

126 | 1959

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Dipl.-Ing. O. Krappinger und Dipl.-Ing. M. Müller

Berechnungsunterlagen für Schaufelräder

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

Berechnungsunterlagen für Schaufelräder

von

Dipl.-Ing. O. Krappinger

und

Dipl.-Ing. M. Müller

**Lehrstuhl für Entwerfen von Schiffen am
Institut für Schiffbau der Universität
Hamburg, Prof. Dr.-Ing. K. Wendel. 1959**

Die Modellversuchsergebnisse, auf denen die folgenden Berechnungsunterlagen für Schaufelräder aufbauen, wurden in dankenswerte Weise von H. Volpich, B. Sc., Leiter der Versuchsanstalt von William Denny & Brothers Ltd., Dumbarton, zur Verfügung gestellt.

Der Zentral-Verein für deutsche Binnenschifffahrt hat durch finanzielle Zuwendungen die mit der Ausarbeitung der folgenden Berechnungsunterlagen verbundenen Arbeiten ermöglicht.

1. Einführung

Der erste schriftliche Bericht über die Verwendung von Schaufelrädern stammt von R. Valturgius. Er ist uns in seiner im Jahre 1472 erschienenen Arbeit "De Re Militari" überliefert. Es ist aber anzunehmen, dass durch Menschenkraft betriebene Räder schon vor dieser Zeit bekannt waren. Die ersten Vorschläge, die Räder durch Dampfmaschinen anzutreiben, wurden von Papier (1647 - 1714) und J. Hulls (1737) gemacht. Wirklich ausgeführt wurden dampfbetriebene Räder aber erst in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts. In den folgenden Jahren erfreute sich der Radantrieb von Fluss- und Küstenschiffen auf der ganzen Welt grosser Beliebtheit. Auch Seeschiffe wurden damit angetrieben.

Bald nach dem Aufkommen der Schiffsschraube verschwand das Schaufelrad im Seeschiffbau; die Räder waren den Beanspruchungen im Seegang nicht gewachsen und wurden in ihrer Wirkung durch die Tiefgangsschwankungen der Frachtschiffe beeinträchtigt. Auch im Binnenschiffbau fand der Schraubenpropeller bald Eingang. Allerdings konnte er hier das Schaufelrad zunächst nicht so weitgehend verdrängen wie im Seeschiffbau. Für Schlepper und Fahrgastschiffe blieb das Rad das bevorzugte Propulsionsmittel. Erst als sich die Dieselmotoren auch auf dem Gebiet des Schiffsantriebes wegen ihrer Vorteile (geringes Gewicht, personalsparende Bedienung, wirtschaftlicher Betrieb) immer mehr und mehr einführten, schien auch für diese Schiffe der Zeitpunkt gekommen, den Radantrieb zu verlassen. Die hochtourigen Dieselmotoren eigneten sich viel besser zum Antrieb

der ebenfalls schnelllaufenden Propeller als der langsam laufenden Schaufelräder. Es waren also nicht Mängel des Radantriebes, die beinahe zu seinem Aussterben führten, sondern die Vorstellung, dass die Räder ein Teil des bei Binnenschiffen heute nicht mehr infrage kommenden Dampfantriebes sind. Diesem Trugschluss ist man allerdings nicht überall erlegen: z.B. hat die Britische Admiralität in den letzten Jahren eine ganze Reihe von Radschleppern bauen lassen und auch auf der Donau geht man nicht vom Radantrieb für Schlepper und Passagierschiffe ab. Selbstverständlich erhielten diese neuen Radschiffe alle Dieselantrieb; mit Hilfe der modernen Getriebetechnik und der dieselelektrischen Antriebe wurde das Problem der Kombination des schnelllaufenden Dieselmotors mit dem langsam laufenden Rad auf elegante und alle Forderungen befriedigende Weise gelöst. Sicher sind diese Lösungen nicht gerade billig. Wenn sie trotzdem gewählt werden, so nur deshalb, weil der Radantrieb Vorteile hat, die die dafür aufgewandten Kosten rechtfertigen. Bei einem Vergleich zwischen Schaufelrad und Schraubenpropeller ist auch zu berücksichtigen, dass sich die Wissenschaft mit letzterem sehr ausgiebig beschäftigt hat, während das Rad bisher nur wenig Beachtung fand. Es können deshalb auf dem Gebiet des Radantriebes grössere Fortschritte gegenüber dem heutigen Stand erwartet werden als auf dem Gebiet des Schraubenantriebes, der schon einen hohen Grad an Vollkommenheit erreicht hat. Freilich wird auch eine intensive Beschäftigung mit dem Schaufelrad nicht zu einer universellen Anwendung dieses Propulsionsmittels führen. Wohl aber kann man annehmen, dass sich das Rad als die beste Lösung für einzelne spezielle Propulsionsaufgaben erweist. Das ist Grund genug, sich ausgiebiger als bisher mit dem Radantrieb zu beschäftigen.

2. Grundlagen der Schaufelradberechnung

a) Überblick über grundlegende Arbeiten. Bald nach Einführung der Modellversuchstechnik im Schiffbau wurden auch mit Rädern Modellversuche angestellt. Da dabei die hydrodynamischen Gesetzmässigkeiten nicht beachtet wurden haben diese Versuche aber nur einen recht zweifelhaften Wert.

Einen beachtlichen Fortschritt brachten Versuche von Gebers /1/, die er 1939 - 1943 in der Wiener Versuchsanstalt durchführte und 1952 veröffentlichte. Er folgerte aus der Tatsache, dass das Schaufelrad Wellen erzeugt, dass für die Umrechnung von Modellversuchen mit Schaufelrädern das Froudesche Ähnlichkeitsgesetz gilt. Ferner zeigte er auch, dass sich die Ergebnisse von Versuchen mit Radmodellen nicht in gleicher Weise dimensionslos darstellen lassen, wie die von Versuchen mit Schrauben. Er hat deshalb die bei seinen Versuchen gemessenen Grössen (Schub- und Drehmoment in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit) direkt aufgetragen.

Horn hat versucht, aus den Gebers'schen Versuchen ein Berechnungsverfahren für Schaufelräder abzuleiten (veröffentlicht in einem Anhang zu /1/). Er führte dabei zwar eine aus der Drehzahl hergeleitete Froudesche Zahl ein, beschränkte sich im wesentlichen aber auf die empirische Bestimmung einer Beziehung zwischen den Ergebnissen der einfachen Strahltheorie und der Modellversuche.

Aufgrund der Gebers'schen Arbeit wurde 1954 vom erstgenannten Verfasser ein das Froudesche Ähnlichkeitsgesetz berücksichtigendes Berechnungsverfahren für Schaufelräder, das von Modellversuchsergebnissen ausgeht, angegeben /2/. Dabei wurde u.a. gezeigt, dass auch die Ergebnisse von Radversuchen dimensionslos und in einer für praktische Rechnungen brauchbaren Form dargestellt werden können.

Systematische Versuche mit Schaufelrädern wurden von Volpich durchgeführt und 1955 bis 1957 veröffentlicht /3/. Ihr grosser Wert besteht darin, dass sie es dem Konstrukteur ermöglichen, aus einer verhältnismässig grossen Mannigfaltigkeit von Rädern das jeweils beste auszuwählen. Für die Darstellung der Versuchsergebnisse hat Volpich das in /2/ angegebene Verfahren etwas abgewandelt. Dadurch erreichte er eine platzsparende Auftragsweise, allerdings auf Kosten der Ablesbarkeit und Übersichtlichkeit. Besonders nachteilig ist auch, dass er im Gegensatz zu /2/ nicht rein dimensionslose Grössen verwendet, so dass beim praktischen Gebrauch der Volpichschen Diagramme Umrechnungen vom englischen auf das metrische Masssystem erforderlich sind.

Es sei hier noch erwähnt, dass man sich in den letzten Jahren auch in Russland sehr ausgiebig mit den Schaufelradantrieb beschäftigt hat. Die Verfasser hatten Gelegenheit, eine zusammenfassende Arbeit von Basin einzusehen, die zeigt, dass der durch die Arbeiten /1/, /2/ und /3/ dargestellte Stand in Russland schon um die Mitte der dreissiger Jahre erreicht worden war. Da über die russischen Arbeiten kaum etwas Näheres bekannt geworden ist, wird dadurch die Bedeutung der obengenannten Arbeiten auf diesem Gebiet nicht geschmälert.

b) Ähnlichkeitsgesetze. Damit 2 Räder dynamisch ähnlich sind, müssen sie zunächst geometrisch ähnlich sein. Diese Forderung schliesst ein, dass auch ihre Eintauchung ähnlich ist. Weiter müssen aber auch die auftretenden Kräfte ähnlich sein. Vernachlässigt man wie bei ähnlichen Problemen üblich elastische und Kapillarkräfte, so bleiben folgende Kräftearten übrig: Druckkräfte, Trägheitskräfte, Schwerkraft und der Zähigkeit proportionale Kräfte.

Die Bedingung, dass die drei erstgenannten Kräftearten jeweils ähnlich sein sollen, führt auf das Froudesche Ähnlichkeitsgesetz. Damit die der Zähigkeit proportionalen Kräfte ähnlich werden, muss das Reynoldssche Ähnlichkeitsgesetz erfüllt werden. Die gleichzeitige Erfüllung dieser beiden Ähnlichkeitsgesetze für zwei verschieden grosse Räder ist praktisch nicht möglich.

Auch der bei den Modellversuchen zur Widerstandsermittlung von Schiffen gebräuchliche Weg, die durch die Zähigkeit bedingten Kräfte zu berechnen und nur die nach Abzug dieser Kräfte übrig bleibenden nach Froude umzurechnen, kann bei Schaufelrädern nicht beschritten werden, da hier bis heute keine der auftretenden Kräftearten für sich bestimmt werden kann.

Aus den Versuchen /1/ und /3/ kann man aber entnehmen, dass schon durch die Erfüllung des Froudeschen Ähnlichkeitsgesetzes allein eine recht gute näherungsweise Ähnlichkeit erreicht wird. Es liegt daher nahe, bei der Umrechnung von Modellversuchsergebnissen von Schaufelrädern nur das Froudesche Ähnlichkeitsgesetz zu berücksichtigen und dabei einen gewissen Fehler in Kauf zu nehmen. Leider ist es nicht möglich, über die Grösse dieses Fehlers genaue Aussagen zu machen. Man kann aber annehmen, dass der Wirkungsgrad eines grossen Rades im allgemeinen besser ist als der eines kleinen. Bei der Umrechnung von Modellversuchsergebnissen liegt man deshalb auf der sicheren Seite.

c) Dimensionallose Auftragung von Versuchsergebnissen.

Unter Berücksichtigung des Froudeschen Ähnlichkeitsgesetzes kann man für die Geschwindigkeit, die Drehzahl, den Schub und die Leistung folgende dimensionslose Kennziffern einführen:

Geschwindigkeit v [m/s]

$$F_R = \frac{v}{\sqrt{g \cdot R_2}}$$

Drehzahl n [1/s]

$$r_n = n \cdot \sqrt{\frac{R_2}{g}}$$

(r_n ist abgeleitet aus einer auf die Umfangsgeschwindigkeit bezogenen Froudeschen Zahl $\frac{u}{\sqrt{g \cdot R_2}} = \frac{2\pi \cdot n \cdot R_2}{\sqrt{g \cdot R_2}} = 2\pi \cdot n \cdot \sqrt{\frac{R_2}{g}}$)

Schub S [kg]

$$r_s = \frac{S}{g \cdot R_2^3}$$

Leistung N [PS]

$$r_N = \frac{N}{g \cdot g^{1/2} \cdot R_2^{7/2}}$$

Dabei bedeutet:

R_2 [m]

Zapfenkreisradius

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Erdbeschleunigung

$\rho \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4} \right]$

Dichte des Wassers.

Durch Kombination obenstehender dimensionsloser Kenngrößen können noch weitere Kenngrößen gebildet werden. Zwei solcher Kombinationen sollen hier angegeben werden:

Schub und Geschwindigkeit $r_{sv} = \frac{S^{1/3} \cdot g^{2/3}}{v^2 \cdot \rho^{1/3}} = \frac{r_s^{1/3}}{F_R^2}$

Leistung und Geschwindigkeit $r_{Nv} = \frac{N^{1/3} \cdot g^{2/3}}{v^{7/3} \cdot \rho^{1/3}} = \frac{r_N^{1/3}}{F_R^{7/3}}$

Bei Modellversuchen wird der Schub und die Leistung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bestimmt. Wenn man nun statt S oder N über v mit n als Parameter aufzutragen, r_s oder r_N über F_R mit r_n als Parameter in ein Diagramm einträgt, so gilt diese Darstellung (näherungsweise) für Räder beliebiger Grösse, vorausgesetzt, dass sie dem Modellrad geometrisch ähnlich sind. Man kann diese Darstellung noch erweitern, indem man in die Diagramme r_s über F_R bzw. r_N über F_R auch die für zusammengehörende Werte F_R, r_n, r_s (entsprechend v, n, S) bzw. F_R, r_n, r_N (entsprechend v, n, N) ermittelten Wirkungsgrade einträgt und die Punkte gleichen Wirkungsgrades durch Kurven verbindet. Weiter kann man in die Diagramme r_s über F_R Kurven $r_{sv} = \text{const.}$ und in die Diagramme r_N über F_R Kurven $r_{Nv} = \text{const.}$ eintragen. Auf den Zweck dieser Kurven wird später eingegangen werden.

Die im Anhang gebrachten Berechnungsdiagramme sind nach den vorstehenden Angaben aufgebaut.

3. Die systematischen Schaufelradversuche von Volpich

Wie schon weiter oben erwähnt, stammen die einzigen z.Zt. vorliegenden Schaufelradversuche, die die Bezeichnung "systematisch" verdienen, von Volpich. Sie sind auch die Grundlage der im Anhang gebrachten Berechnungsdiagramme.

Bild 1 zeigt schematisch den von Volpich untersuchten Schaufelradtyp. Es wurden 19 Varianten dieses Typs geschleppt. Mit Hilfe von Bild 1 und Tabelle 1 können die Varianten, die mit den Buchstaben A bis T bezeichnet sind, rekonstruiert werden.

In Tabelle 2 sind die Serien zusammengestellt, die sich aus den untersuchten Radvarianten bilden lassen. Trotz der umfangreichen Versuchsarbeit von Volpich bleiben hier noch einige Wünsche offen: so wäre z.B. der Einfluss verschiedener Exzenterlagen bei verschiedenen Tauchungen von Interesse. Auch über den Einfluss der Schaufelhöhe geben diese Modellversuche keine Auskunft.

Der Durchmesser der Modelle betrug 1040 mm, gemessen über die Schaufelspitzen. Dieser grosse Wert lässt eine recht gut Genauigkeit der Versuchsergebnisse erwarten. In diesem Zusammenhang ist allerdings darauf hinzuweisen, dass man - zu mindest bei dem heutigen Stand unseres Wissens - in bezug auf die Genauigkeit bescheiden sein muss. Dies nicht nur wegen der im Abschnitt über die Ähnlichkeitsgesetze erwähnten Vernachlässigungen, sondern auch wegen der Schwierigkeit, die sehr zahlreichen Variationsmöglichkeiten gebührend zu berücksichtigen. Hinzu kommt noch, dass auch der Einfluss des Schiffes auf das Rad weitgehend ungeklärt ist. Unter diesen Umständen ist es leicht zu verschmerzen, dass die Berechnungsdiagramme, und zwar schon die von Volpich mitgeteilten, geringe Ungenauigkeiten enthalten. Es ist klar, dass bei der Ableitung der im Anhang wiedergegebenen Diagramme aus den Volpich'schen die Genauigkeit nicht erhöht werden konnte.

4. Praktische Radberechnungen

Beim Entwurf von Schaufelrädern kommt es darauf an, das für die gegebenen Verhältnisse am besten geeignete Rad zu bestimmen. Auch wenn man sich darauf beschränkt, nicht das absolut beste Rad, sondern nur das beste unter den 19 Varianten von Volpich zu bestimmen, ist diese Aufgabe zumindest langwieriger als eine Propellerrechnung aufgrund von Auswahldiagrammen.

Im folgenden wird die Radberechnung anhand von Beispielen gezeigt. Die Beispiele unterscheiden sich durch die Grössen, die als bekannt vorausgesetzt werden. Damit die Aufgabe bestimmt ist, müssen von den Grössen Schub S , Leistung N , Geschwindigkeit v , Wirkungsgrad η , Drehzahl n , Zapfenkreisradius R_z drei gegeben sein. Die restlichen können dann mit Hilfe der Berechnungsdiagramme bestimmt werden.

a) gegeben: S , v , R_z

Es sei die Schiffsgeschwindigkeit $v_s = 21 \text{ km/h}$ ($= 5,83 \text{ m/s}$),
der Schiffswiderstand dabei $W = 4900 \text{ kg}$ und
der grösse zulässige Aussendurchmesser der
Seitenräder $D_a = 4,7 \text{ m}$

Mit einer Mitstromziffer $^+)$ $\psi = -0,06$ und einer Sogziffer $^+)$ $\phi = 0,13$ findet man für die Eintrittsgeschwindigkeit des Wassers in das Rad:

$$v = (1 - \psi) \cdot v_s = (1 - (-0,06)) \cdot 5,83 = 6,18 \text{ m/s};$$

für den Schub (der von 2 Rädern aufgebracht werden muss):

$$S = \frac{W}{1 - \phi} = \frac{4900}{1 - 0,13} = 5630 \text{ kg}$$

Für ein Rad ist der Schub

$$S = \frac{1}{2} S = 2815 \text{ kg}$$

$^+)$ Über die Mitstrom- und Sogziffer siehe Abschnitt 5

Mit den Angaben in Bild 1 kann man den dem Aussendurchmesser von 4,7 m entsprechenden Zapfenkreisradius ermitteln; wegen $R_a = 1,212 R_z$ ist

$$R_z = \frac{1}{2} \frac{1}{1,212} D_a = \frac{4,7}{2 \cdot 1,212} = 1,94 \text{ m}$$

Mit den Werten S , v und R_z berechnet man

$$F_R = \frac{v}{\sqrt{g \cdot R_z}} = \frac{6,18}{\sqrt{9,81 \cdot 1,94}} = 1,41$$

und

$$r_s = \frac{S}{g \cdot R_z^3} = \frac{2815}{1000 \cdot 1,94^3} = 0,385$$

Mit diesen Grössen kann man nun aus jedem der Berechnungsdiagramme A bis T, die r_s über F_R enthalten, r_n und η bestimmen. Das beste Rad unter den Varianten A-T ist natürlich das mit dem besten Wirkungsgrad. Um diese langwierige Arbeit zu verkürzen, sind Orientierungsdiagramme Bild 2 - 6 ausgearbeitet worden, aus denen man sehr schnell entnehmen kann, welche Räder bei den vorliegenden Verhältnissen die besten Wirkungsgrade haben. Die Orientierungsdiagramme zeigen nämlich, welches Rad der jeweiligen Serie bei einem bestimmten Wertepaar das beste ist. Ausserdem kann man daraus auch den Wirkungsgrad des besten Rades für dieses Wertepaar ablesen.

Für das Beispiel ($F_R = 1,41$, $r_s = 0,385$) findet man aus Bild 2 (Tauchungsserie) günstigstes Tauchungsverhältnis T/ R_z zwischen Tauchungsverhältnis des Rades B und des Rades C; erreichbarer Wirkungsgrad etwa 76%; aus Bild 3 und 4 (Exzenterserie): günstigste Exzenterlage ist die des Rades M; erreichbarer Wirkungsgrad über 80%, aus Bild 5 und Bild 6 (Schaufelzahlserie): günstigste Schaufelzahl hat Rad P, erreichbarer Wirkungsgrad über 80%. Die günstigsten Räder sind also die mit M und P bezeichnen.

Aus den Berechnungsdiagrammen r_n über \mathcal{F}_R findet man

für das Rad M: $r_n = 0,282$, $\eta = 81\%$

für das Rad P: $r_n = 0,264$, $\eta = 81\%$

Man wird sich für das Rad M entscheiden, da dabei der Antrieb billiger wird; erstens wegen der geringen Schau-
felzahl und zweitens wegen der grösseren Drehzahl.

Aus $r_n = 0,282 = n \cdot \sqrt{\frac{R_2}{g}}$ findet man als Drehzahl
für das Rad M:

$$n = r_n \cdot \sqrt{\frac{g}{R_2}} = 0,282 \cdot \sqrt{\frac{9,81}{1,94}} = 0,653 \text{ 1/s} = 38 \text{ 1/min}$$

Die erforderliche Leistung zum Antrieb eines Rades
wird

$$N = \frac{S \cdot v}{75 \cdot \eta} = \frac{2815 \cdot 6,18}{75 \cdot 0,81} = 286 \text{ PS}$$

Die Leistung kann auch mit Hilfe des Berechnungsblattes
 r_n über \mathcal{F}_R für das Rad M gefunden werden. Aus diesem
Blatt entnimmt man für $r_n = 0,282$ und $\mathcal{F}_R = 1,41$:

$$r_n = 0,0086 = \frac{N}{S \cdot g^{1/2} \cdot R_2^{1/2}}$$

Damit wird

$$N = 0,0086 \cdot 1000 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 103} = 274 \text{ PS}$$

Der Unterschied gegenüber dem oben berechneten Wert ist
mit der geringen Ablesegenauigkeit (der Wirkungsgrad musste
extrapoliert werden!) und mit Zeichenungenauigkeiten bei
der Herstellung der Diagramme zu erklären. Es wird sicher-
heitshalber mit dem höheren Wert gerechnet. Um die Lei-
stung an der Antriebswelle zu erhalten, muss noch die
Reibung in den Radlagern und in der Exzentersteuerung
der Schaufeln berücksichtigt werden. Setzt man für den
mechanischen Wirkungsgrad $\eta_m = 0,93$ ein, so wird die
Wellenleistung für zwei Räder

$$N_{ges} = \frac{2 \cdot 286}{0,93} = 615 \text{ PS}$$

Die Radabmessungen können mit Hilfe der Angaben auf Bild 1 und in Tabelle 1 bestimmt werden.

Das berechnete Rad ist dem Modellrad M geometrisch ähnlich. Es erhebt sich nun die Frage, ob man nicht zu einem noch besseren Rad kommt, wenn man versucht, alle aus den Orientierungsdiagrammen gewonnenen Ergebnisse zu berücksichtigen. D.h., die Tauchung eines solchen Rades müsste zwischen der der Räder B und C, die Schaufelzahl zwischen 11 (Rad P) und 6 (Rad Q) liegen und die Exzenterlage müsste die des Rades M sein. Diese Forderungen führen zu einem Rad, das etwas tiefer als das Rad M eintaucht, im übrigen aber diesem Rad geometrisch ähnlich ist. Den Beweis dafür, dass ein solches Rad wirklich besser ist, kann man mit den vorhandenen Unterlagen nicht führen. Es spricht in diesem Fall jedoch viel dafür, dass durch eine Vermehrung der Eintauchung des Rades M der Wirkungsgrad noch etwas verbessert werden kann. Die Drehzahl wird durch die Vergrößerung der Eintauchung vermindert. Da für diesen Fall kein Berechnungsdiagramm vorliegt, muss die Drehzahlabnahme (evtl. mit Hilfe der Berechnungsdiagramme B und C, aus denen sich die Tendenz von r_n bei einer Veränderung der Eintauchung entnehmen lässt) geschätzt werden.

b) Gegen: N, v, T.

Ein Radschlepper soll von einem Dieselmotor angetrieben werden, der 1000 PSe leistet. Die Radeintauchung soll 1,0 nicht überschreiten, der Schaufelraddurchmesser ist aus konstruktiven Gründen auf 4,00m begrenzt. Welcher Schub kann bei einer Geschwindigkeit von 12 km/h (= 3,33 m/s) erzeugt werden? Wie gross ist dabei die Raddrehzahl?

Mit einer Mistromziffer $\psi = -0,06$ wird die Eintrittsgeschwindigkeit des Wassers in das Rad

$$V = (1 - \psi) V_s = [1 - (-0,06)] \cdot 3,33 = 3,53 \text{ m/s}$$

Bei einem geschätzten mechanischen Wirkungsgrad, der die Verluste im Getriebe, in der Radlagerung und in der Exzentersteuerung berücksichtigt, von $\eta_m = 0,9$ wird die für ein Rad zur Verfügung stehende Leistung

$$N = \frac{N_e \cdot \eta_m}{2} = \frac{1000 \cdot 0,9}{2} = 450 \text{ PS}$$

Nun wird ein Eintauchungsverhältnis $T/R_z = 0,609$ (entsprechend den Radmodellen C, Q, R) angenommen.

Bei einer Radeintauchung von $T = 1,0 \text{ m}$ ergibt sich damit ein Zapfenkreisradius von $R_z = \frac{1,0}{0,609} = 1,64 \text{ m}$. Der Aussendurchmesser wird

$$D_a = 2 \cdot R_z \cdot \frac{R_a}{R_z} = 2 \cdot 1,64 \cdot 1,212 = 4,00 \text{ m}$$

Dieser Wert entspricht dem zulässigen Durchmesser.

Da es sich hier um ein hochbelastetes Schlepperrad handelt, wird das Verhältnis Schaufelbreite zur Zapfenkreisradius $b/R_z = 2,6$ angenommen. Da sich sowohl der Schub als auch die Leistung linear mit der Radbreite ändern (dies gilt mit recht guter Näherung), kann man auch für dieses Breitenverhältnis die Berechnungsdiagramme, die für $b/R_z = 1,79$ gelten, verwenden, wenn man neue Kennziffern für den Schub und die Leistung einführt. Versieht man die neuen Kennziffern, die für $b/R_z = 2,5$ gelten, mit dem Index 1, so gilt

$$r_{s1} = r_s \cdot \frac{1,79}{2,5} \quad r_{N1} = r_N \cdot \frac{1,79}{2,5}$$

für den vorliegenden Fall wird

$$r_{N1} = \frac{N}{5 \cdot 9^{3/2} \cdot R_z^{7/2}} \cdot \frac{1,79}{2,5} = \frac{450}{1000 \cdot 9,81^{7/2} \cdot 1,64^{7/2}} \cdot \frac{1,79}{2,5} = 0,0175$$

$$f_R = \frac{v}{\sqrt{g \cdot R_z}} = \frac{3,53}{\sqrt{9,81 \cdot 1,64}} = 0,88$$

Geht man mit diesen Werten in die Berechnungsdiagramme r_n über F_R für die Radmodelle C, Q und R, so stellt man fest, dass bei $F_R = 0,88$ die η - und r_n -Kurven nur bis zu $r_n = 0,015$ und darunterreichen. Die Ursache dafür ist, dass die Festigkeit der von Volpich untersuchten Radmodelle nicht ausreichte, um sie auch bei hohen Belastungen schleppen zu können. Es bleibt nichts übrig, als die r_n - und η -Kurven zu extrapolieren.

