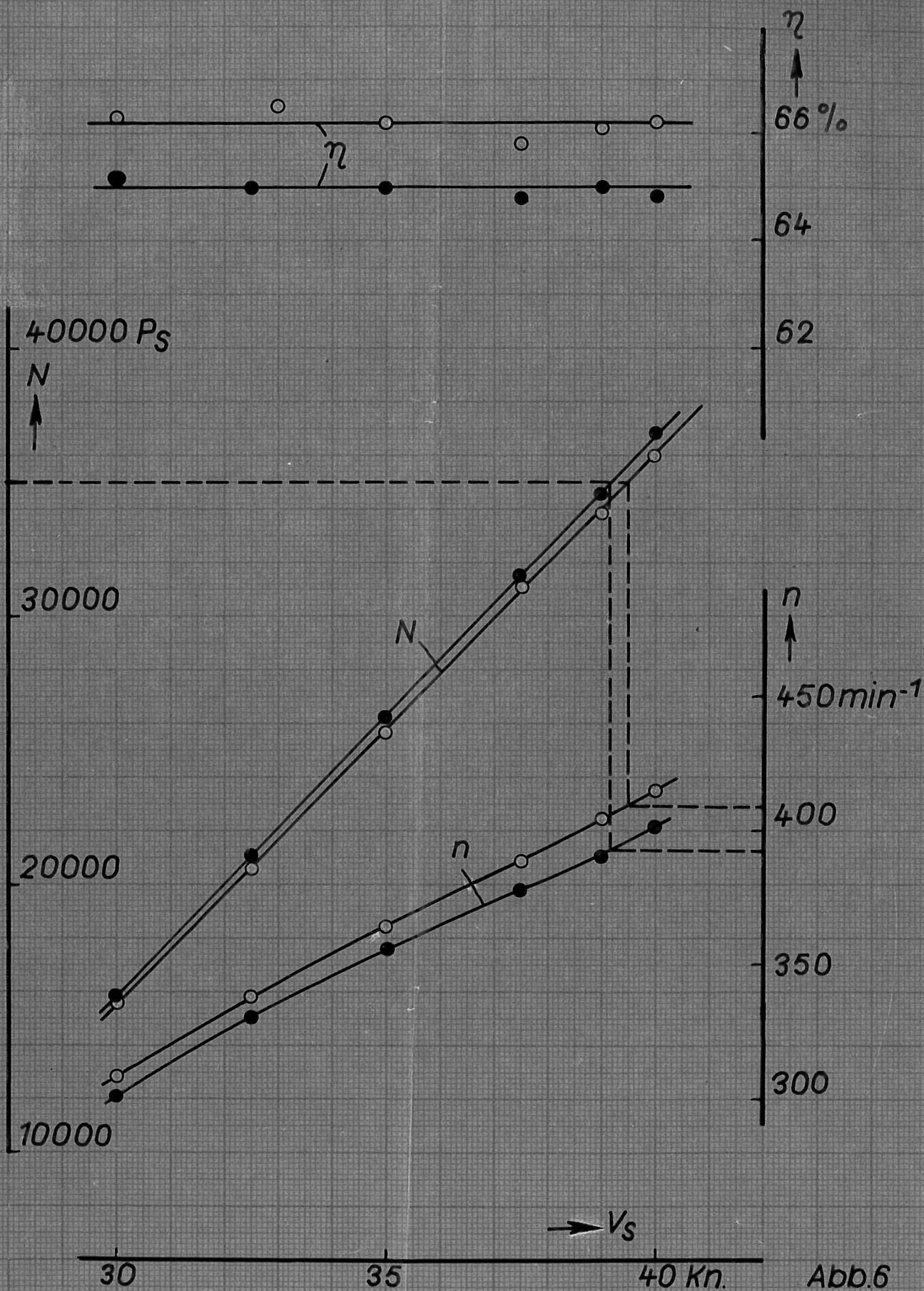


Abb. 6