Man findet

für das Modell	Q	$r_n = 0,27$	$\eta = 0,46$
" "	C	$r_n = 0,255$	$\eta = 0,54$
" "	R	$r_n = 0,24$	$\eta = 0,54$

Es wird das Rad C gewählt, da dieses Rad mit 9 Schaufeln schneller dreht und billiger wird als das Rad R mit 11 Schaufeln. Der Wirkungsgrad beider Räder ist etwa gleich.

Man kann nun Drehzahl und Schub berechnen:

$$S = \frac{75 \cdot W \cdot \eta}{v} = \frac{75 \cdot 450 \cdot 0,54}{3,55} = 5160 \text{ kg}$$

$$n = r_n \cdot \sqrt{\frac{g}{R_2}} = 0,255 \cdot \sqrt{\frac{9,81}{1,64}} = 0,624 \text{ } \frac{1}{s} = 37,4 \text{ } \frac{1}{min}$$

Um nun noch das gewählte Eintauchungsverhältnis zu kontrollieren, geht man mit

$$r_s = \frac{S}{s \cdot g \cdot R_2^3} = \frac{5160}{1000 \cdot 1,64^3} = 1,17$$

bei $F_R = 0,88$ in das Orientierungsdiagramm Bild 2.

Durch Extrapolation kann man anhand dieses Diagrammes abschätzen, dass für die vorliegenden Verhältnisse ein grösseres Eintauchungsverhältnis besser wäre. Da die Eintauchung aber festliegt, kann damit nichts gewonnen werden, weil das grösste Eintauchungsverhältnis nur durch eine Verkleinerung von R_2 erzielt werden

könnte. Die Verschlechterung durch eine Verminderung von R_z fällt aber mehr ins Gewicht als die Verbesserung durch eine Vergrösserung des Eintauchungsverhältnisses.

Schliesslich bleibt noch die Exzenterlager zu korrigieren. Das Orientierungsdiagramm Bild 4 ist hierfür nicht brauchbar, da es nur für ein geringeres Eintauchungsverhältnis gilt. Man kann aber die Exzenterlage des Rades C im Hinblick auf den Eintrittswinkel von Schaufelunterkante und Schaufelmitte überprüfen. Der Winkel zwischen der Relativgeschwindigkeit der Schaufel gegenüber Wasser und der Tangente an die Schaufel soll Null sein. Erforderlichenfalls ist die Exzenterlage so zu verändern, dass dies erreicht wird. (Aus den Versuchsergebnissen geht hervor, dass der Eintrittswinkel der Schaufeln den Wirkungsgrad merklich beeinflusst. Hinsichtlich des Austrittswinkels kann kein gesetz- oder tendenzmässiger Zusammenhang festgestellt werden; wohl, weil hierbei der theoretische, für Glattwasser gültige Winkel wegen der Störung der Strömung nicht ausreicht).

c) Gegeben: N , n , v .

Wie gross ist der Schub eines Schaufelrades bei einer Eintrittsgeschwindigkeit des Wassers in das Rad von $v = 6,18 \text{ m/s}$, wenn für das Rad eine Nettoleistung von 350 PS (dabei sind schon alle Verluste abgezogen) bei 40 U/min zur Verfügung steht? Welches Rad ist für diese Verhältnisse am günstigsten?

Man rechnet

$$F_R = \frac{v}{\sqrt{g \cdot R_z}} = \frac{6,18}{\sqrt{9,81}} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_z}} = 1,97 \cdot \frac{1}{\sqrt{R_z}}$$

$$r_n = n \cdot \sqrt{\frac{R_z}{g}} = \frac{40}{60} \cdot \frac{1}{\sqrt{9,81}} \cdot \sqrt{R_z} = 0,213 \cdot \sqrt{R_z}$$

$$r_{Nv} = \frac{N^{\frac{1}{3}} \cdot g^{\frac{2}{3}}}{v^{\frac{1}{3}} \cdot g^{\frac{2}{3}}} = \frac{350^{\frac{1}{3}} \cdot 9,81}{6,18^{\frac{1}{3}} \cdot 1000^{\frac{2}{3}}} = 0,099$$

Aus den beiden ersten Gleichungen findet man

$$\mathcal{F}_R = \frac{1,97 \cdot 0,213}{r_n} = \frac{0,419}{r_n}$$

Dieser Gleichung entspricht eine Kurve in den Berechnungsdiagrammen r_n über \mathcal{F}_R . Bringt man diese Kurve zum Schnitt mit der in den Diagrammen enthaltenen Kurve $r_{nv} = \text{const} = 0,099$ (interpolieren!) so kann man für den Schnittpunkt r_n , \mathcal{F}_R und η ablesen und damit dann R_z und S berechnen.

Man findet aus dem Berechnungsdiagramm für

Rad A	$r_n = 0,300$	$\mathcal{F}_R = 1,39$	$\eta = 68\%$
Rad B	$r_n = 0,291$	$\mathcal{F}_R = 1,44$	$\eta = 71\%$
Rad C	$r_n = 0,286$	$\mathcal{F}_R = 1,47$	$\eta = 73\%$
Rad D			η unter 65%

Rad C hat den besten Wirkungsgrad und kleinsten Durchmesser. Man berechnet für dieses Rad

$$R_z = \left(\frac{1,97}{\mathcal{F}_R} \right)^2 = \left(\frac{r_n}{0,213} \right)^2 = 1,80 \text{ m}$$

$$S = \frac{75 \cdot N \cdot \eta}{v} = \frac{75 \cdot 350 \cdot 0,73}{6,18} = 3100 \text{ kg}$$

Mit

$$r_s = \frac{S}{5 \cdot g \cdot R_z^3} = \frac{3100}{1000 \cdot 1,8^3} = 0,532$$

und $\mathcal{F}_R = 1,47$ findet man aus dem Orientierungsdiagramm Bild 6, dass das Rad C auch die günstigste Schaufelzahl hat. Es wäre allenfalls noch etwas zu verbessern durch eine Veränderung der Exsenterlage.

Es soll nun noch untersucht werden, wie weit das Rad B noch verbessert werden kann. Für dieses Rad wird $R_2 = 1,87 \text{ m}$, $S = 3020 \text{ kg}$ und $r_g = 0,462$. Aus Bild 3, 4 und 5 findet man, dass für $\mathcal{F}_R = 1,44$ und $r_g = 0,462$ Rad M das günstigste ist.

Aus dem Berechnungsdiagramm r_n über \mathcal{F}_R für das Rad M findet man durch Schneiden der Kurve

$$r_{N_v} = \text{const} = 0,99 \text{ mit der Kurve } \mathcal{F}_R = \frac{0,419}{r_n} :$$

$$r_n = 0,296 \quad , \quad \mathcal{F}_R = 1,41 \quad , \quad \eta = 78\%$$

Damit erhält man als endgültige Werte

$$R_2 = 1,95 \quad S = 3320 \text{ kg}$$

d) Kritik der Radberechnungen. Bei den Rechnungen erweisen sich die Lücken in der Systematik der Radversuche als erheblicher Mangel. Dieser Mangel kann nur durch Fingerspitzengefühl und intensives Hineindenken in die Verhältnisse des Radantriebes ausgeglichen werden. Man wird dabei häufig in die Lage kommen, Tendenzen, die aus den Versuchen hervorgehen, auf andere Räder übertragen zu müssen. Auf diese Weise wird man sicher eine Konstruktion finden können, die dem Optimum sehr nahe kommt. Schwieriger ist es allerdings, dann auch Drehzahl und Wirkungsgrad (oder auch andere Werte, je nach der Aufgabenstellung) genau zu bestimmen. Trotzdem kann gesagt werden, dass das Vorgehen in der oben gezeigten Weise besser ist als die Verwendung von Faustformeln, die bestenfalls in einem sehr engen Bereich Gültigkeit haben können.

5. Mitstrom und Sog

Wie bei Schraubenpropellern muss auch bei Schaufelrädern der Einfluss des Schiffes auf den Propeller berücksichtigt werden. Ausser dem Mitstrom und Sog ist bei Schaufelrädern auch die Änderung der Eintauchung durch die Schiffswellen an der Stelle des Rades zu beachten.

Leider gibt es nur sehr wenige Angaben über diese Einflüsse. Diesen Mangel stellt man übrigens auch bei flachgehenden Schraubenschiffen fest.

Gebers /1/ schätzt den Sog von Seitenradschiffen, ausgedrückt durch die Sogziffer $\mathfrak{S} = \frac{S - (W + Z)}{S}$ (S = Schub, W = Widerstand, Z = Trossenzug), auf 2 bis 6% bei Schleppern und 10 bis 20% bei freifahrenden Schiffen. Bei Heckradschiffen dürfte die Sogziffer zwischen 10 und 20 % liegen.

Der Mitstrom hängt bei Schiffen auf flachem Wasser nicht nur von der Schiffsform und Lage des Propellers ab, sondern auch von der Wassertiefe und der Propellerbelastung. Für schwach belastete breite Propeller wurde diese Abhängigkeit in /4/ berechnet.

Für Seitenradschiffe kann für die Mitstromziffer $\gamma = \frac{v_s - v}{v_s}$ (v_s = Schiffsgeschwindigkeit, v = Einstromgeschwindigkeit des Wassers in das Schaufelrad) bei tiefem Wasser $\gamma = -0,04$ bis $-0,06$ (die Mitstromziffer ist hier negativ!) gesetzt werden. Vom Verhältnis Wassertiefe zur Eintauchung des Rades $\frac{WT}{T} = 5$ an wird der Betrag der (negativen) Mitstromziffer rasch grösser und kann bei grosser Belastung des Rades den Wert $-0,3$ und darüber (negativ!) annehmen.

Bei Heckradschiffen ist die Mitstromziffer γ etwa $0,1$ bis $0,15$; bei kleinen Verhältnissen $\frac{WT}{T}$ wahrscheinlich noch geringer.

Schrifttum

- /1/ **Gebers, F.:** Das Schaufelrad im Modellversuch
mit einem Beitrag von F. Horn, Wien 1952

- /2/ **Krappinger, O.:** Schaufelradberechnung. Forschungs-
hefte für Schiffstechnik 1954, S. 32

- /3/ **Volpich, H. u. I.C. Bridge:** Paddle Wheels, Part I:
Preliminary Model Experiments, Trans.
Inst. E.S.S., S. 327
Part II: Systematik Model Experiments,
Trans. Inst. E.S.S. 1956, S. 468
Part IIa: Further Model Experiments
und Ship Model Correlation, Trans. Inst.
E.S.S. 1957, S. 505

- /4/ **Krappinger, O.:** Breite Propeller an der Oberfläche
von tiefem und flachem Wasser. Jb. STG 1959

Tabelle 1

Blatt	Tauchungsverh. $\frac{I}{R_z}$	Schaufel- zahl	Schaufelform	Schaufellängen- verh. $\frac{b}{R_z}$	Exzenterverhältnis $\frac{e}{R_z}$ vor Mitte Welle	über $\frac{e_{ü}}{R_z}$
A	0,365	9	gekr.	1,79	0,134	0,0745
B	0,487	9	gekr.	1,79	0,134	0,0745
C	0,609	9	gekr.	1,79	0,134	0,0745
D	0,731	9	gekr.	1,79	0,134	0,0745
E	0,365	9	flach	1,79	0,134	0,0745
F	0,731	9	flach	1,79	0,134	0,0745
G	0,487	9	gekr.	1,79	0,0	0,0
H	0,487	9	gekr.	1,79	0,0745	0,0
I	0,487	9	gekr.	1,79	0,134	0,0
J	0,487	9	gekr.	1,79	0,1865	0,0
K	0,487	9	gekr.	1,79	0,0	0,0745
L	0,487	9	gekr.	1,79	0,0745	0,0745
M	0,487	9	gekr.	1,79	0,1865	0,0745
N	0,487	6	gekr.	1,79	0,134	0,0745
P	0,487	11	gekr.	1,79	0,134	0,0745
Q	0,609	6	gekr.	1,79	0,134	0,0745
R	0,609	11	gekr.	1,79	0,134	0,0745
S	0,487	9	gekr.	1,34	0,134	0,0745
T	0,609	9	gekr.	1,34	0,134	0,0745

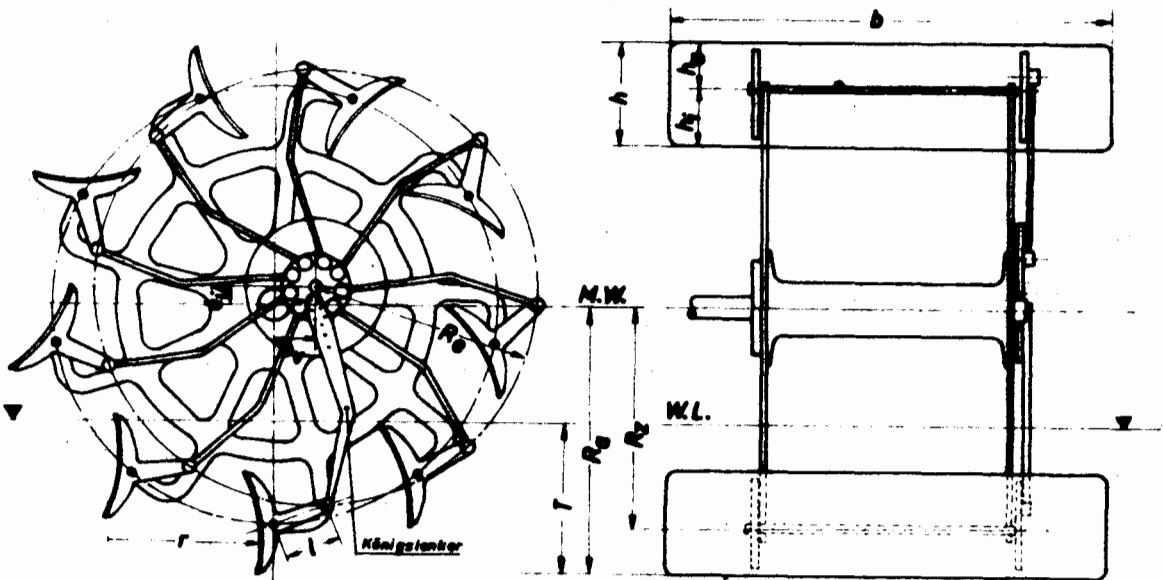
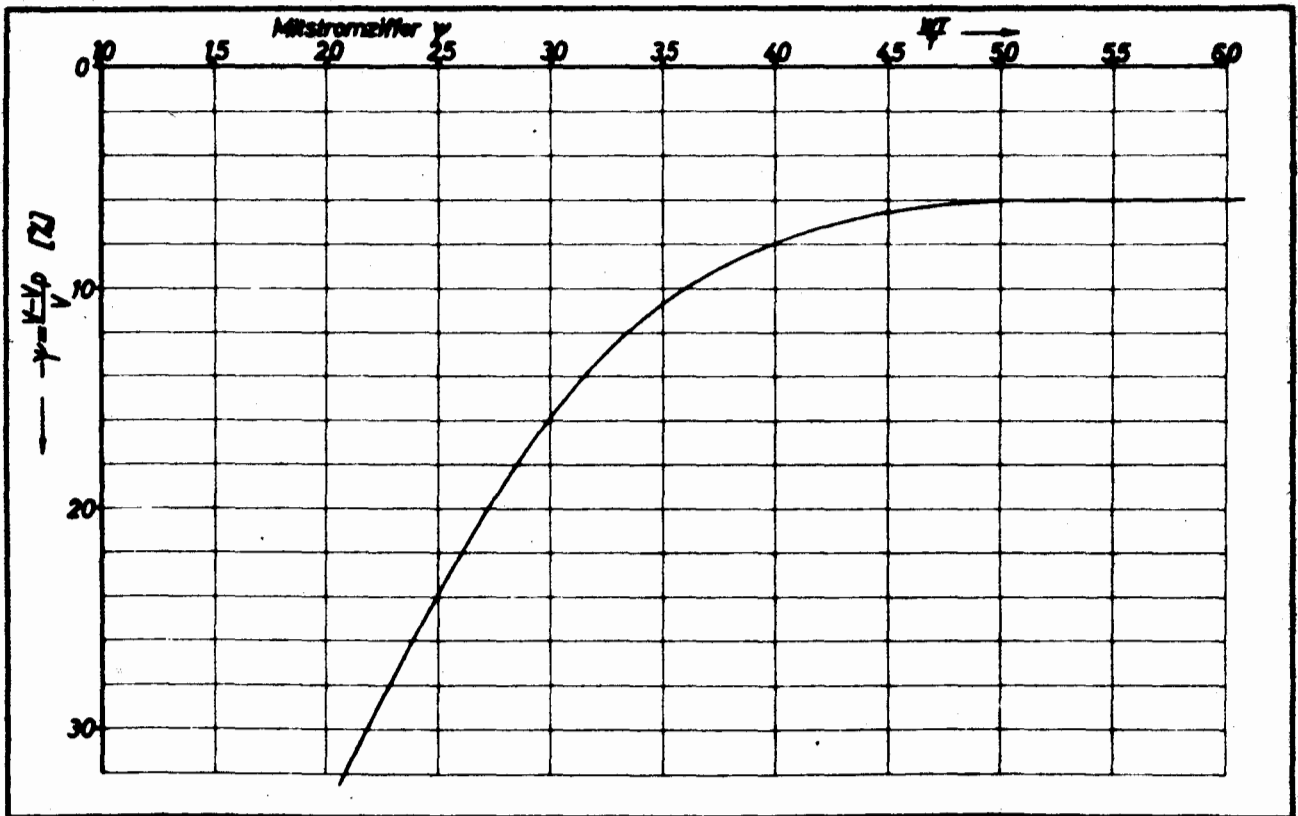
Schaufelhöhenverh. $\frac{h}{R_z} = 0,478$ Alle Verhältnisswerte auf Zapfenkreis-Radius bezogen.

Tabelle 2

Blätter	Orientierungs- Diagramm	Varierte Größen	z	$\frac{b}{R_z}$	$\frac{e_v}{R_z}$	$\frac{e_{\ddot{u}}}{R_z}$	Schaufel- form	$\frac{T}{R_z}$
A-B-C-D	Bild 2	Tauchungsverhältnis 0,365 bis 0,731	9	1,79	0,134	0,0745	gekr.	
E-F		Tauchungsverhältnis 0,365 bis 0,731	9	1,79	0,134	0,0745	flach	
H-I-J	Bild 3	Exzenterlage 0,0 bis 0,1865 v. W. Mitte	9	1,79		0,0	gekr.	0,487
L-B-M	Bild 4	Exzenterlage 0,0 bis 0,1865 v. W. Mitte	9	1,79		0,0745	gekr.	0,487
I-B-P	Bild 5	Schaufelanzahl 6 9 11		1,79	0,134	0,0745	gekr.	0,487
C-R	Bild 6	Schaufelanzahl 6 9 11		1,79	0,134	0,0745	gekr.	0,609
-E		Schaufelform flach und gekrümmt	9	1,79	0,134	0,0745		0,365
-F		Schaufelform flach und gekrümmt	9	1,79	0,134	0,0745		0,731
-S		Schaufellängenverhältnis 1,79 und 1,34	9		0,134	0,0745	gekr.	0,487
-T		Schaufellängenverhältnis 1,79 und 1,34	9		0,134	0,0745	gekr.	0,609

G-K, H-L, I-B, J-M stellen einen Vergleich für eine nur vertikale Exzenterverschiebung dar.

Mitstromziffer



Schaufelradmodell von Volutech (schematisch).

(Alle Maße sind auf R_2 bezogen).

Zapfenboisradius $R_2 = 1,0$
 Außenradius $R_0 = 1,212$
 Exzentrikerkreis $R_0 = 1,0$
 Schaufelhöhe $h = 0,478$
 - innen $h_i = 0,286$
 - außen $h_a = 0,212$
 Schaufelradius $r = 0,714$ und ∞

Schaufelstuhllänge $l = 0,258$
 Tauchung $T = 0,365, 0,467, 0,608, 0,731$
 Exzentrikerlage
 - über M.W. $e_u = 0,0$ und $0,0745$
 - vor M.W. $e_v = 0,0; 0,0745; 0,134; 0,198$
 Schaufellänge $b = 1,79$ und $1,361$

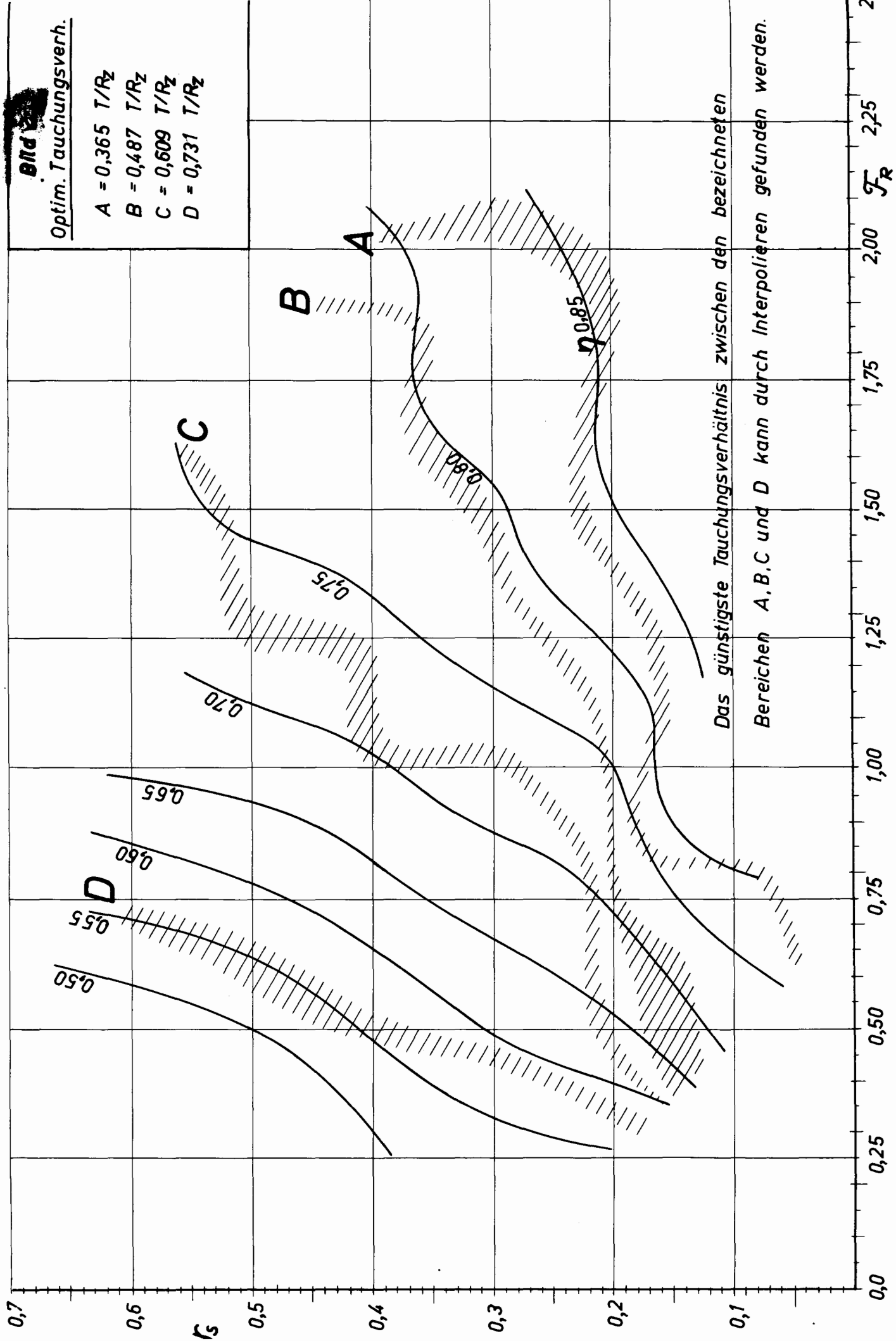


Bild 3

Optim. Exzenterlage

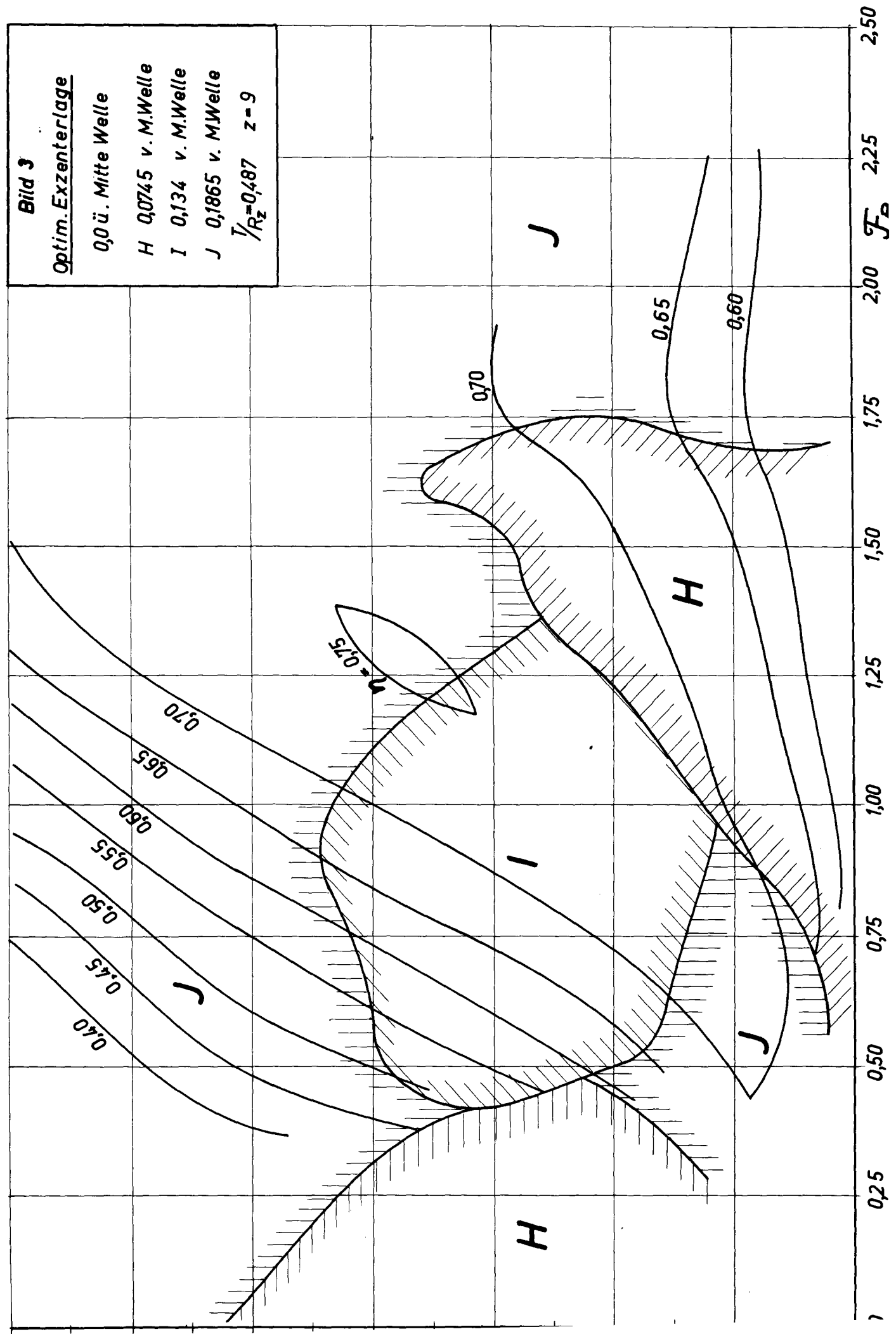
0,0 ü. Mitte Welle

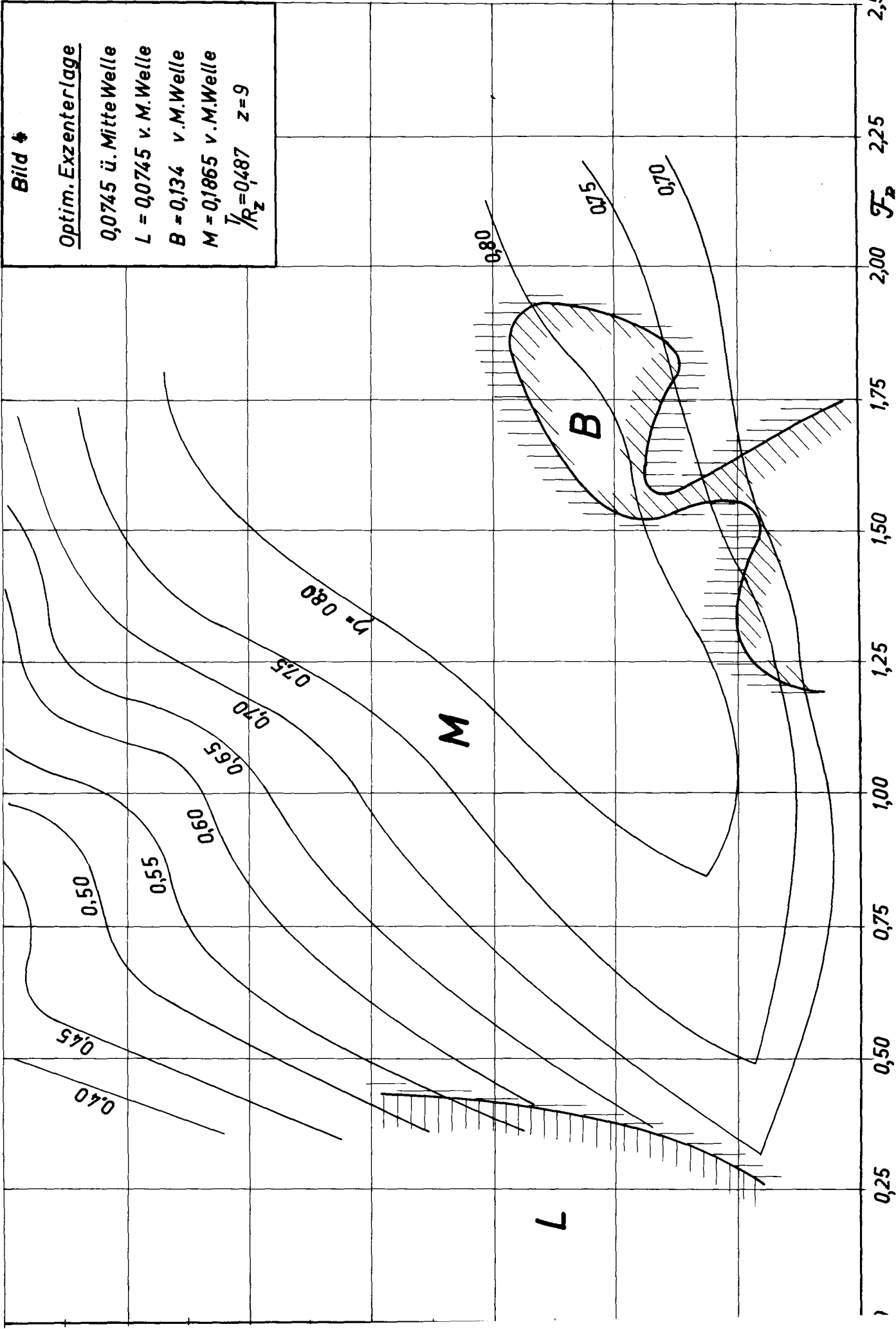
H 0,0745 v. M.Welle

I 0,134 v. M.Welle

J 0,1865 v. M.Welle

$T/R_z = 0,487$ $z = 9$





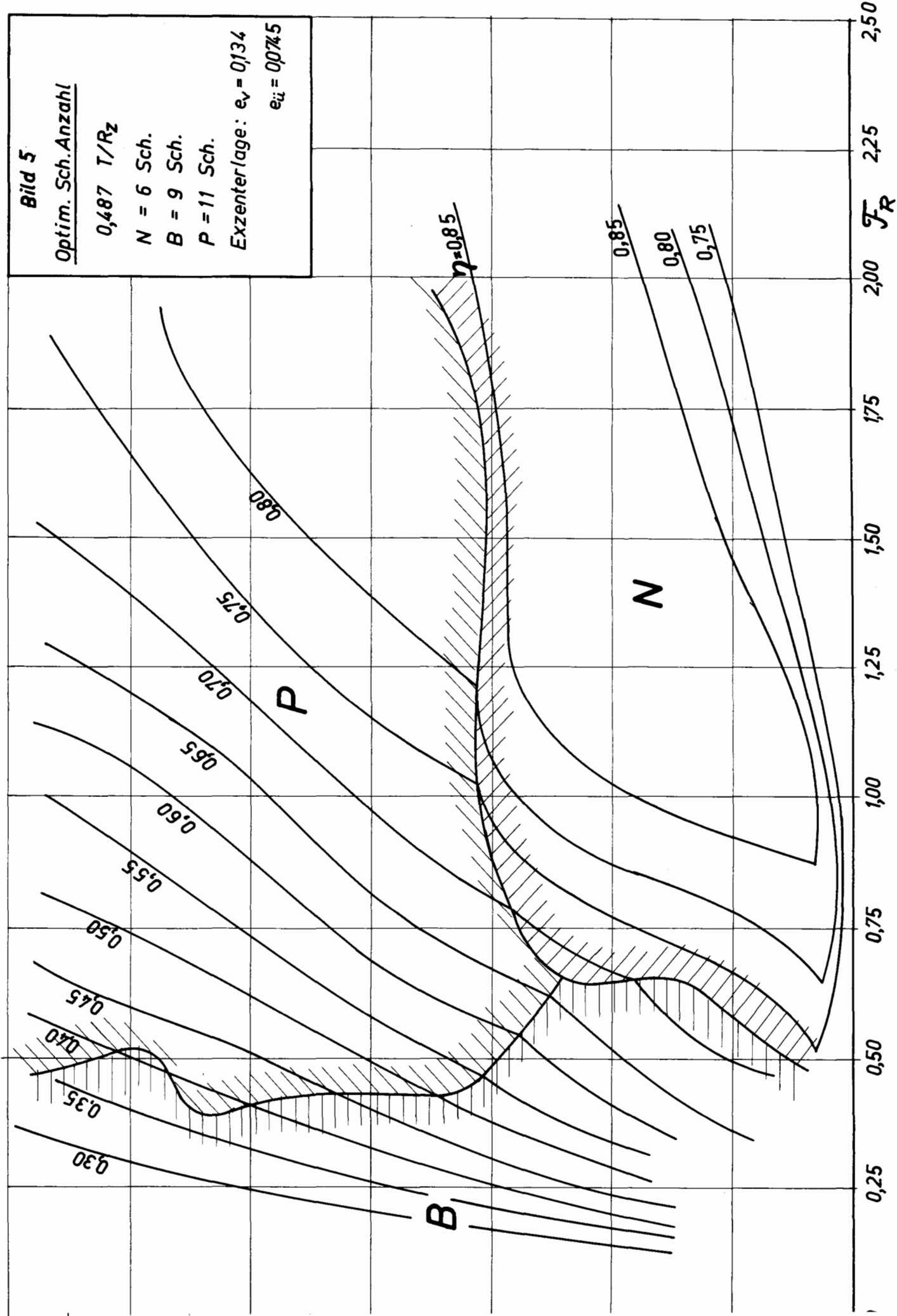


Bild 5

Optim. Sch. Anzahl

0,487 T/R_z

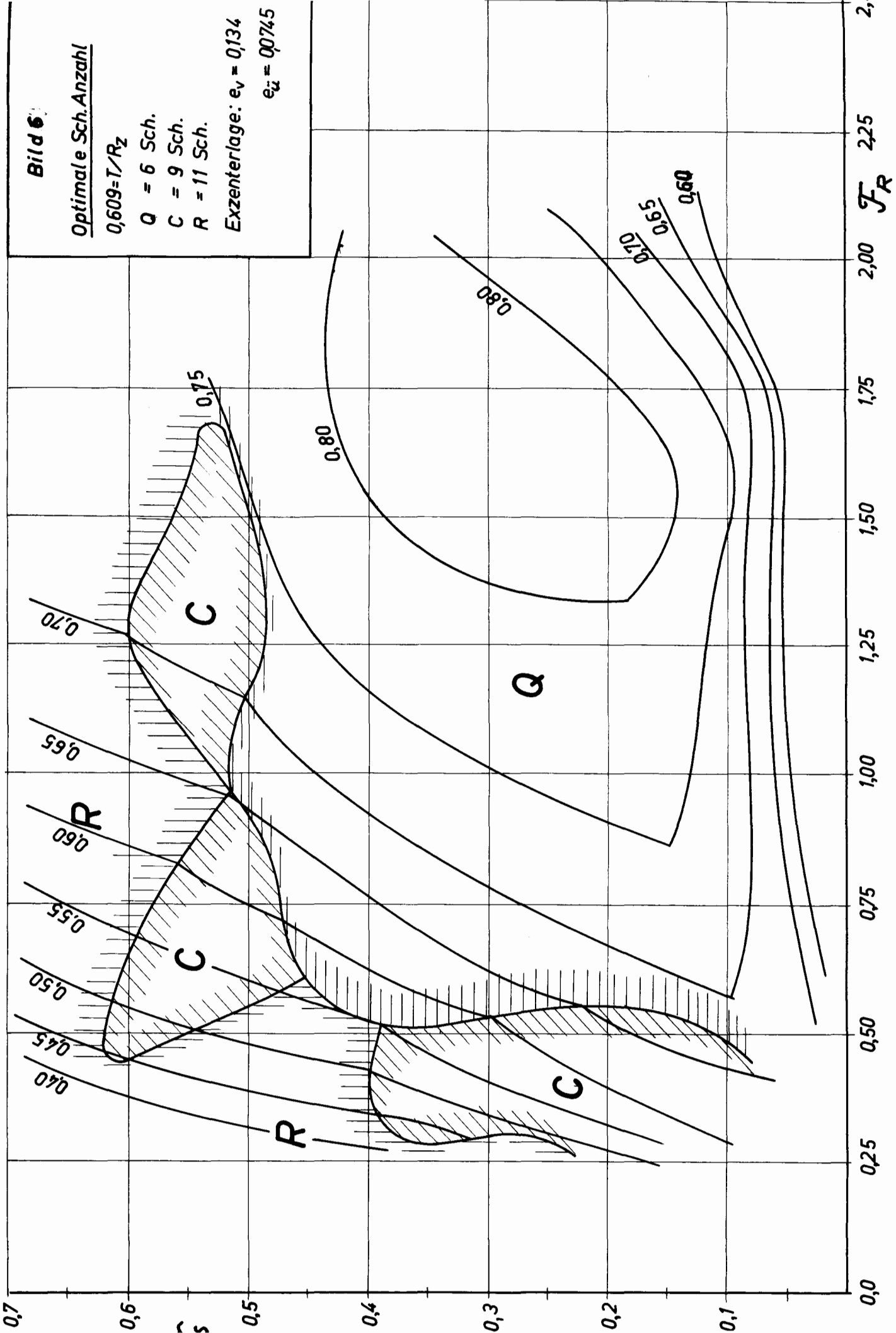
$N = 6$ Sch.

$B = 9$ Sch.

$P = 11$ Sch.

Exzenterlage: $e_v = 0,134$

$e_{ii} = 0,0745$



④

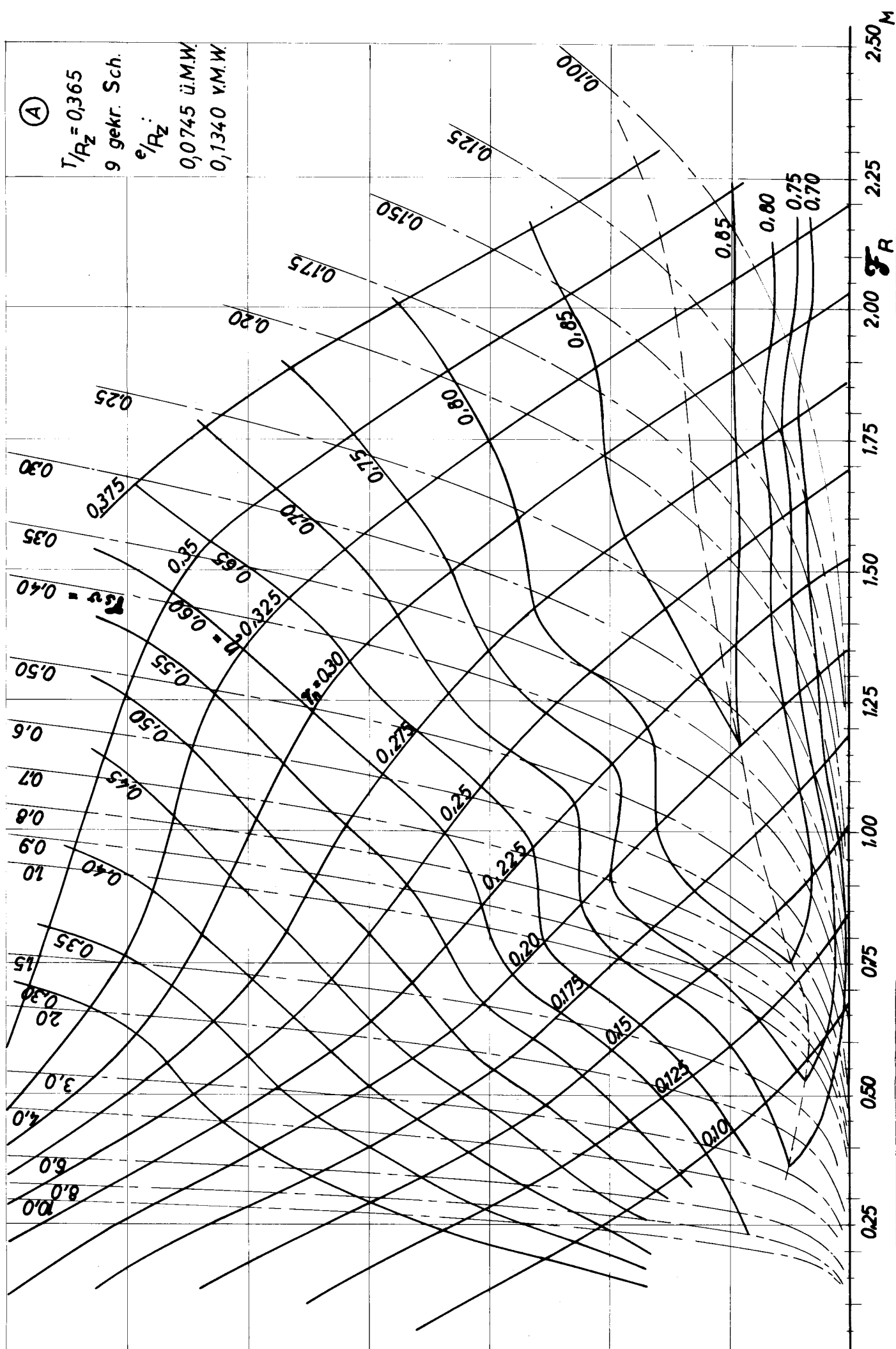
$$T/R_2 = 0,365$$

9 gekr. Sch.

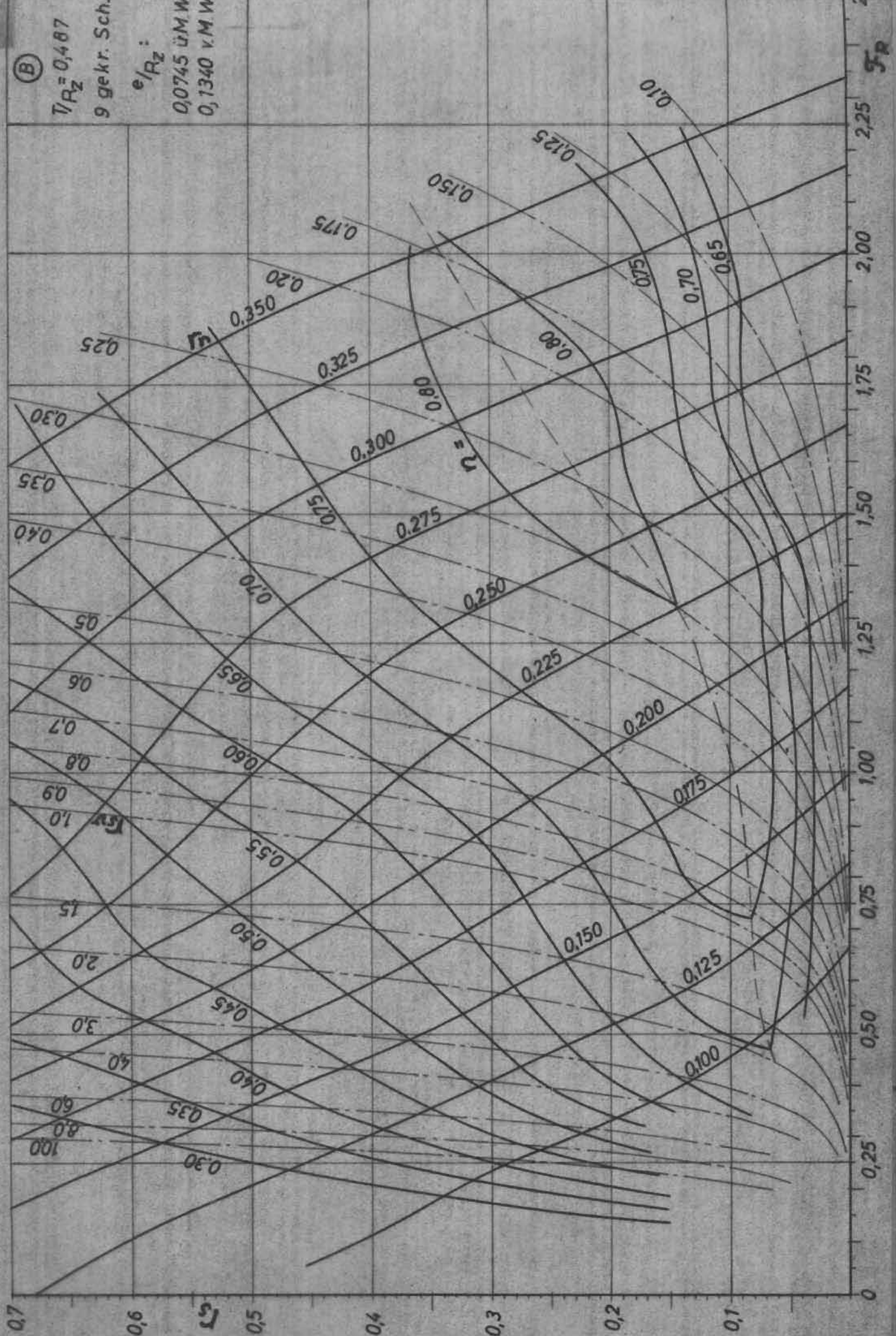
$$e/Rz$$

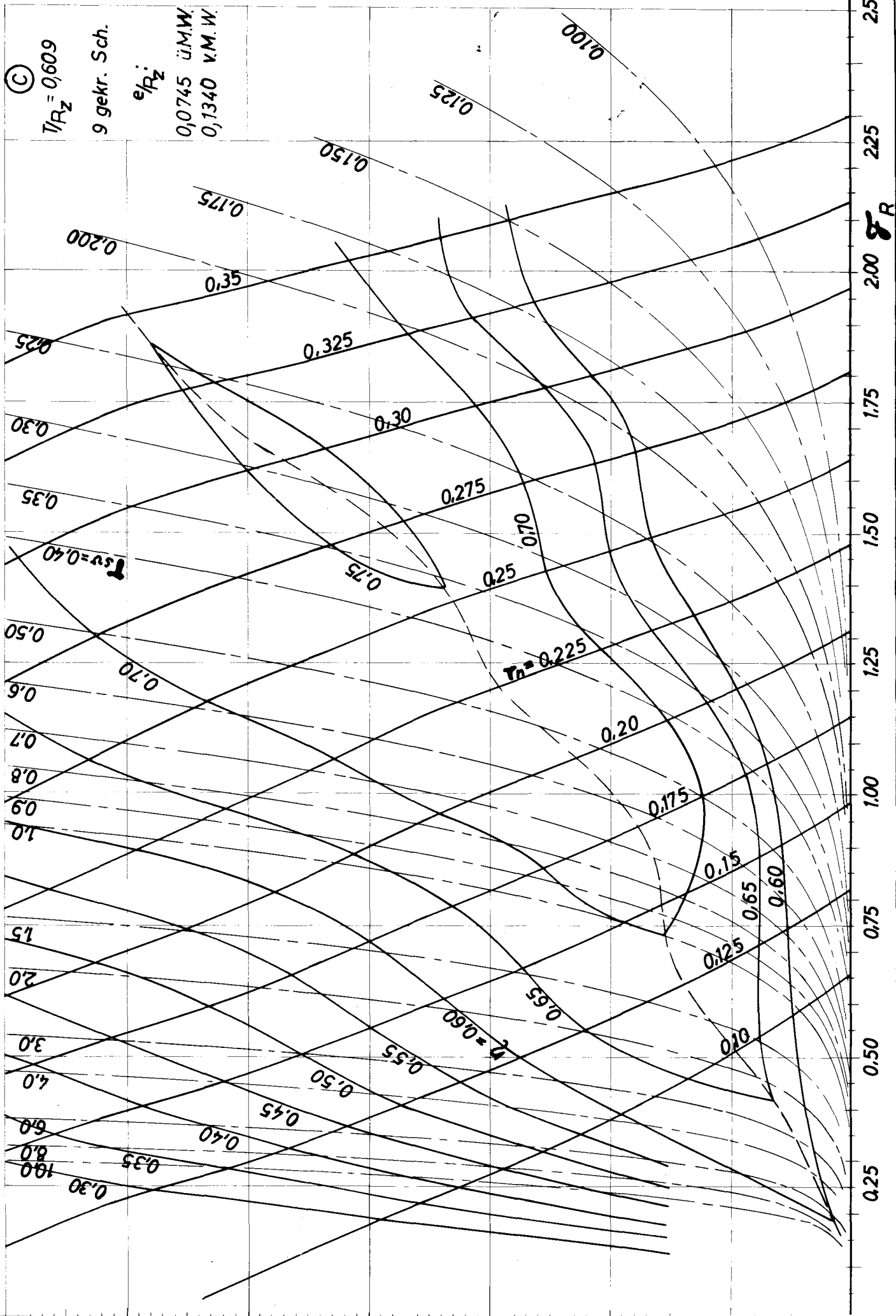
0,0745 ü.M.W.

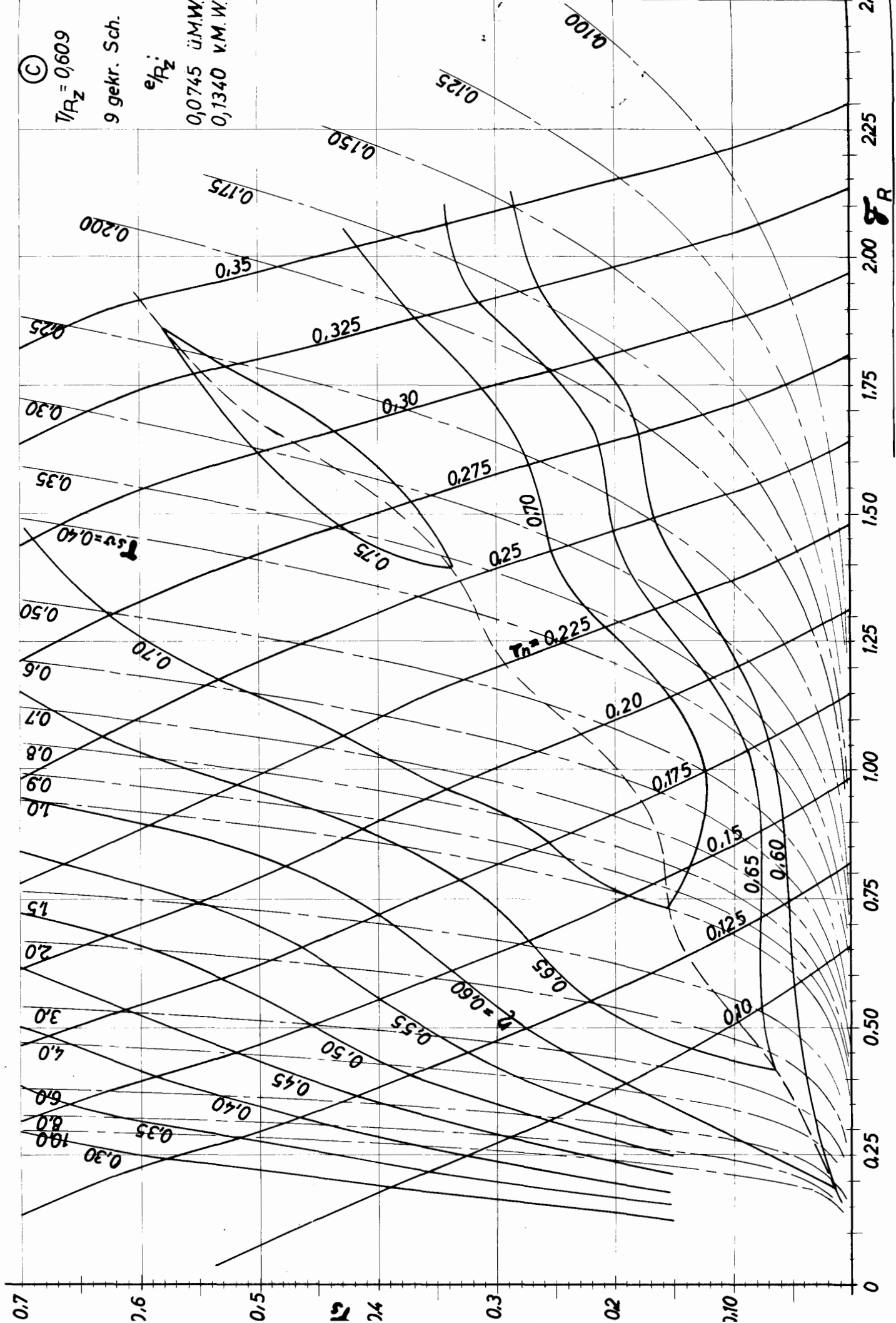
0,1340 v.M.W.



(B)
 $T/R_z = 0,487$
 9 gekr. Sch.
 $e/R_z:$
 0,0745 üMW
 0,1340 vMW







①

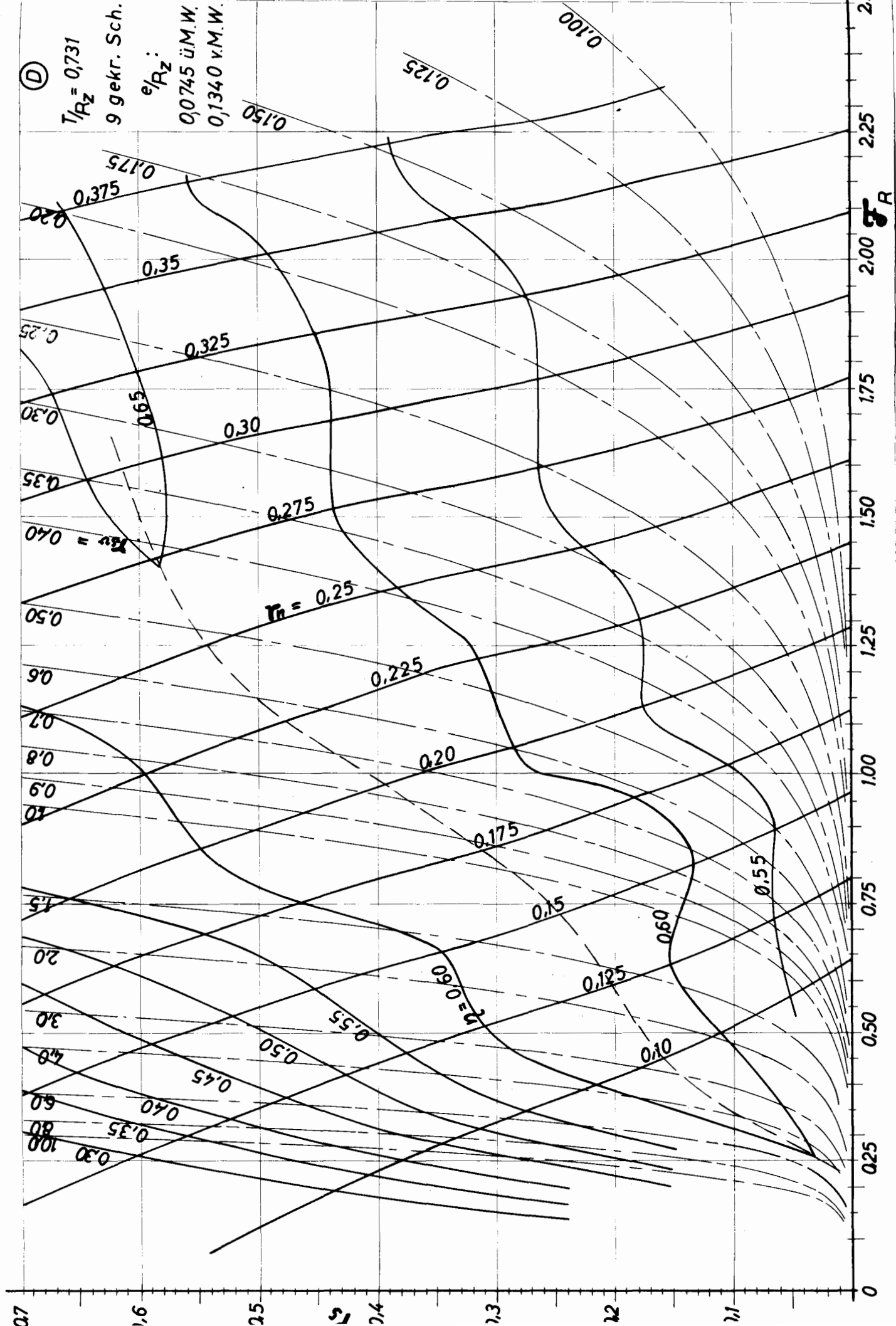
$$T_{RZ} = 0,731$$

9 gekr. Sch.

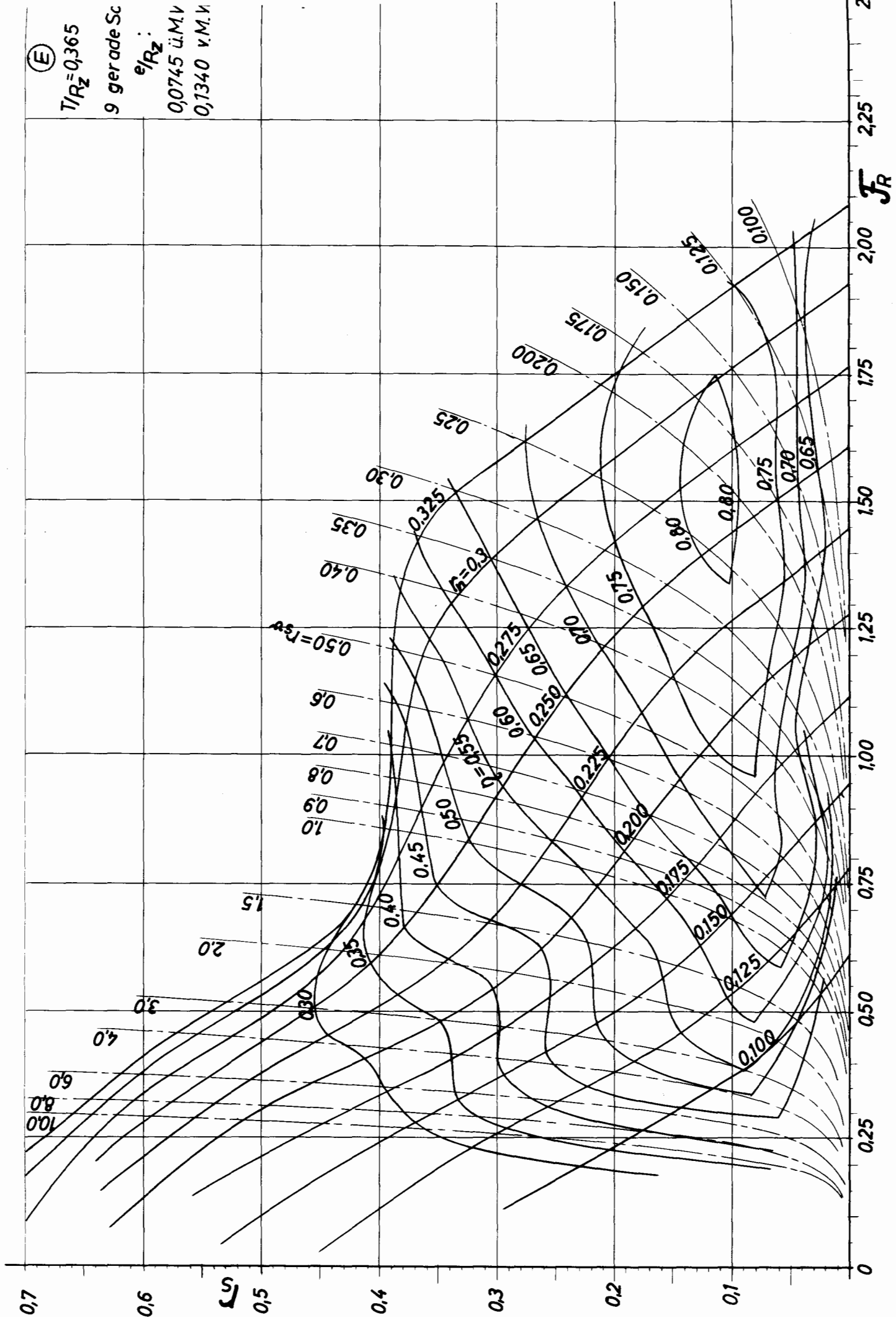
$$e_{RZ}:$$

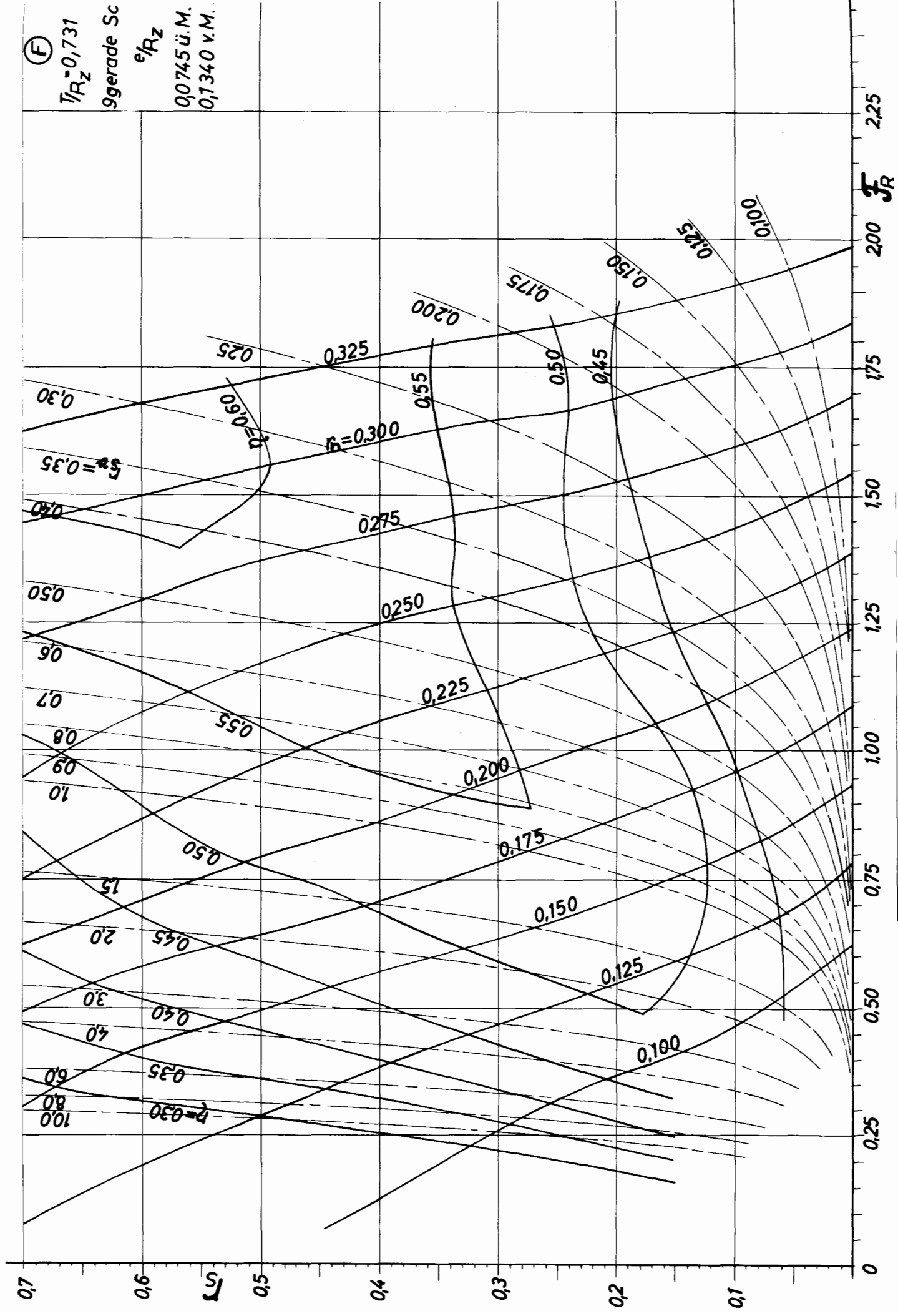
$$0,0745 \text{ ü.M.W.}$$

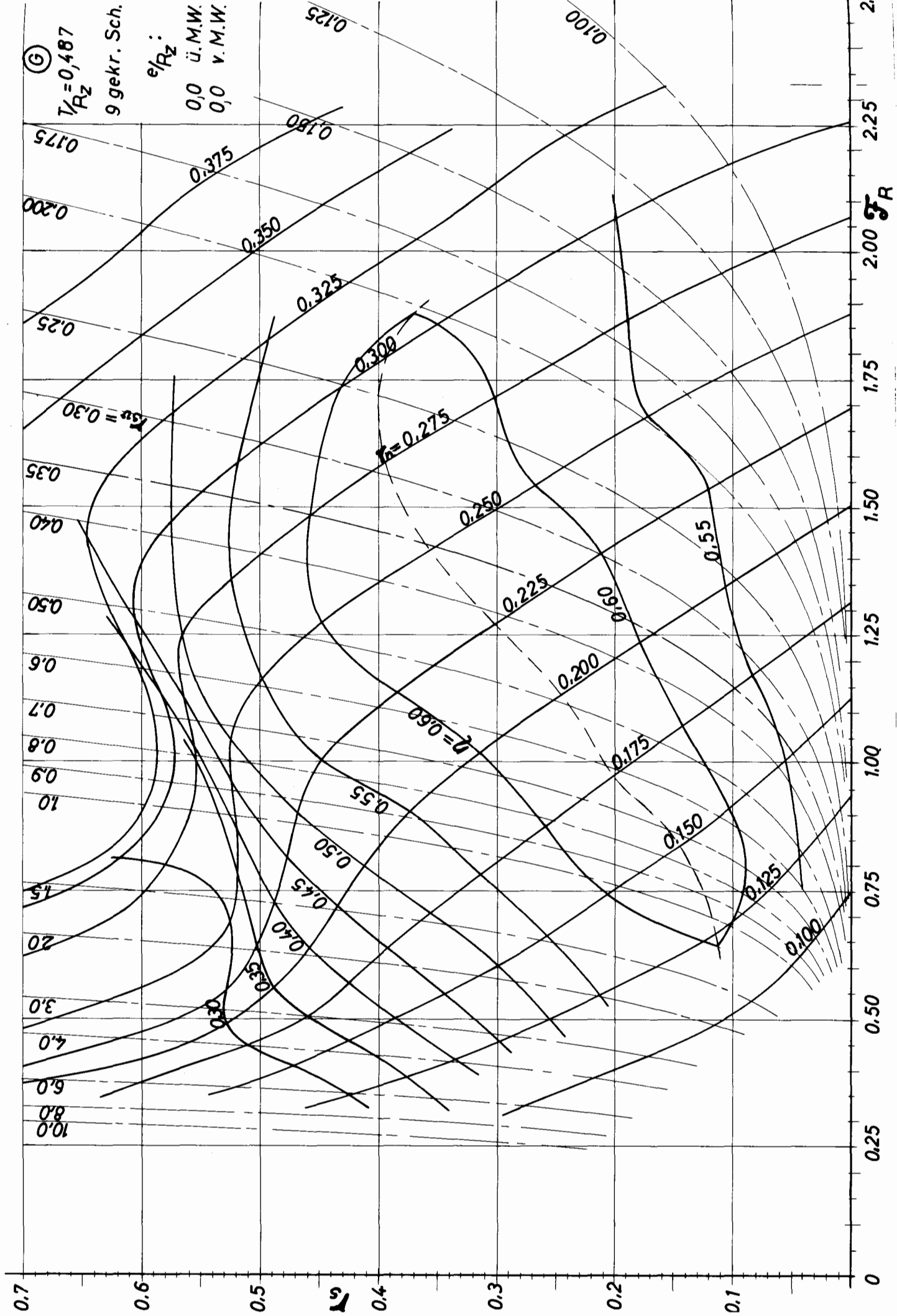
$$0,1340 \text{ v.M.W.}$$

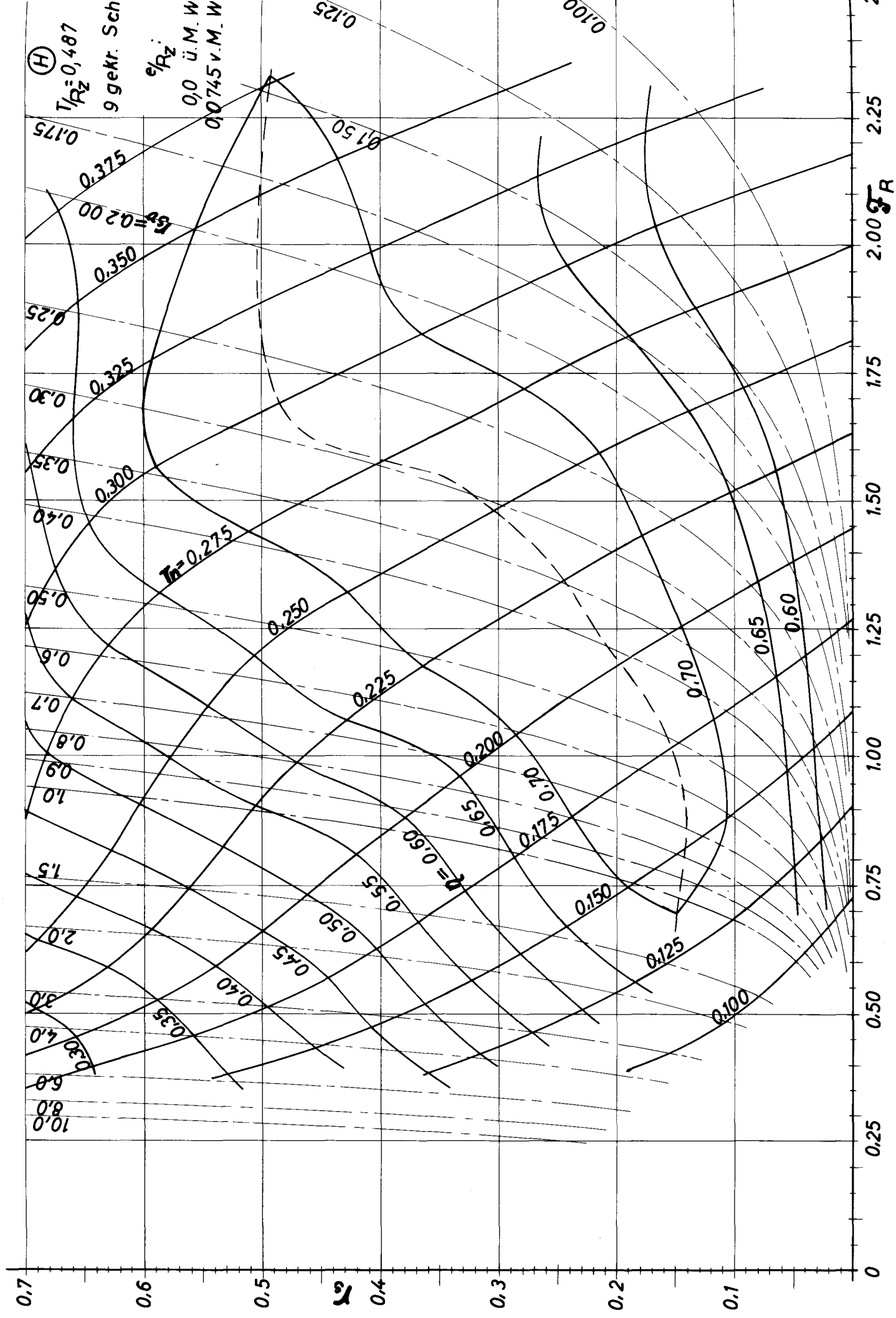


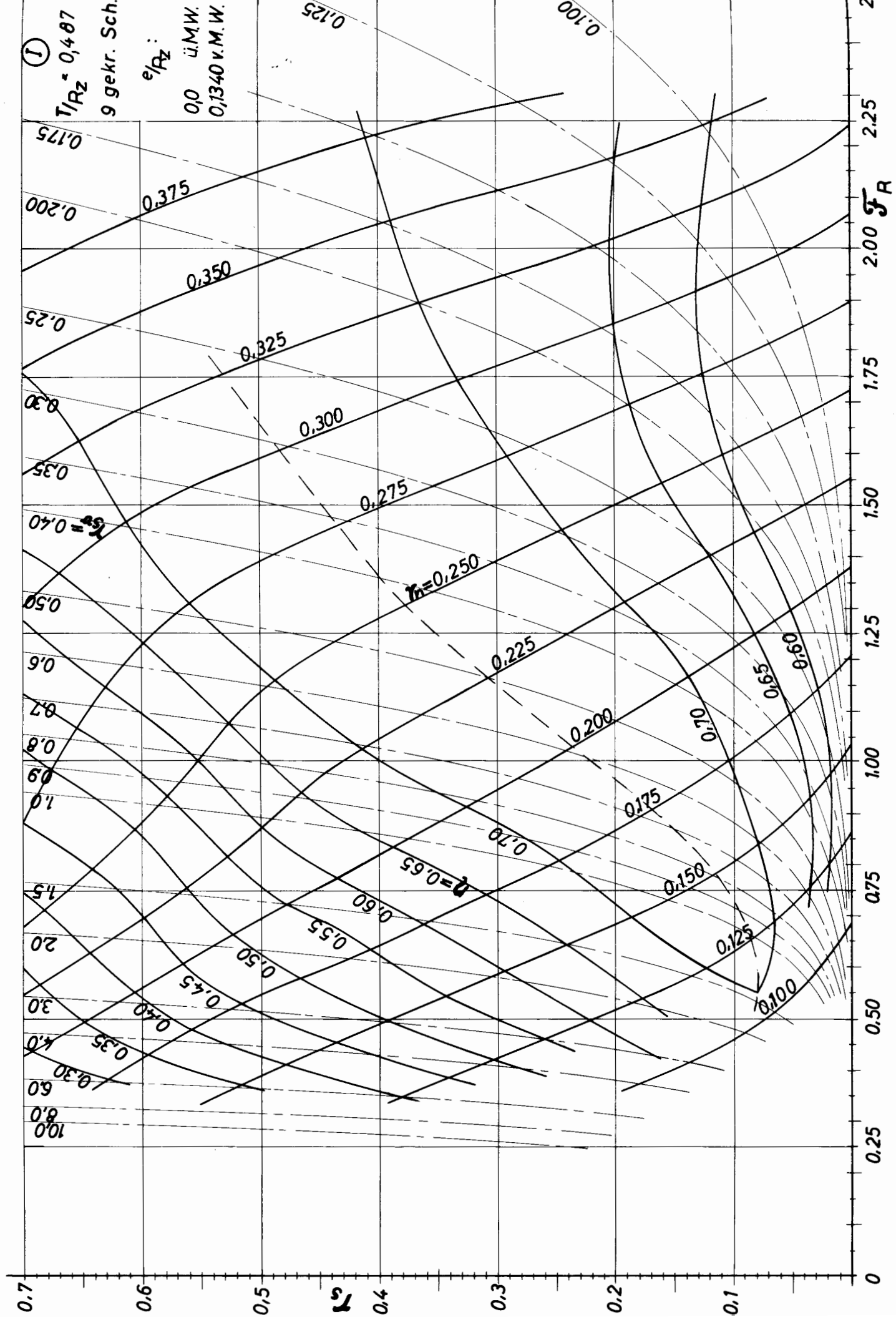
(E)
 $T/R_z = 0,365$
 9 gerade Sc
 e/R_z :
 0,0745 ü.M.V
 0,1340 v.M.V











(1)

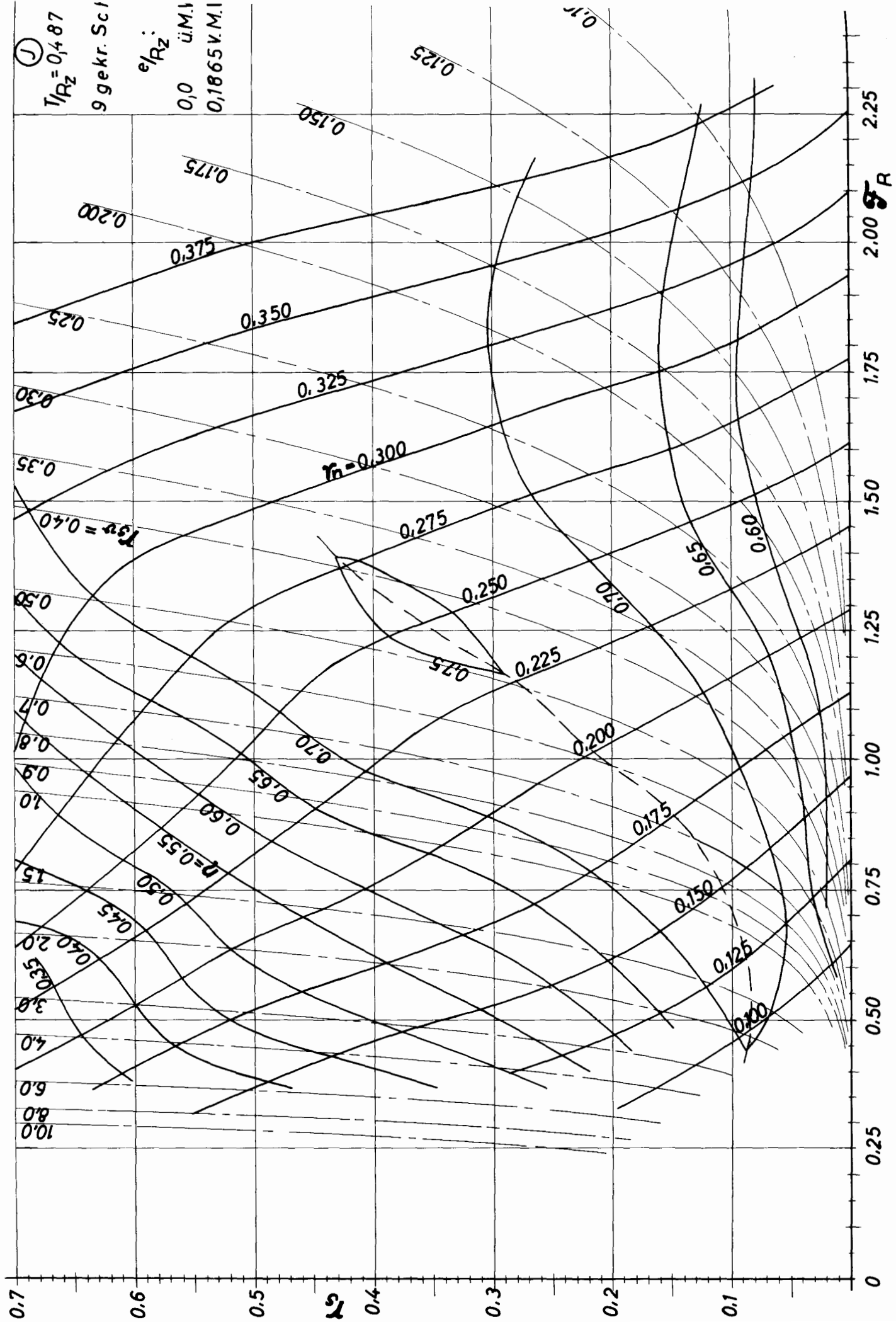
$\tau/R_z = 0.487$

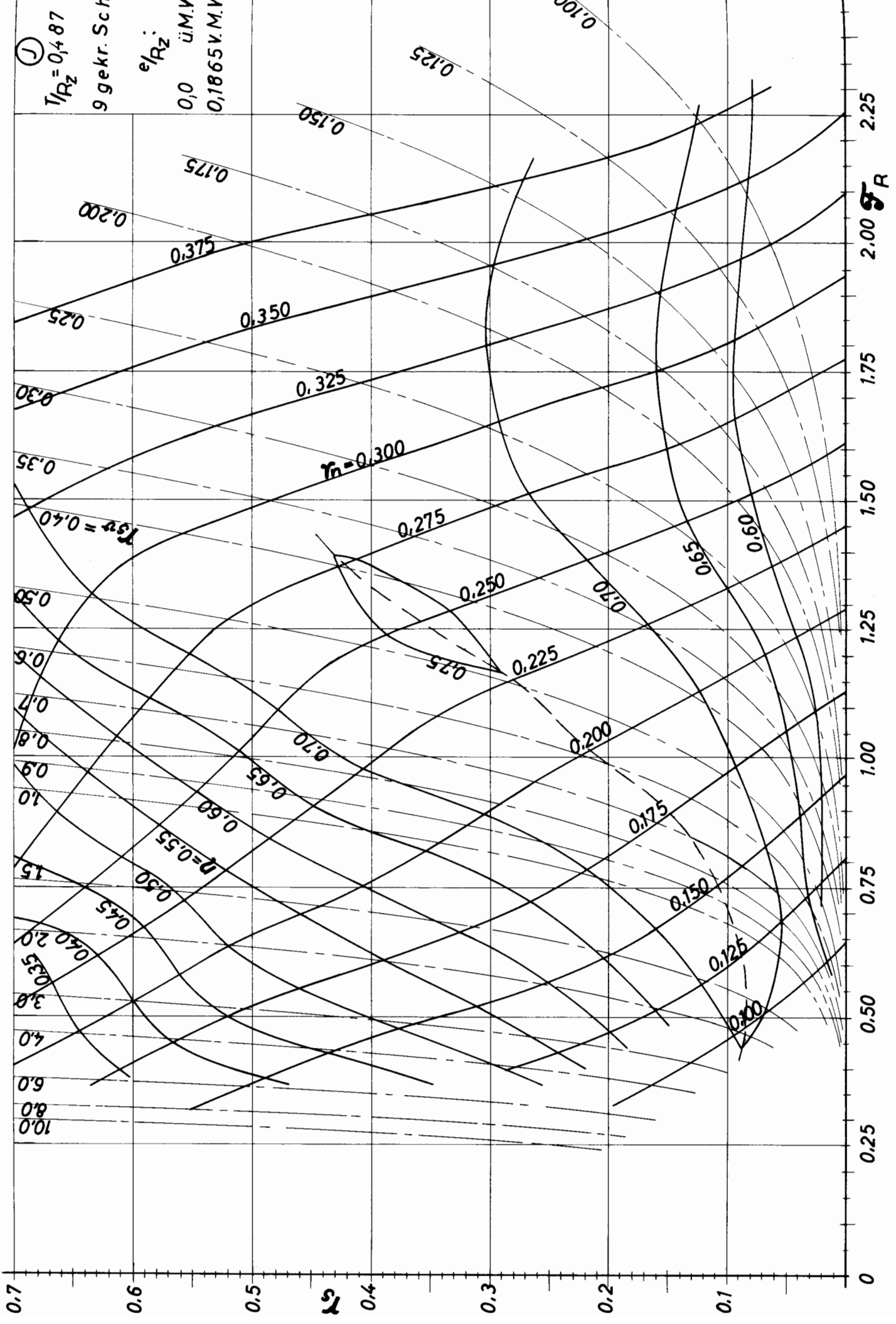
9 gekr. Sch.

e/R_z :

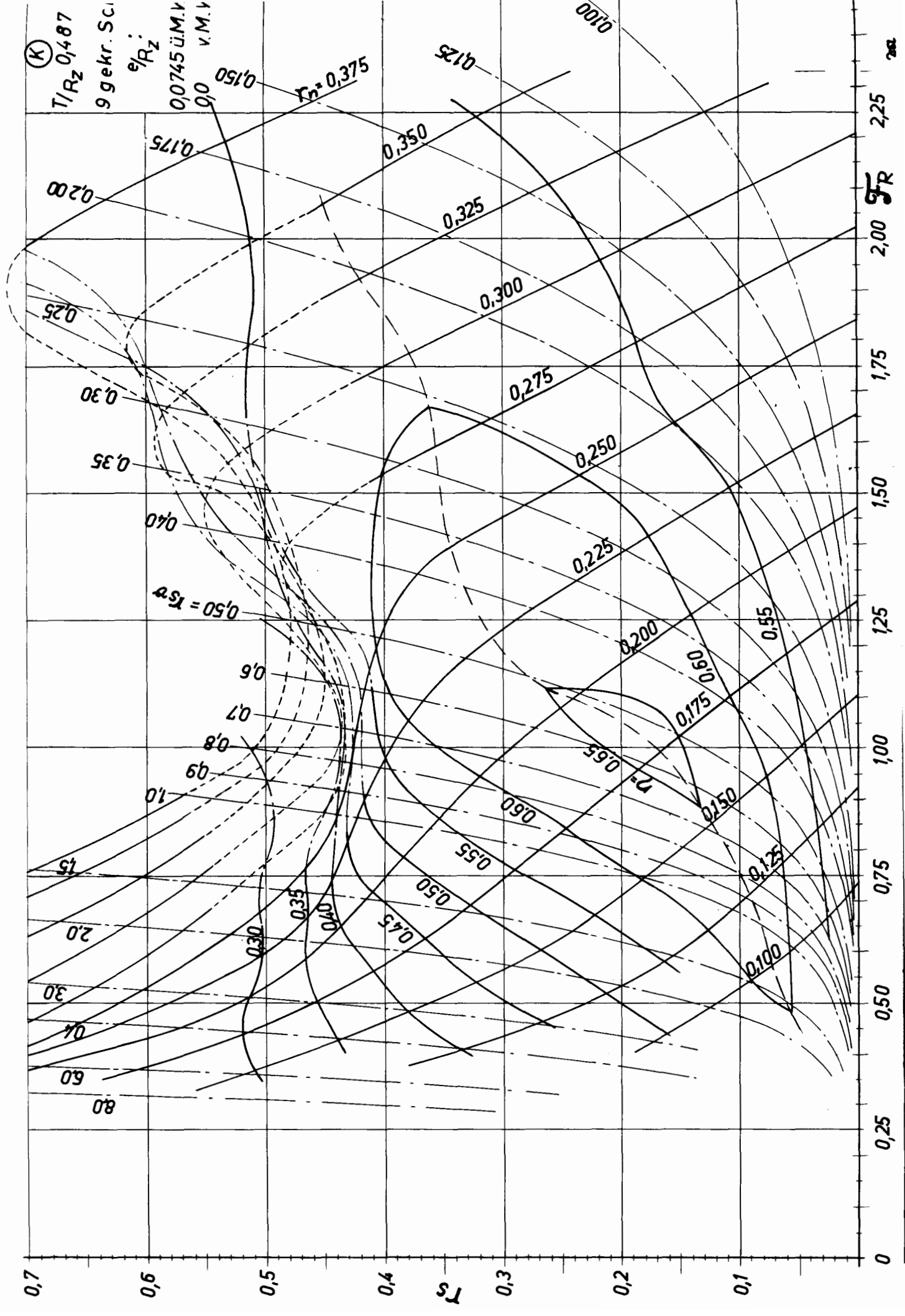
0.0 ü.M.W.

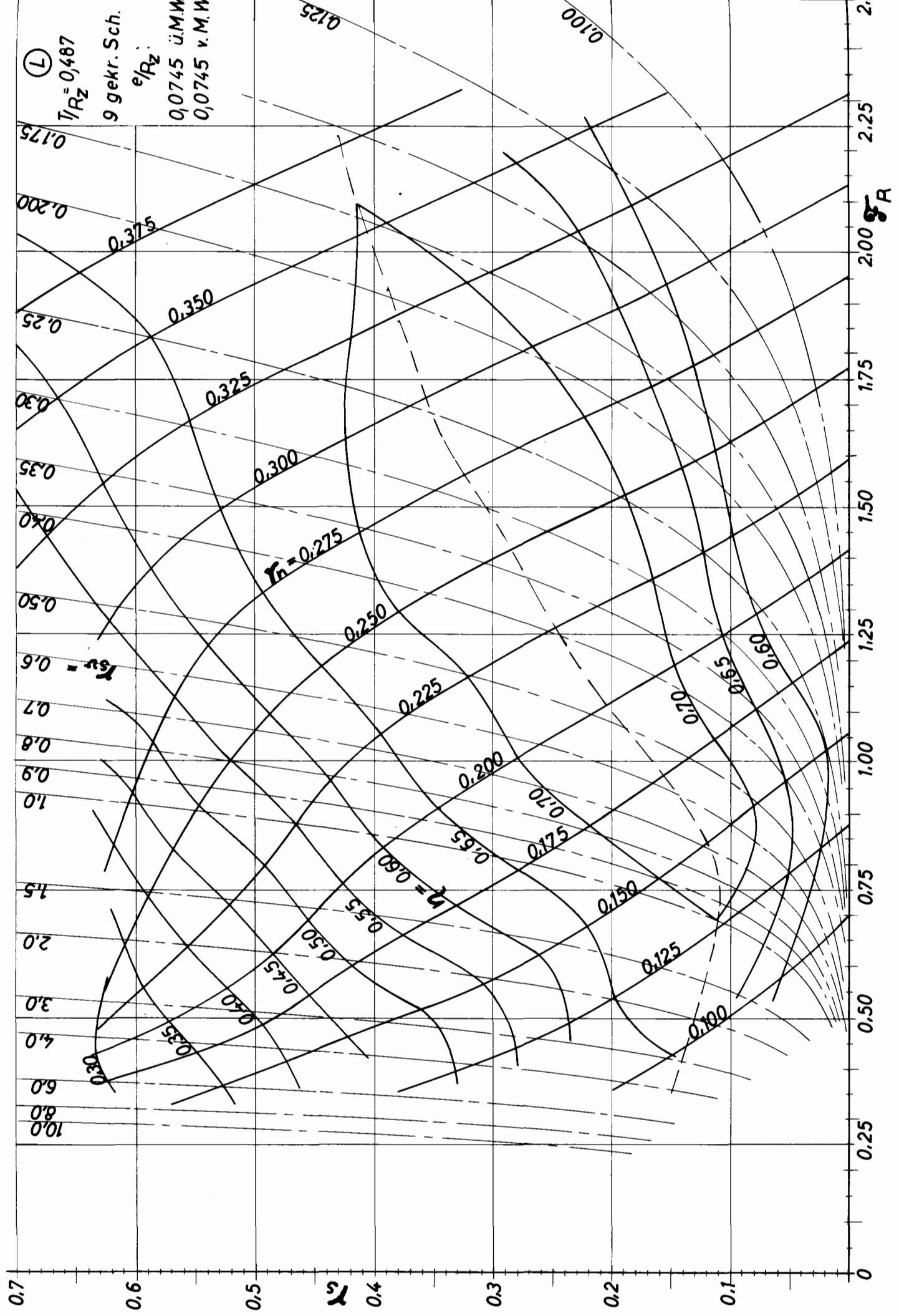
0.1340 v.M.W.

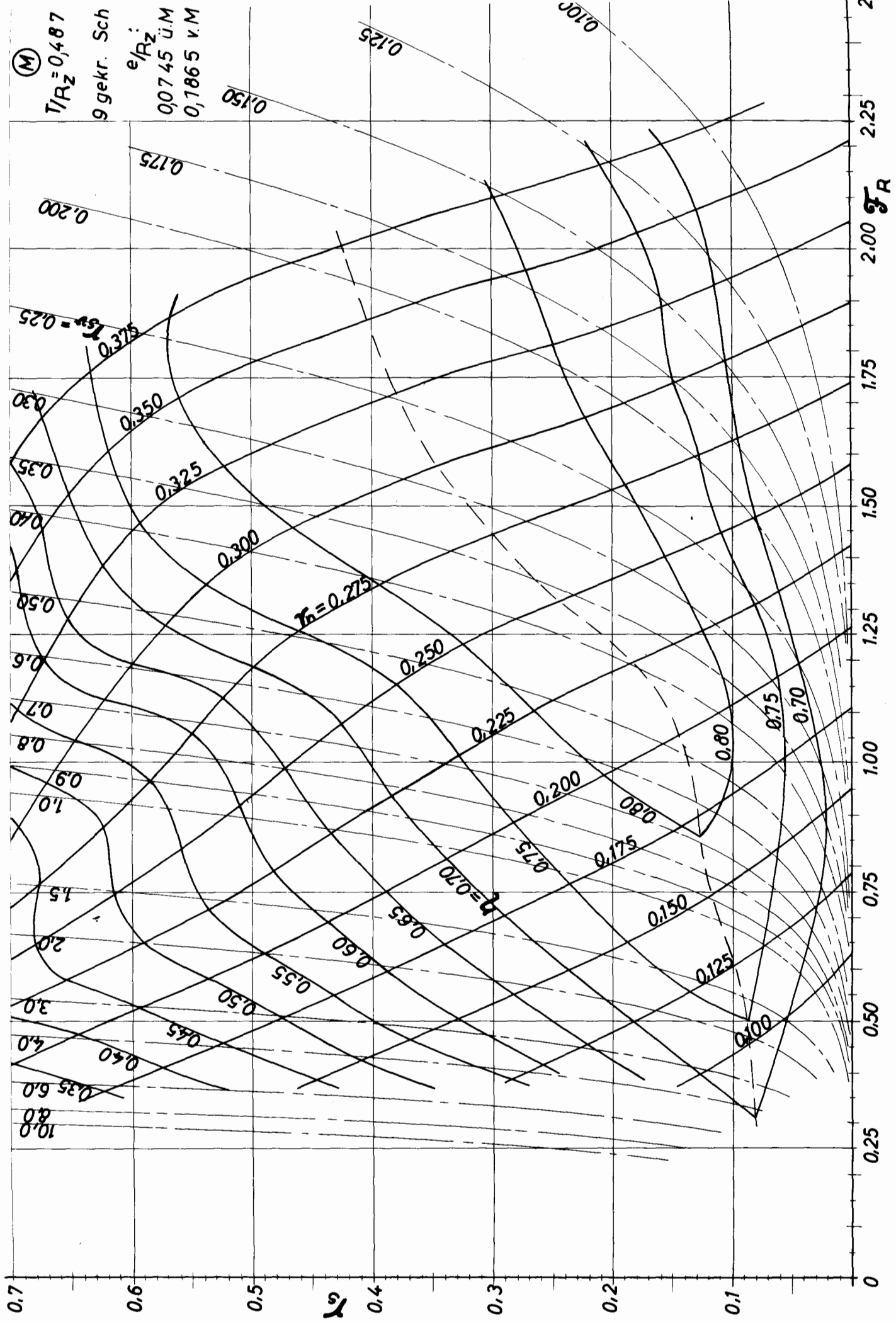




$\frac{1}{R_2} = 0,487$
 9 gekr. Sch.
 $\frac{e}{R_2}$
 0,0 ü.M.V.
 0,1865 V.M.V.

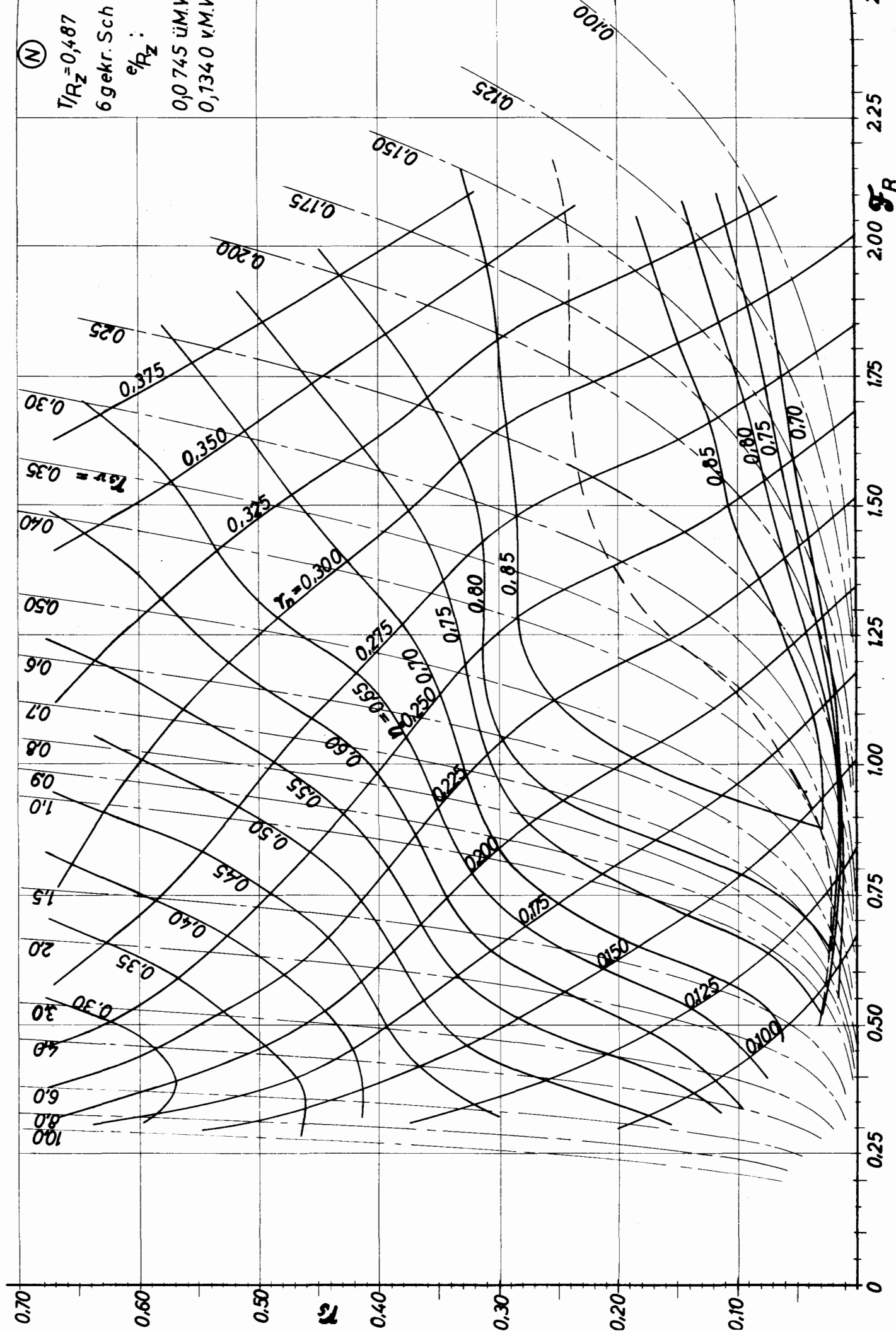


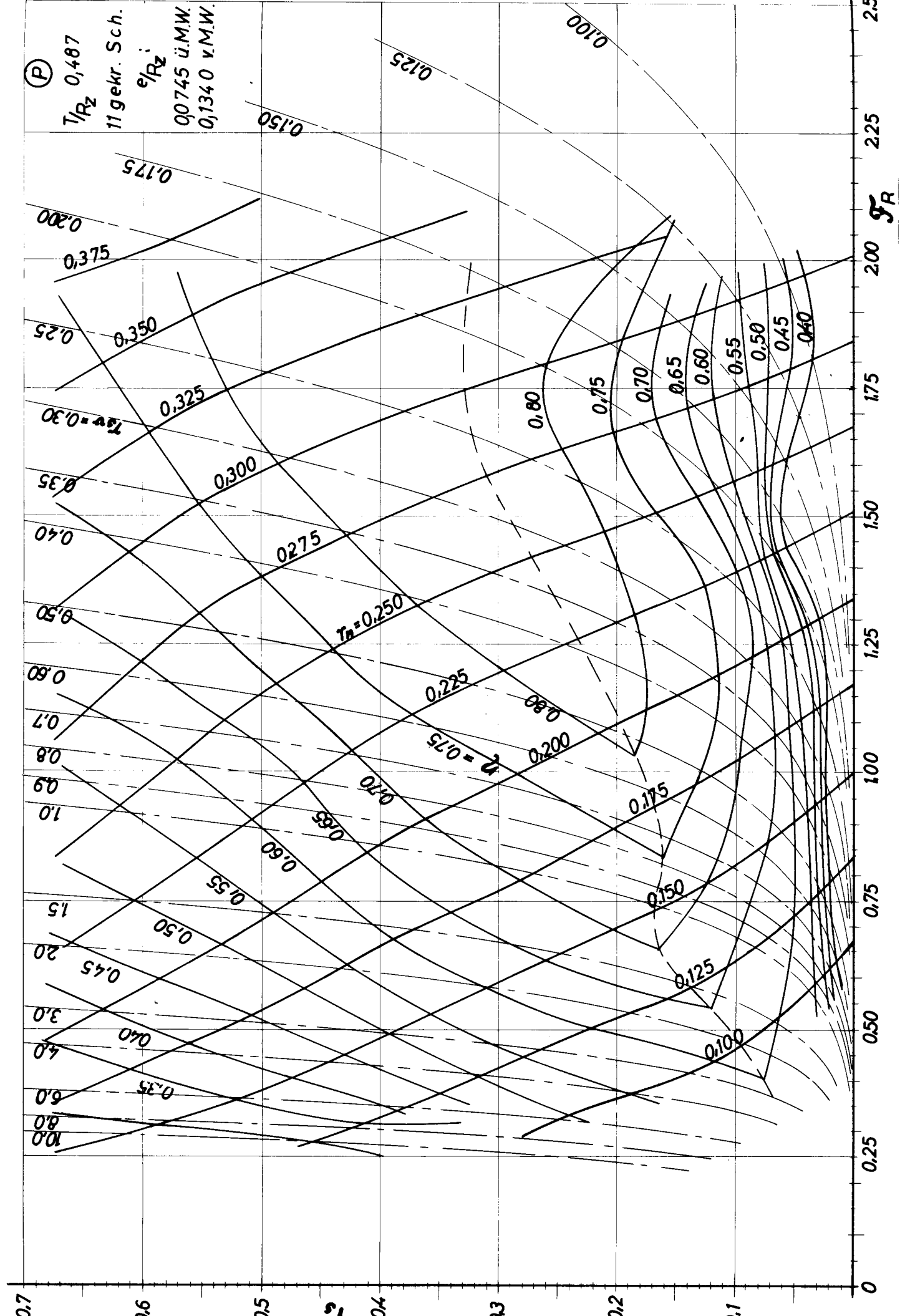


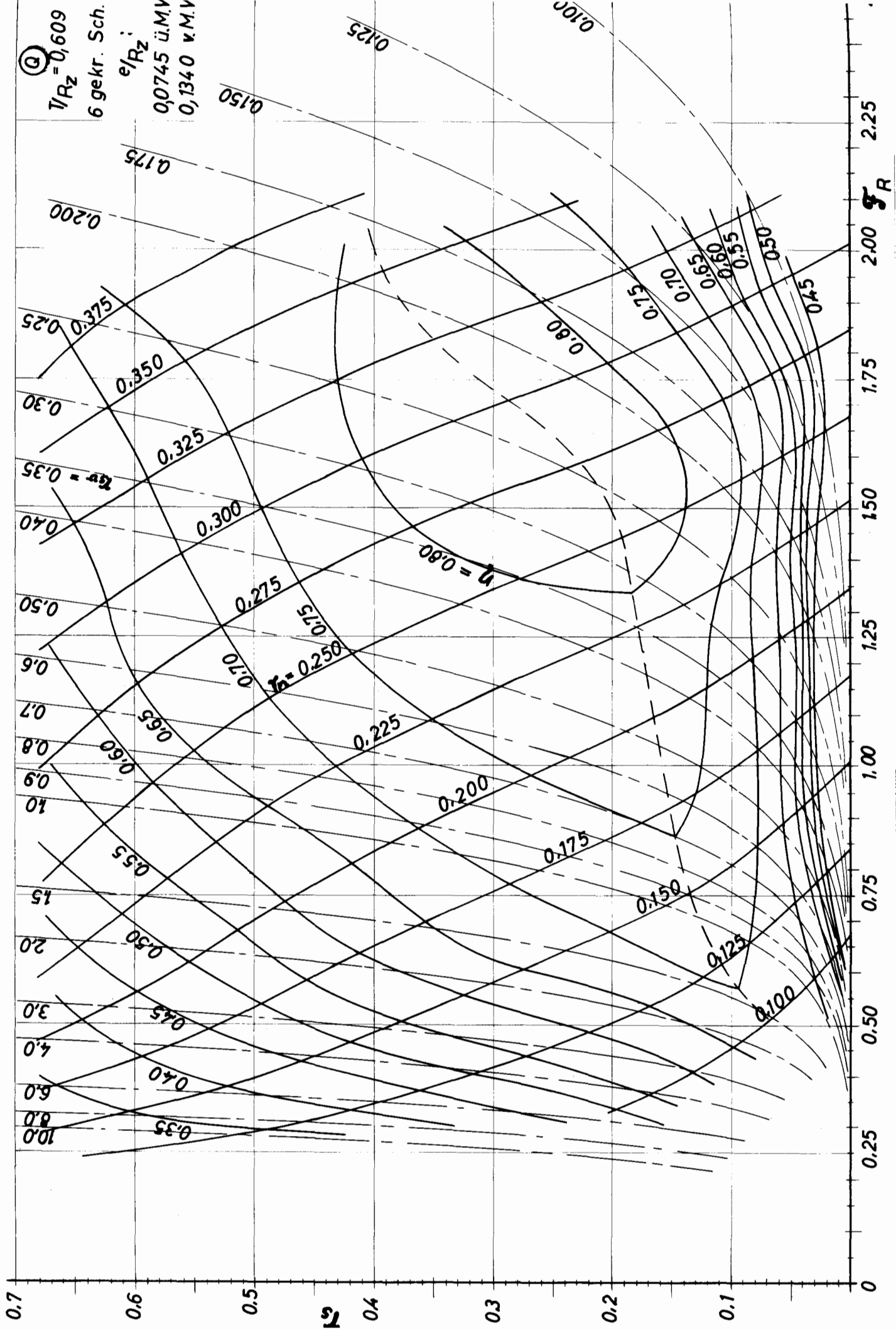


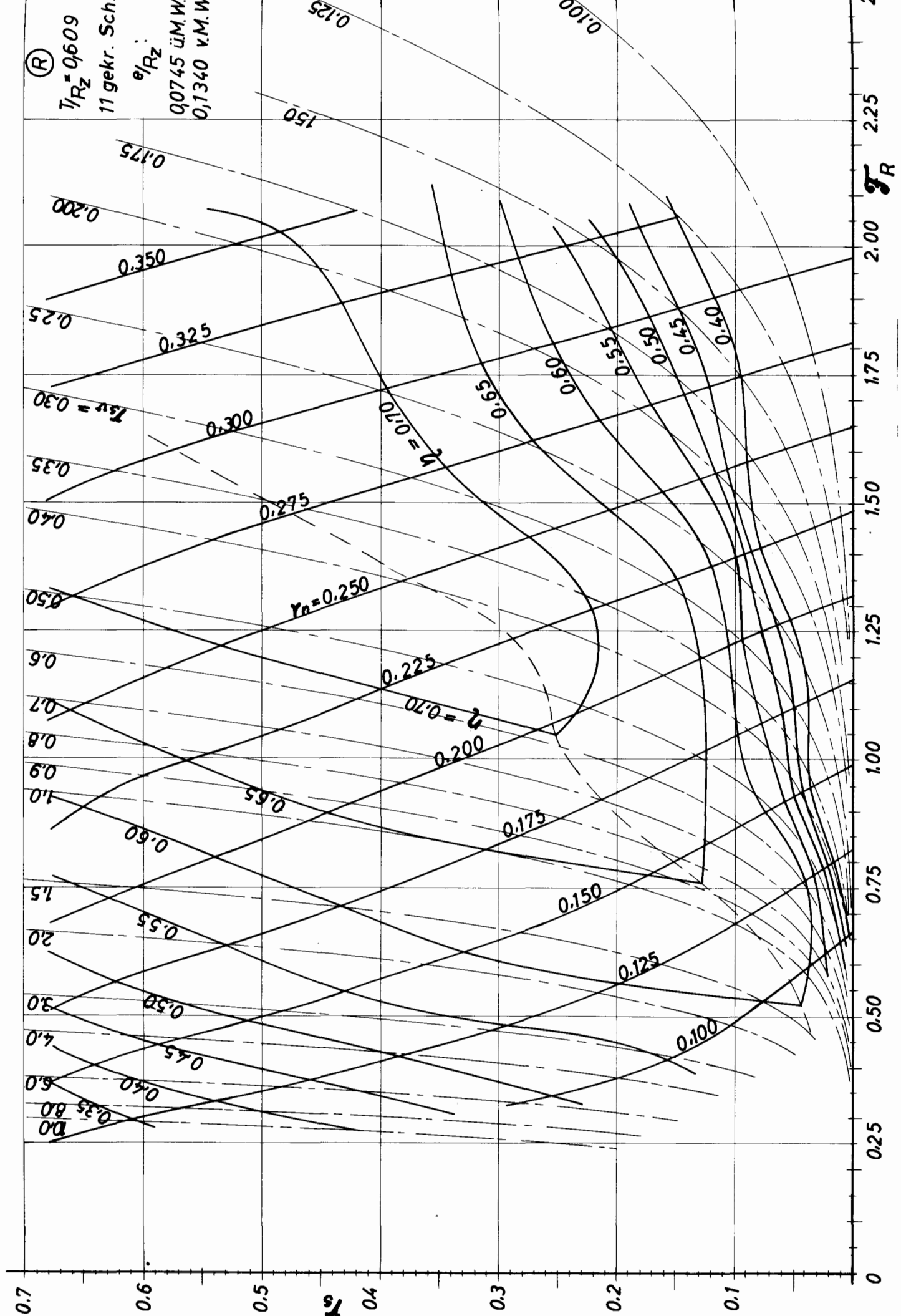
(M)
 $\gamma_{\text{Rz}} = 0.487$
9 gekr. Sch.
 e/R_z :
0,0745 ü.M
0,1865 v.M

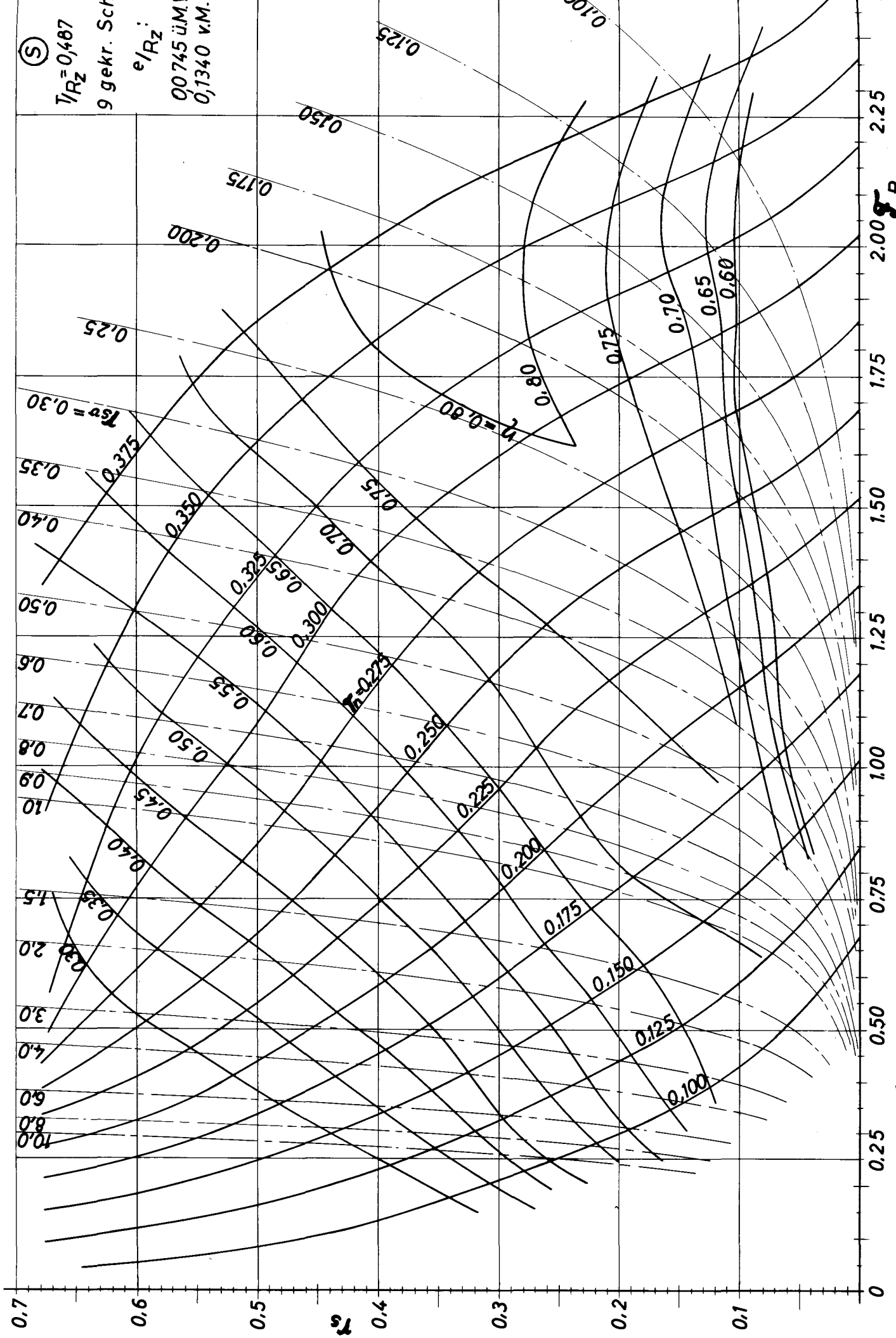
$\eta_{R_2} = 0,487$
 6 gekr. Sch
 $e_{R_2} :$
 0,0745 üMV
 0,1340 vMV

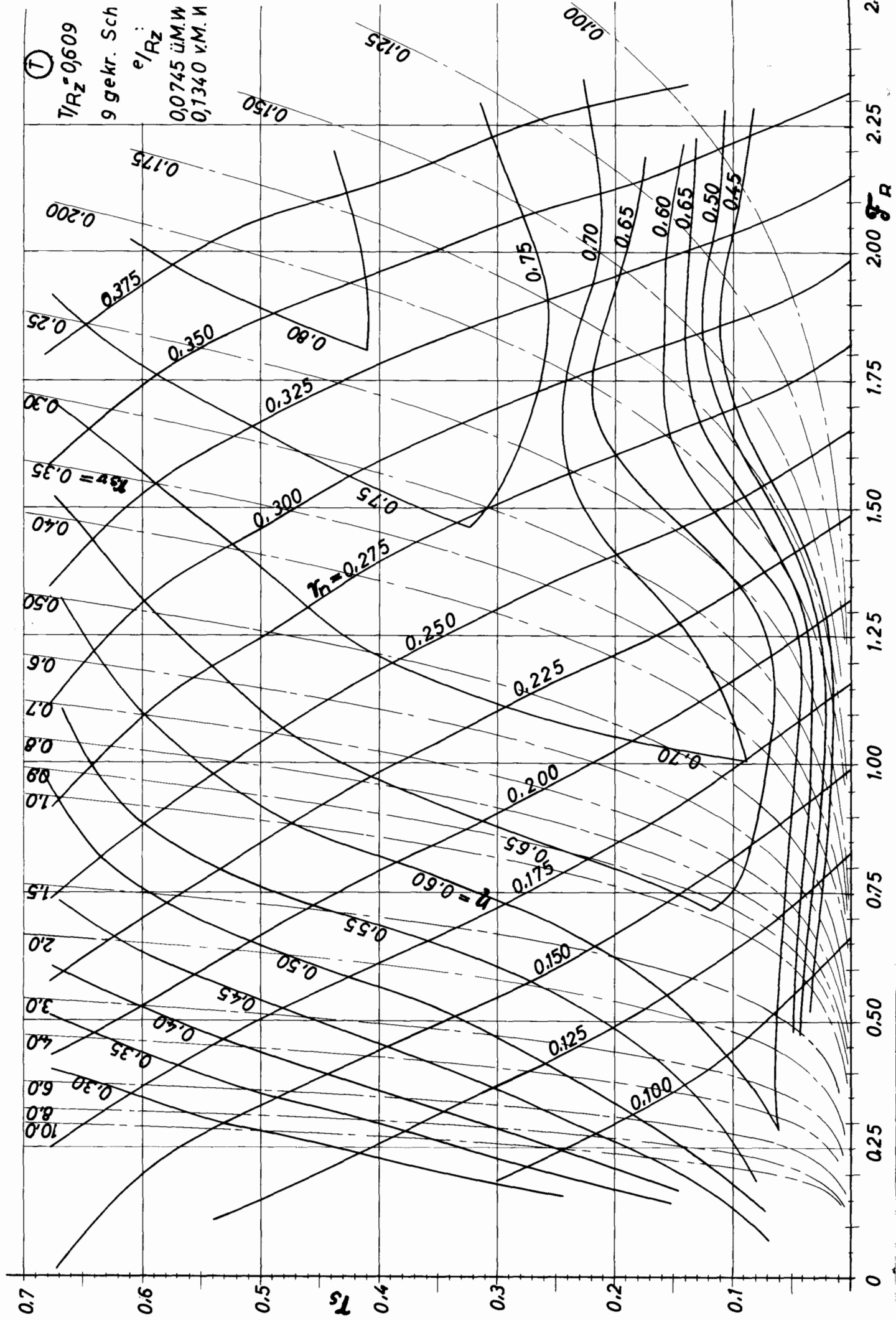


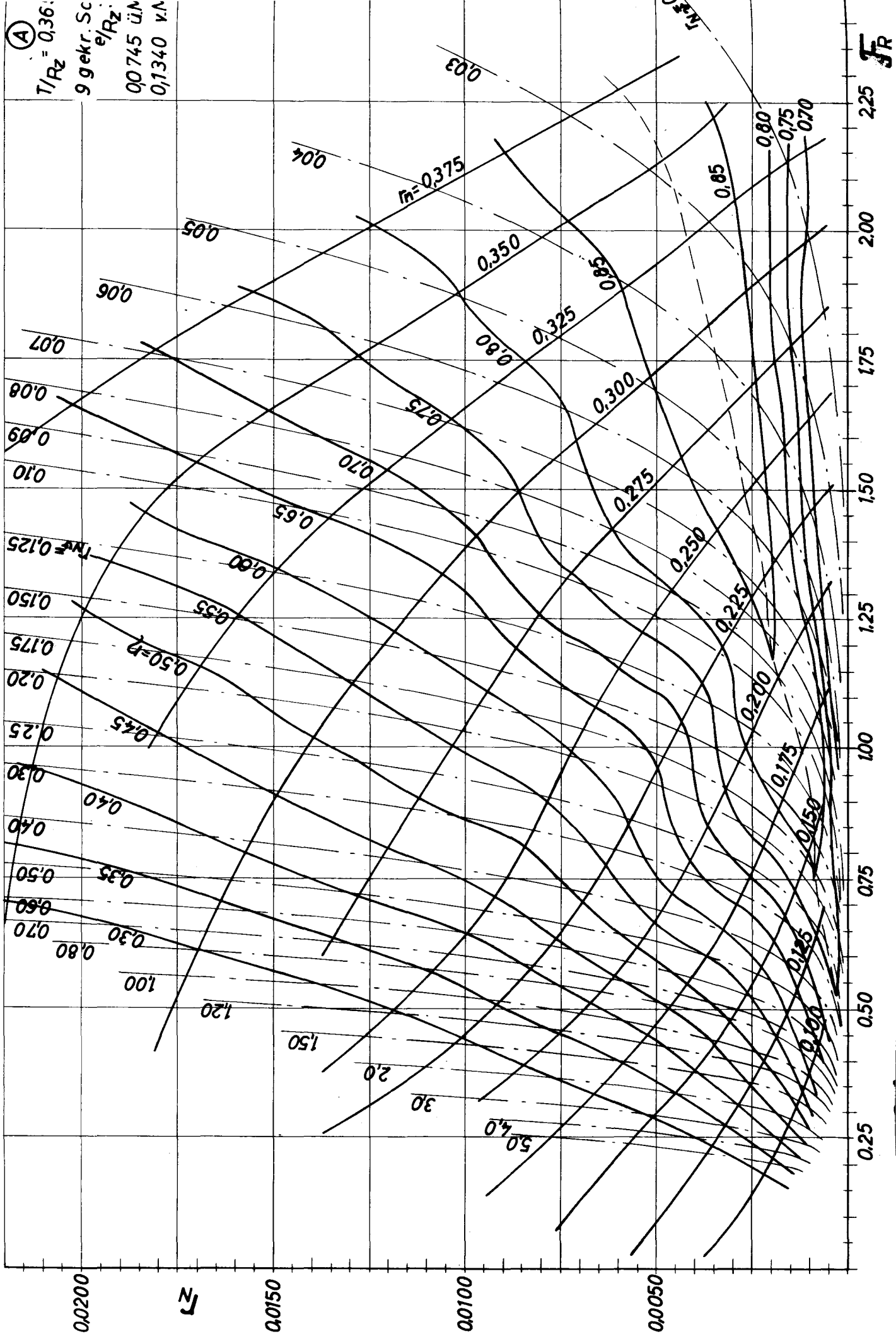




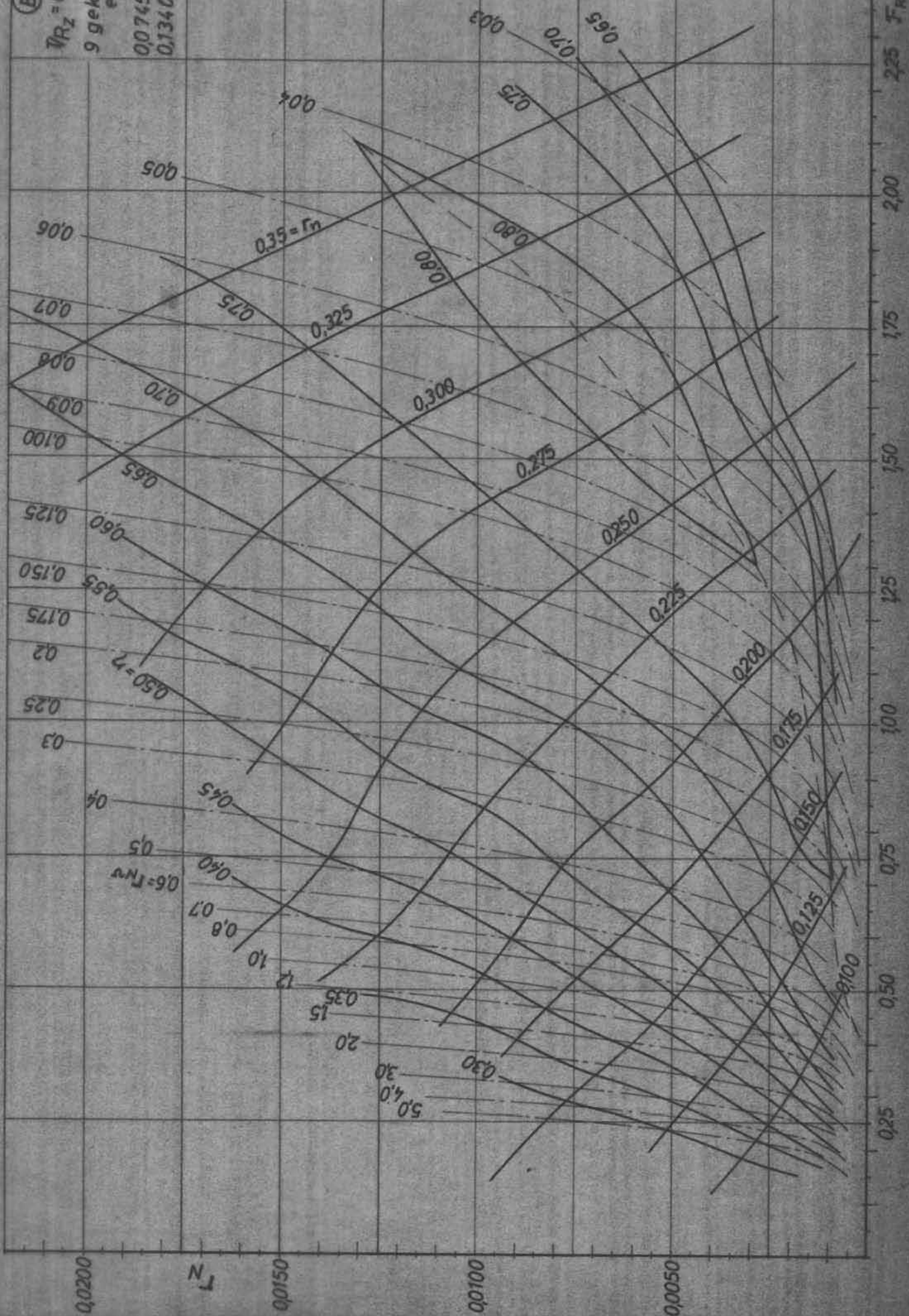


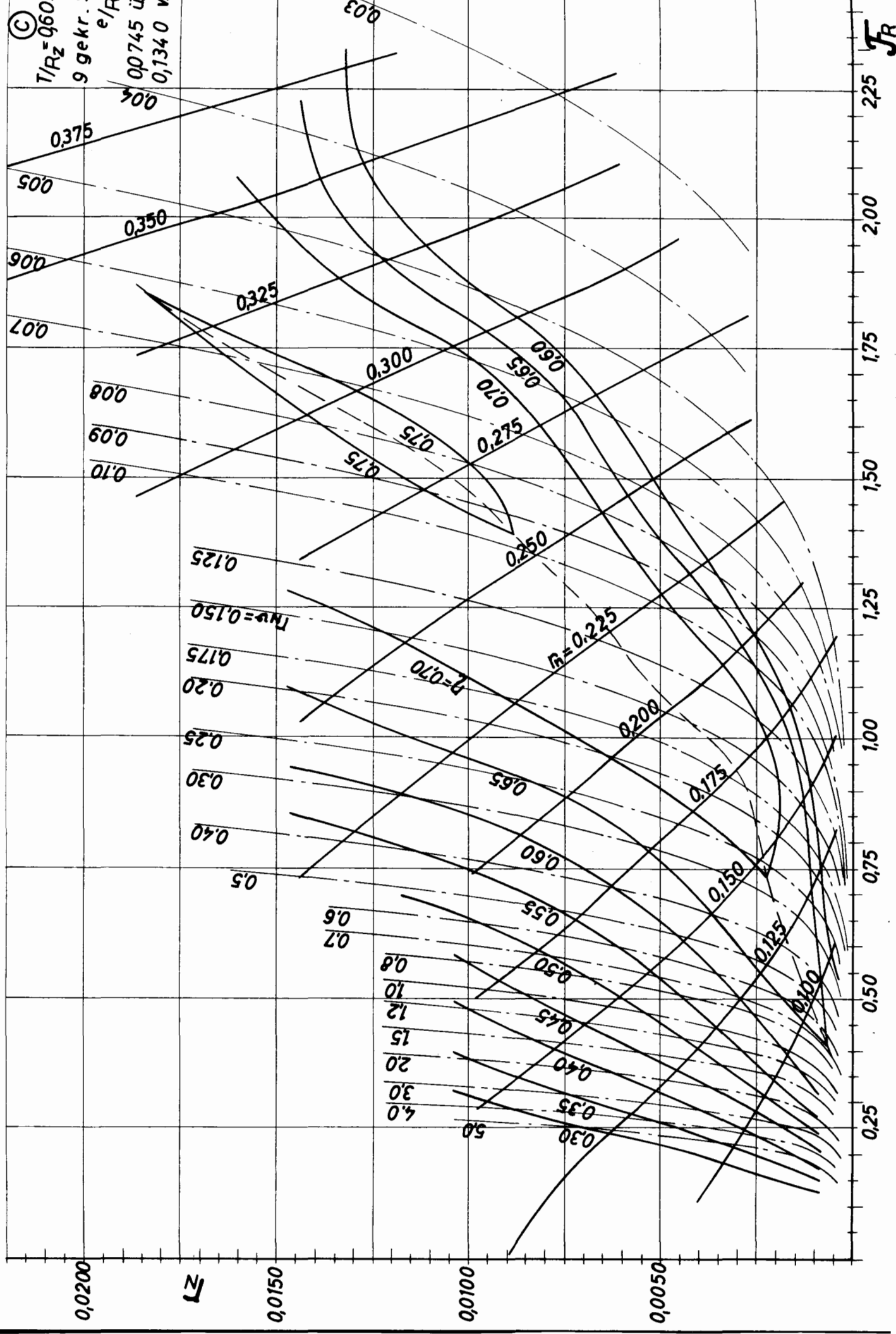


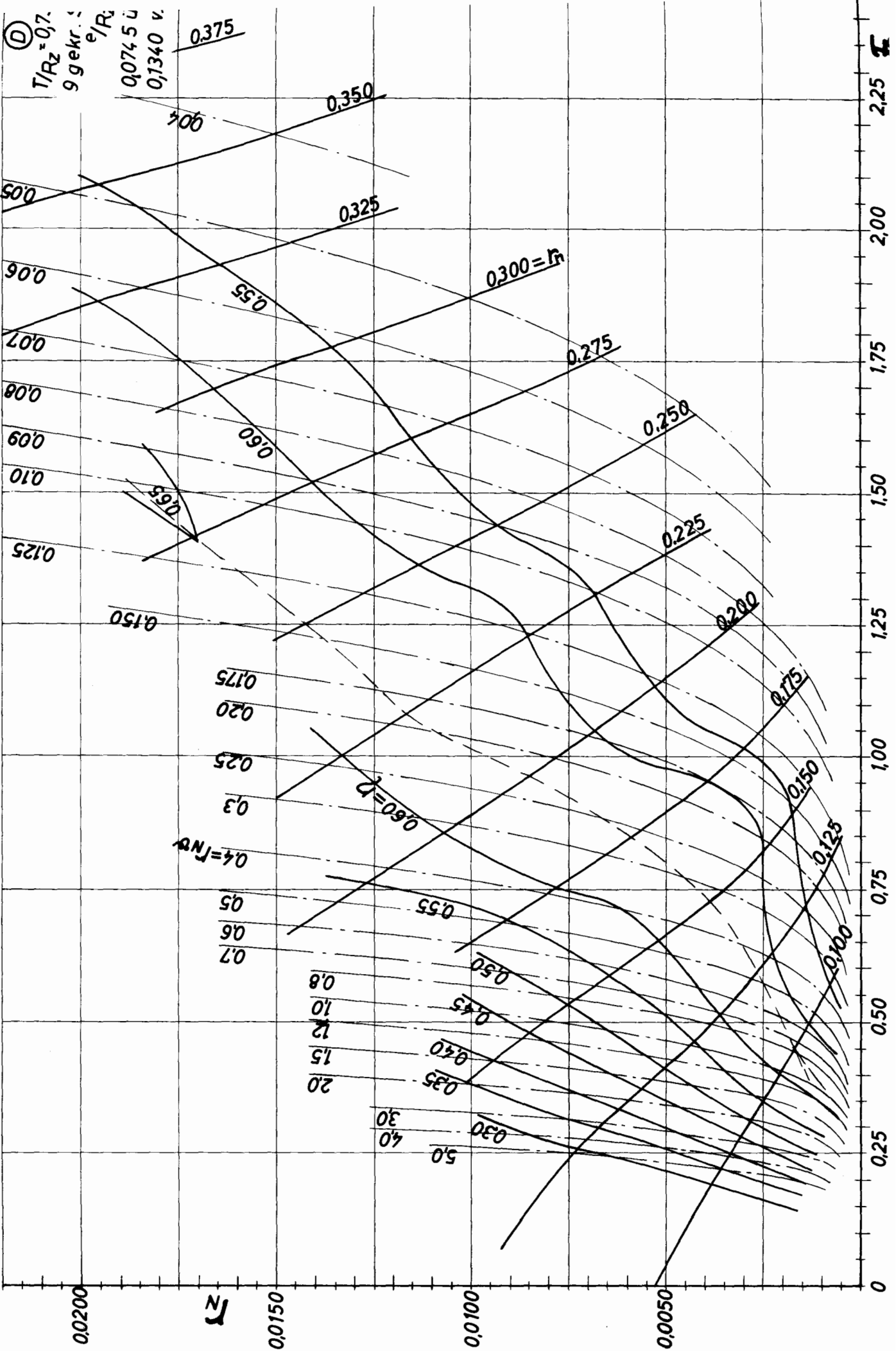


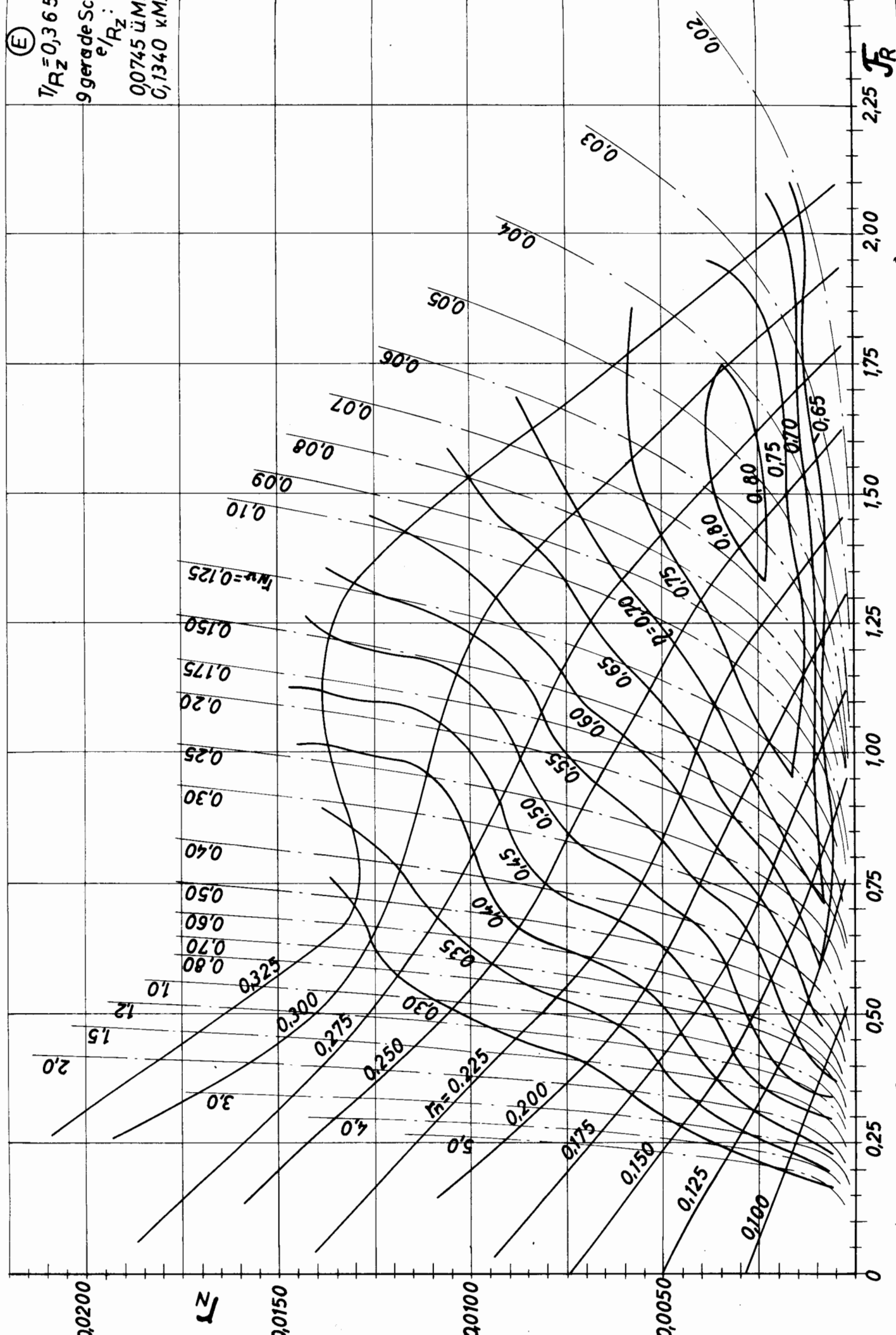


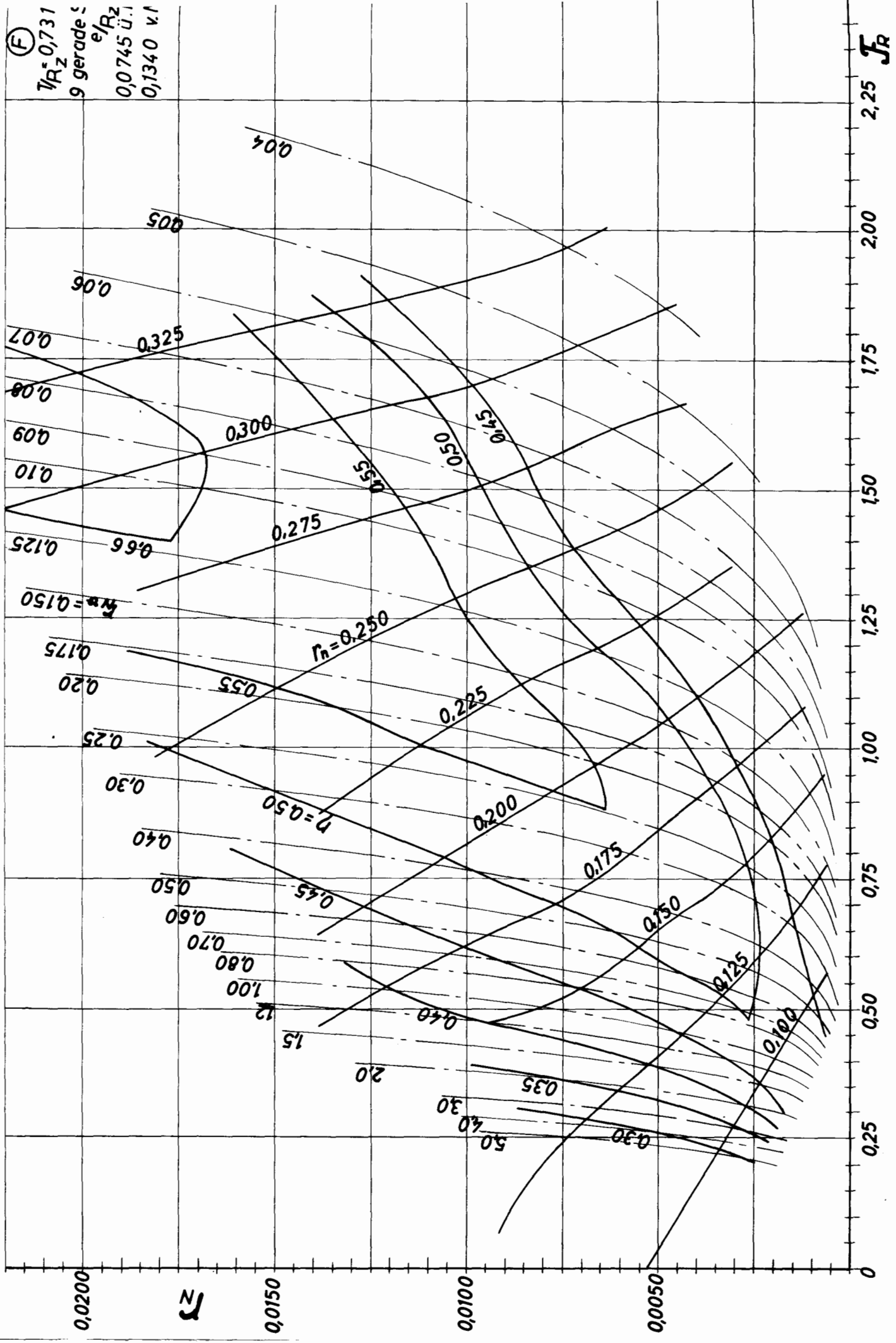
(B) $\eta_{R2} = 0,487$
 9 gekr. St.
 e/R_2
 0,0745 uM
 0,1340 uM

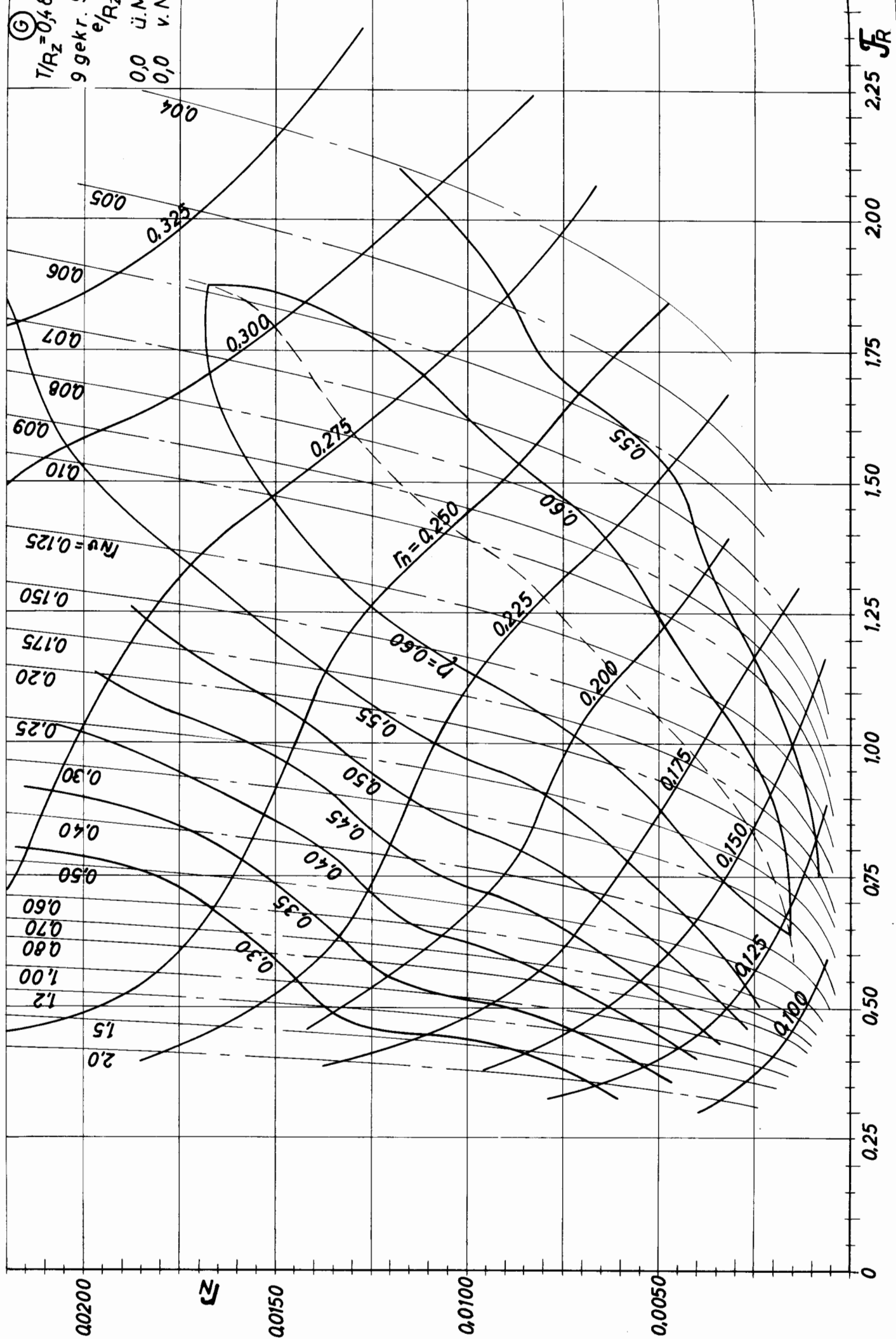


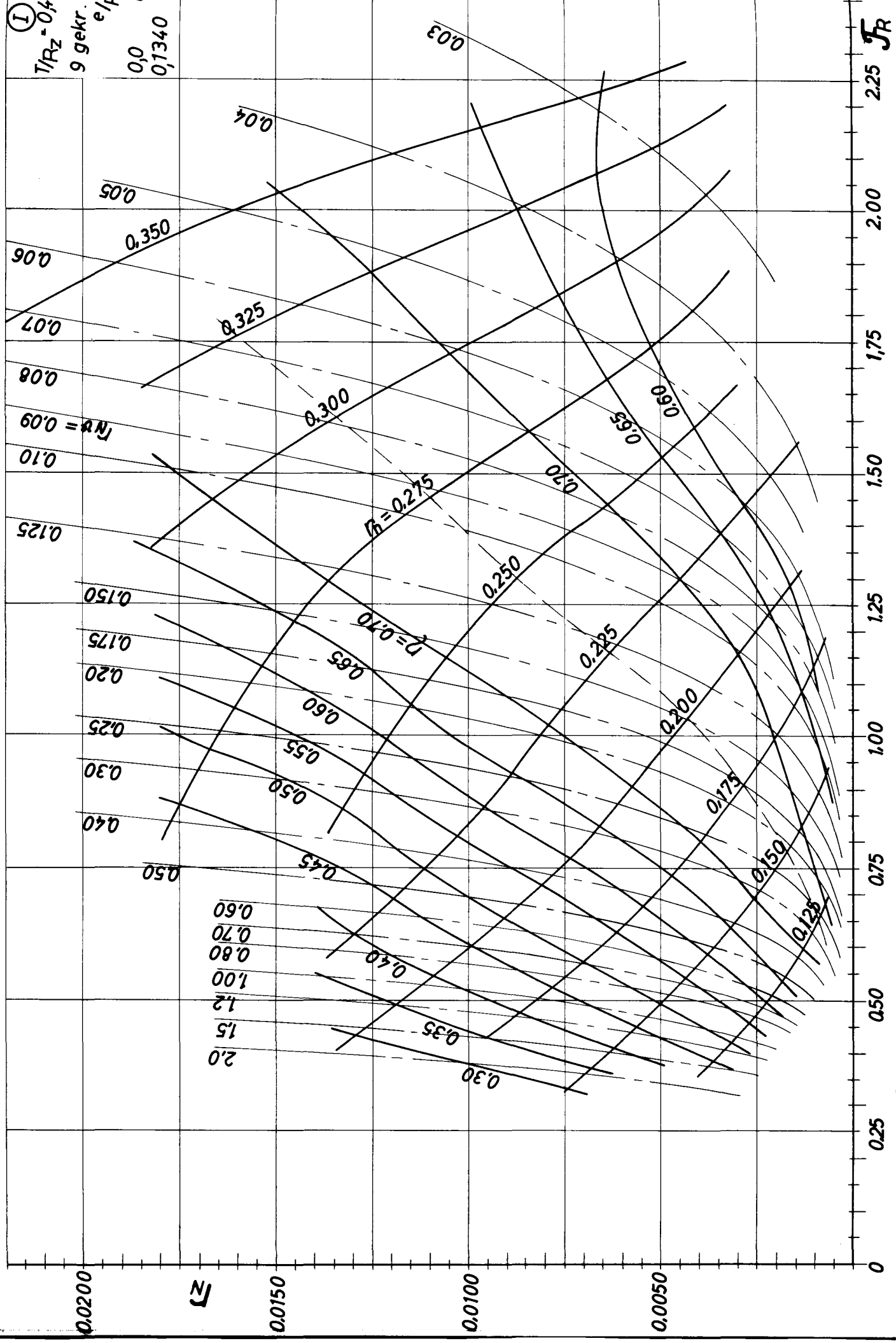


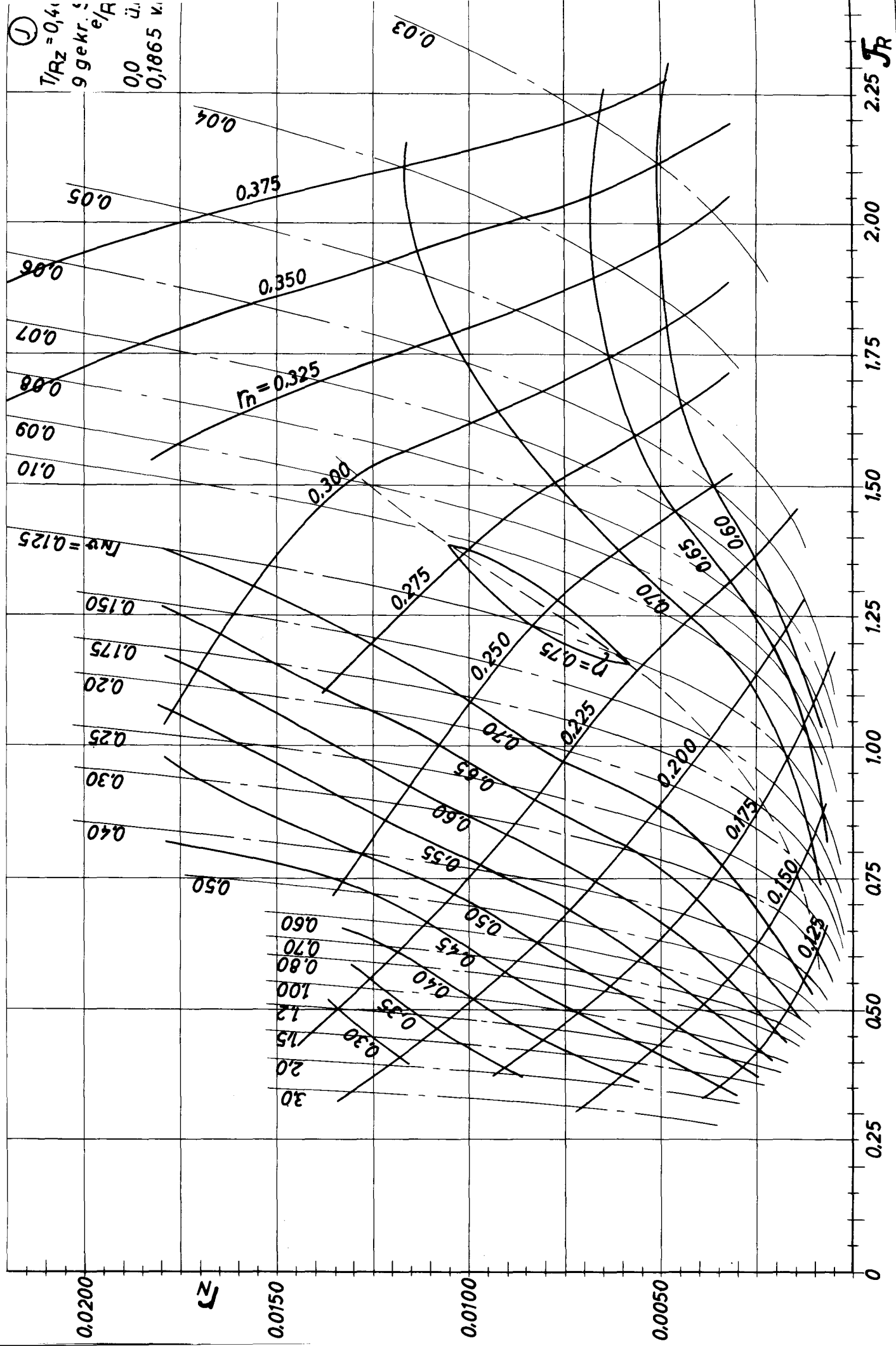


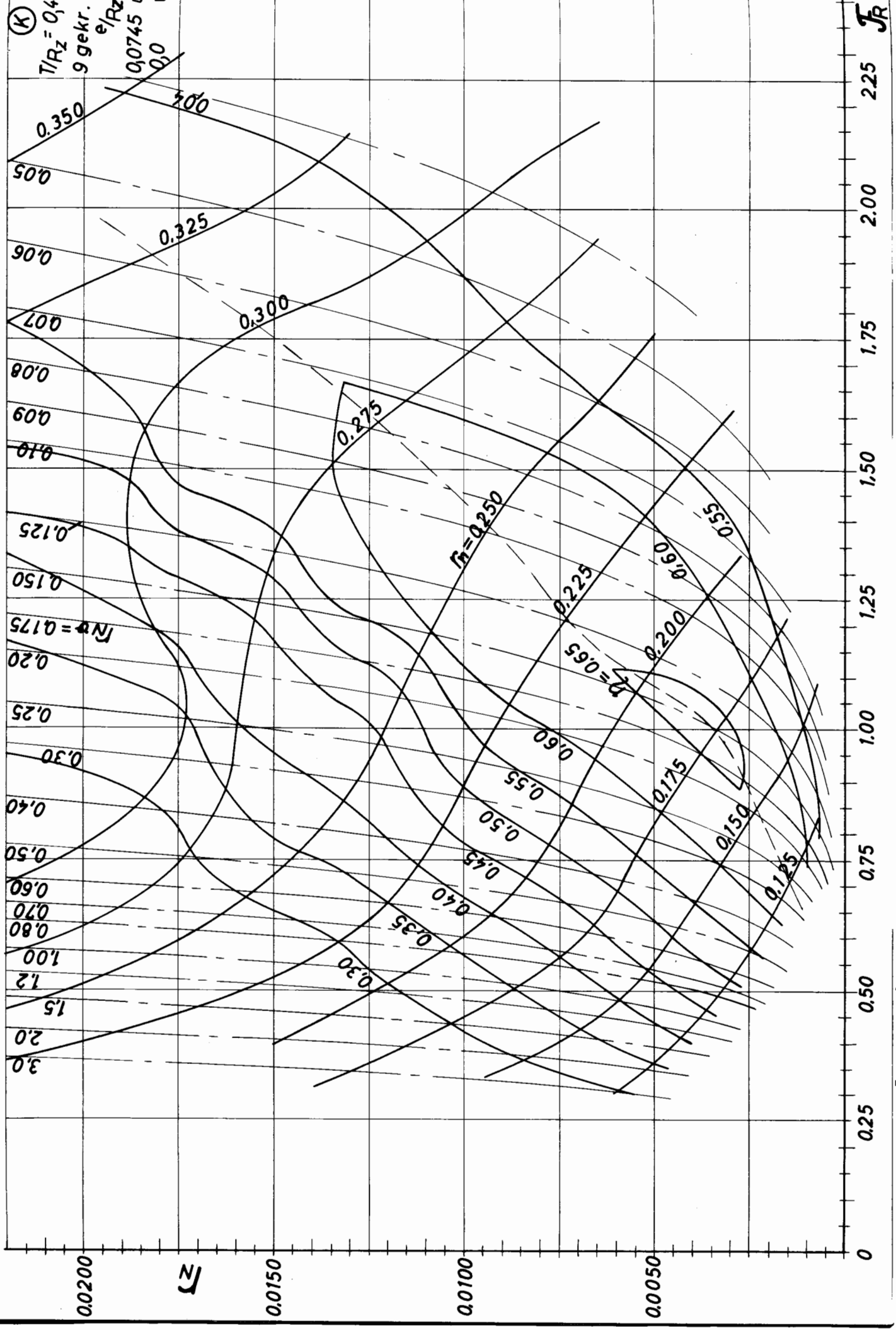


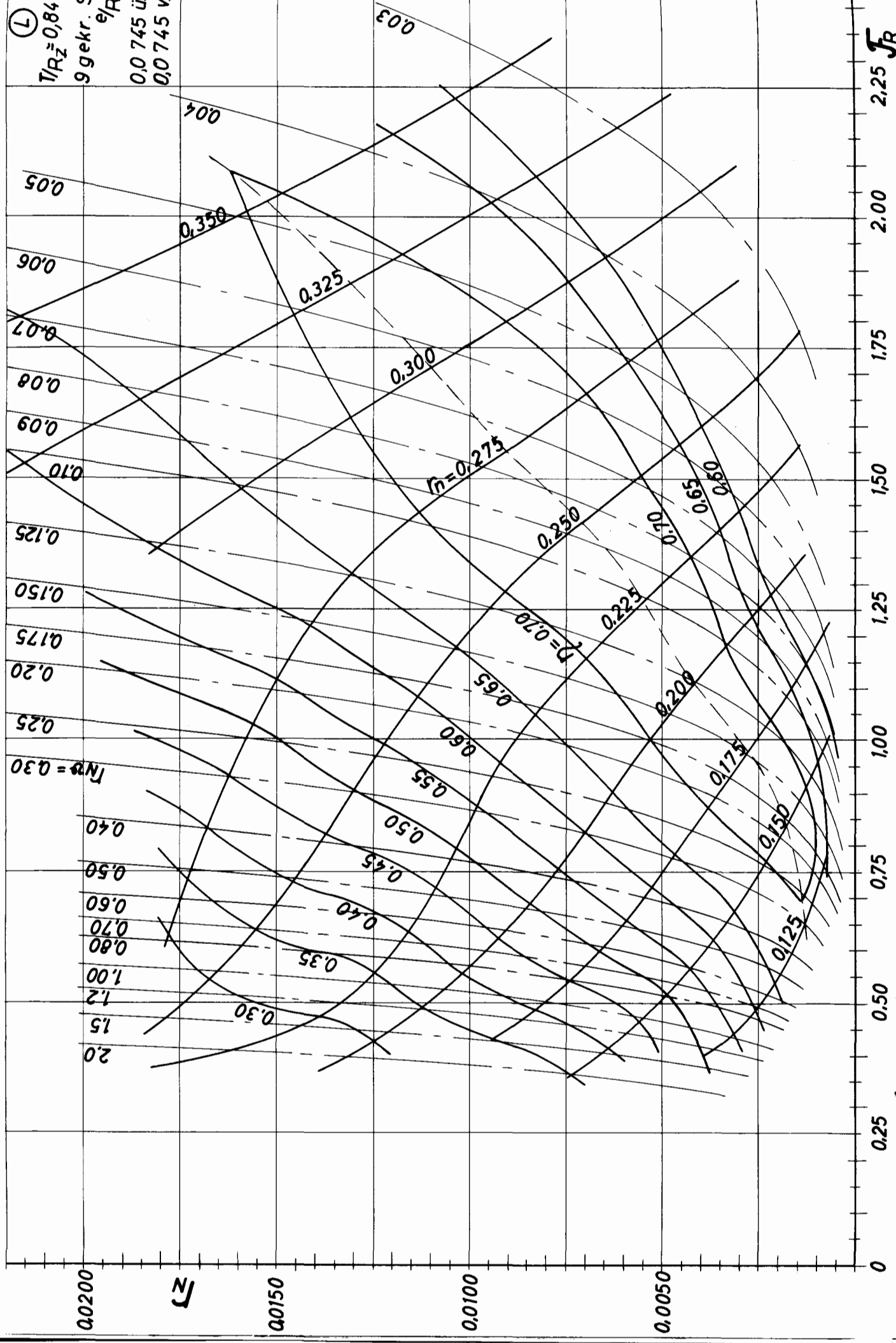


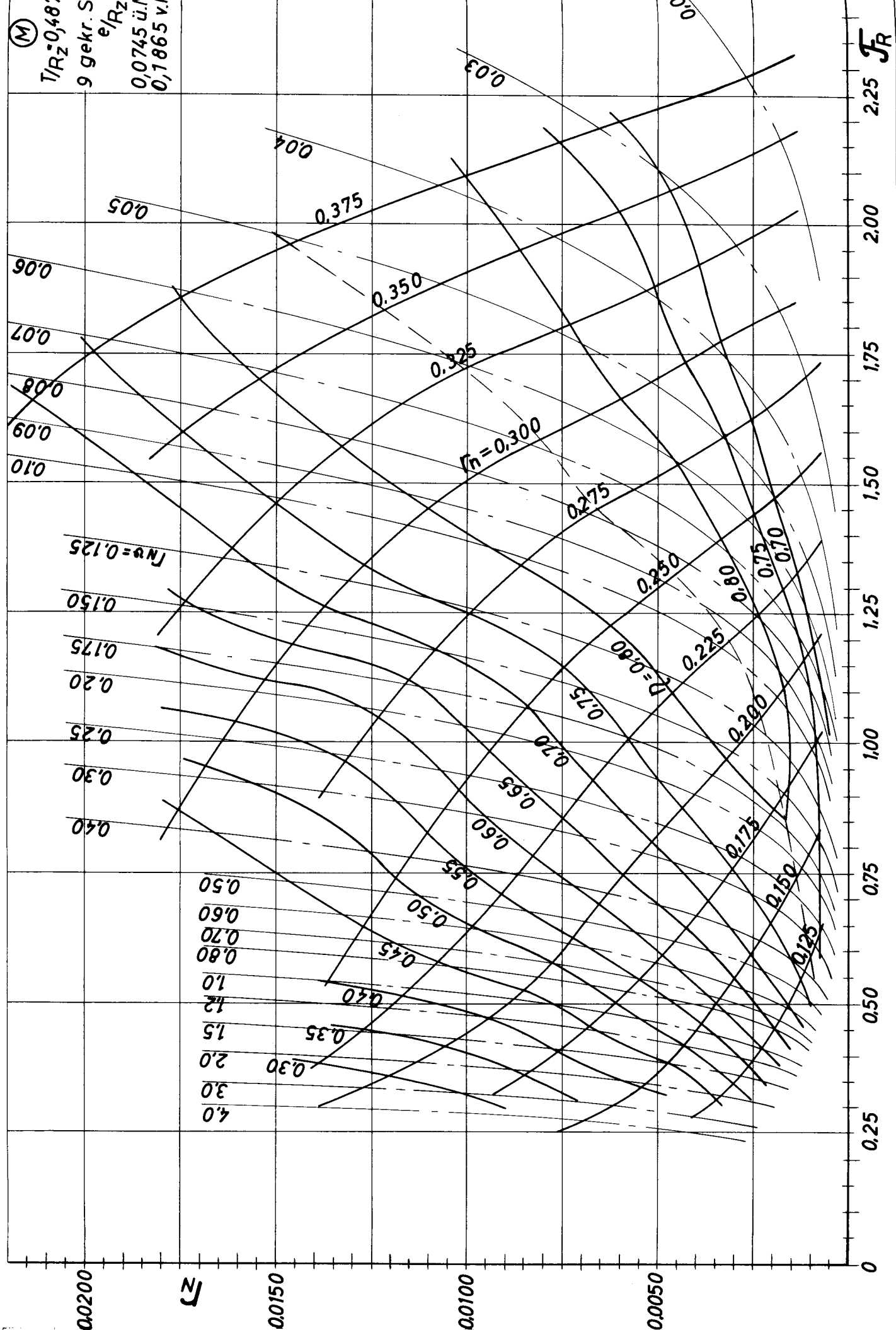




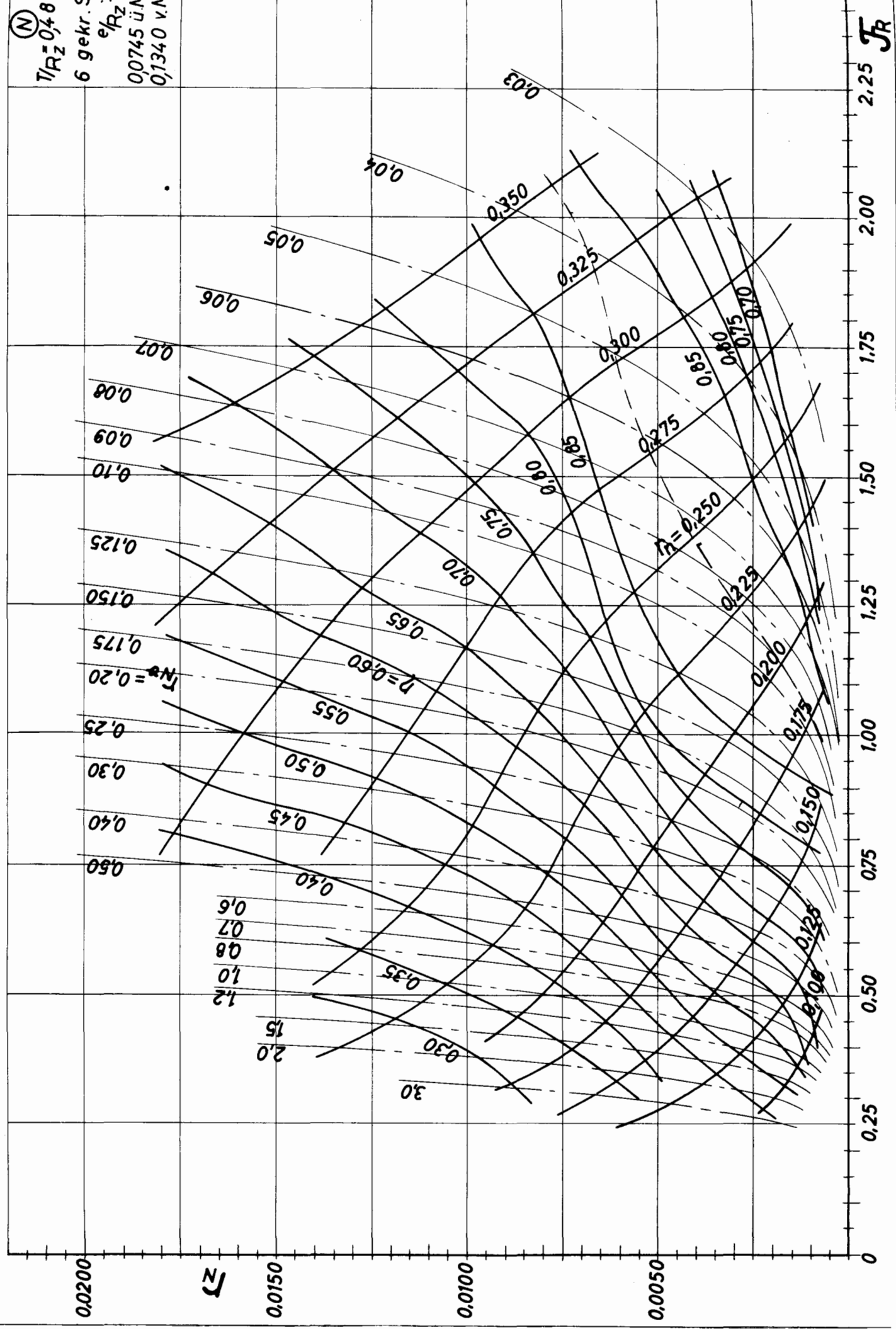




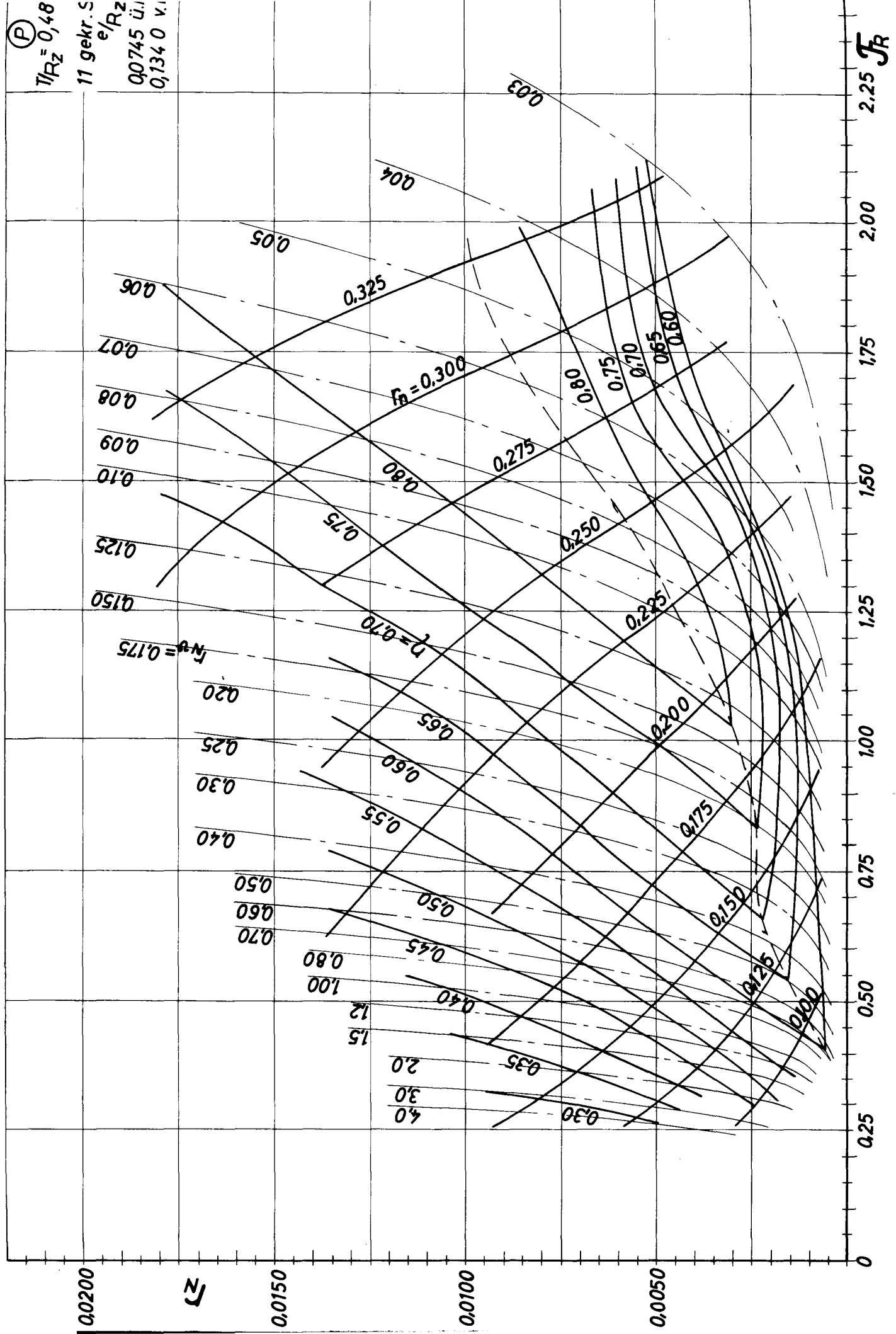


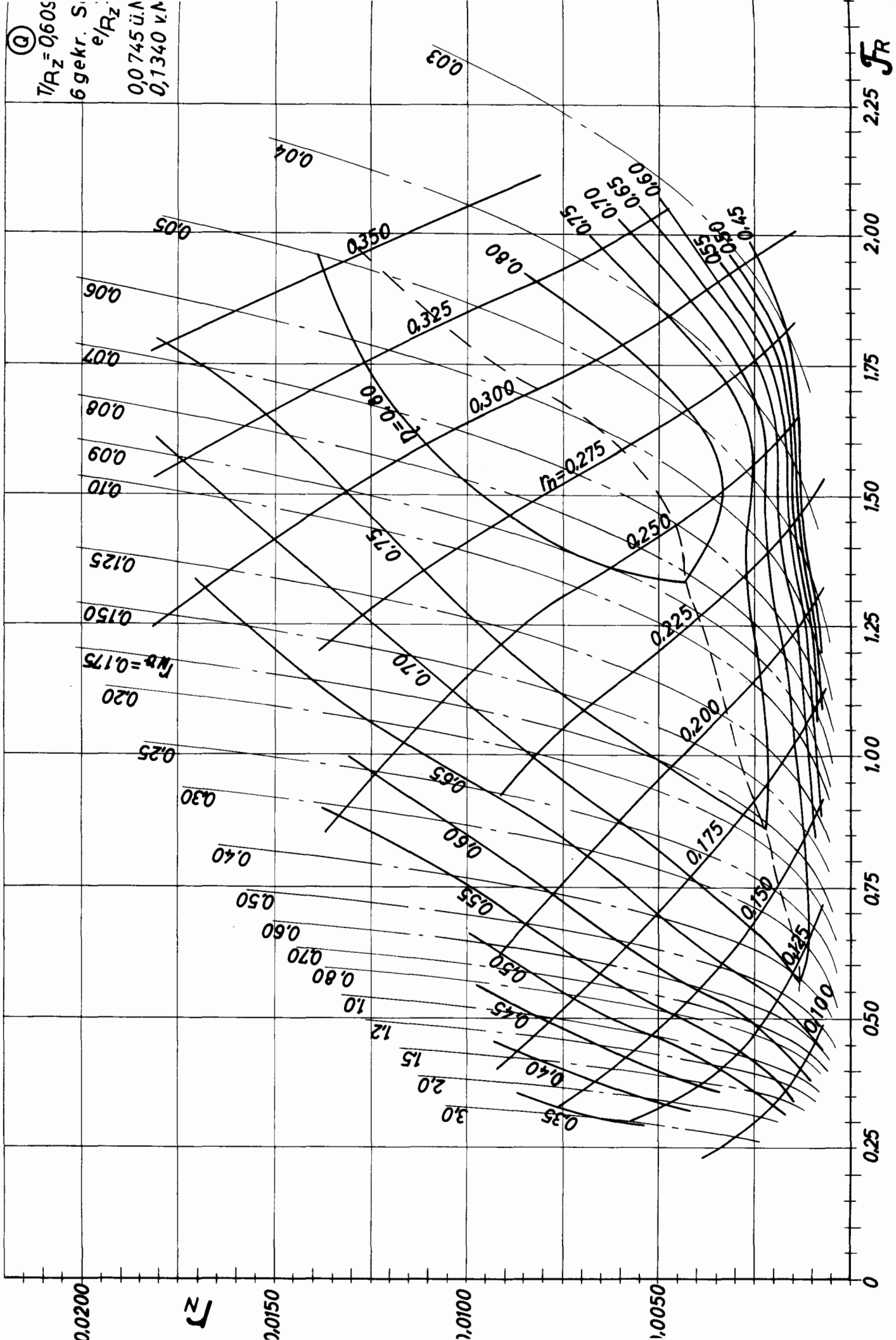


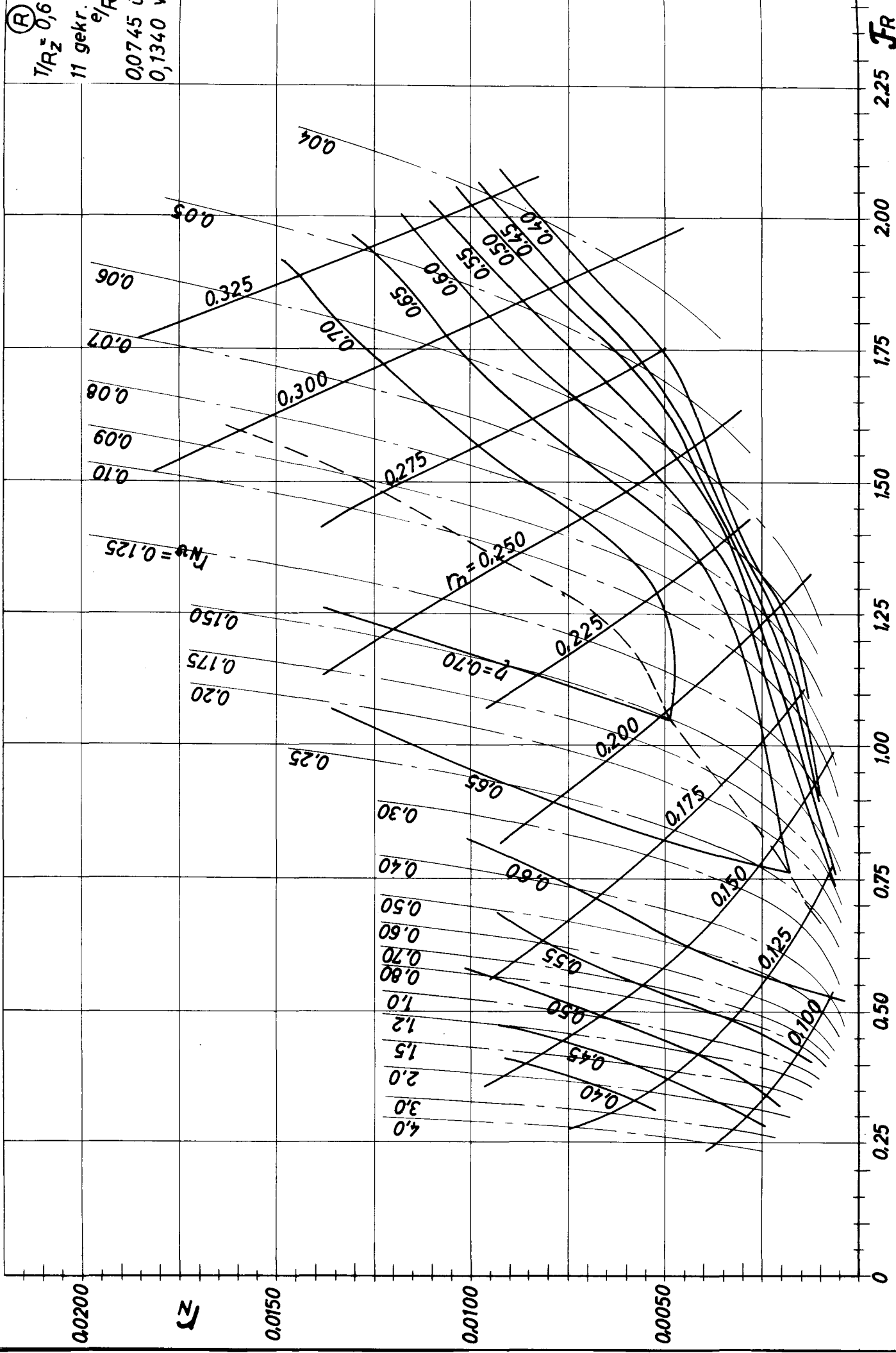
\textcircled{N}
 $1/R_2 = 0,48$
 6 gekr. S
 e/R_2
 00745 üN
 01340 vN

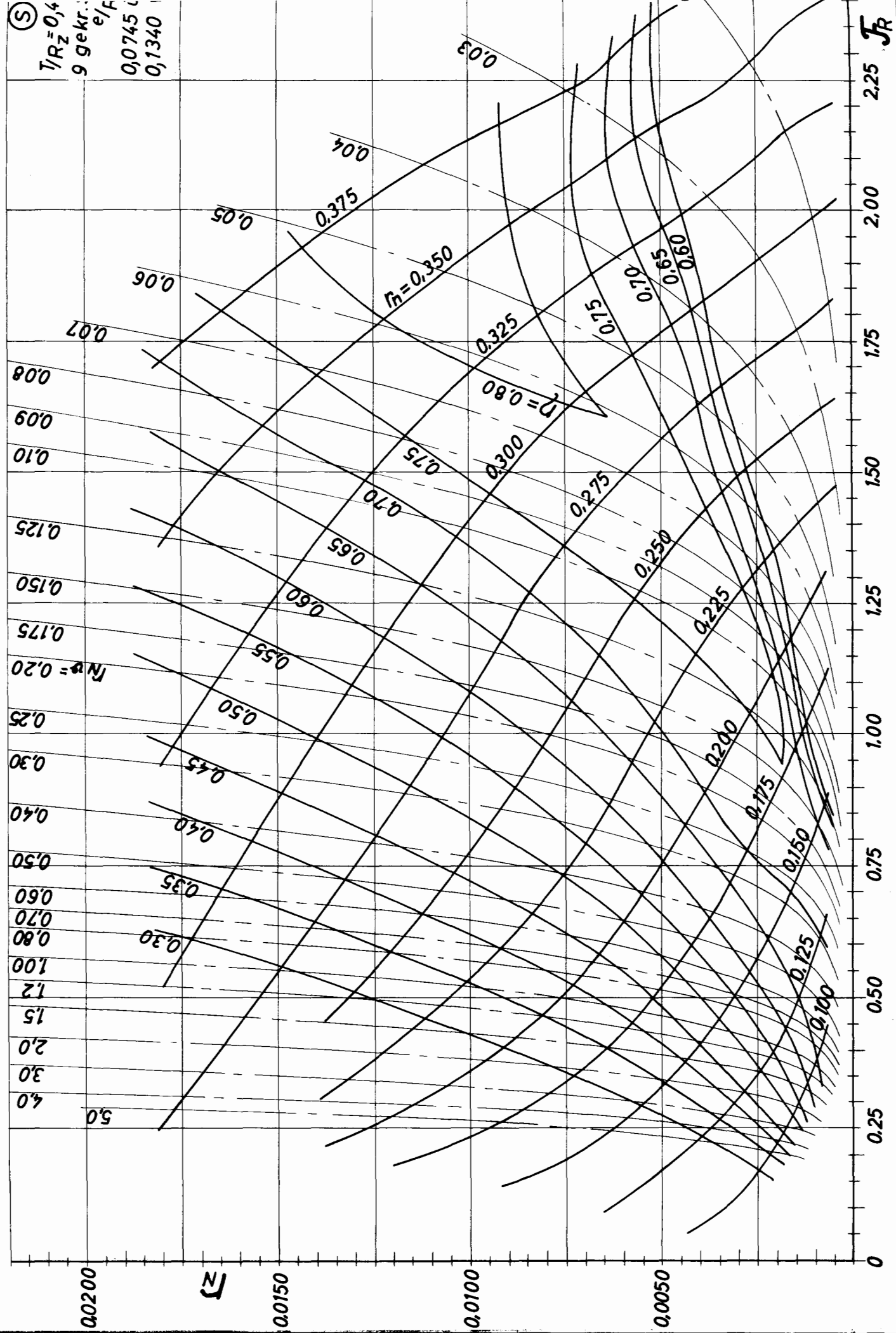


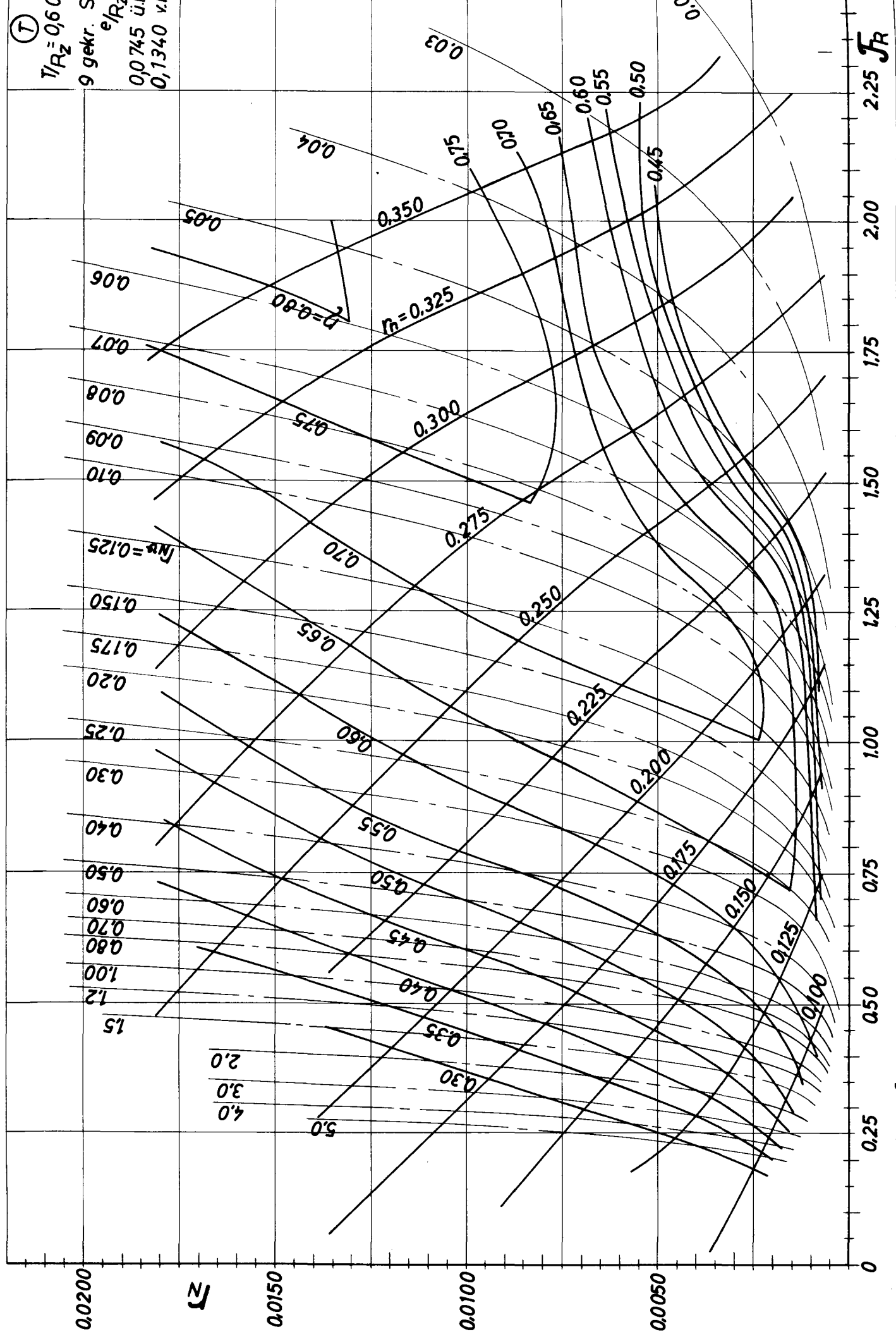
(P)
 $1/R_z = 0,48$
 11 gekr. S
 e/R_z
 0,0745 ü.
 0,1340 v.











**Bericht über die Ausarbeitung
von Berechnungsunterlagen für Schaufelräder**

von

Dipl.-Ing. M. Müller

**Lehrstuhl für Entwerfen von Schiffen am
Institut für Schiffbau der Universität
Hamburg, Prof. Dr.-Ing. K. Wendel. 1959**

Schaffung von Berechnungsunterlagen für Schaufelräder nach Modell-Versuchen.

Volpich hat drei Broschüren veröffentlicht, in denen er seine Modellversuche beschreibt, deren Ergebnisse mitteilt und auswertet /1/.

Die Versuche sind durchgeführt worden mit zwei geometrisch ähnlichen Schaufelradmodellen, deren Außendurchmesser über die Schaufeln gemessen 1036 (mm) und 518 (mm) betragen. In den ersten Ergebnissen haben sich kleine Differenzen zwischen den beiden Rädern ergeben, die aber keine zusammenhängende Tendenz erkennen ließen. Auch Gebers /2/ hat in seinem Bericht denselben Effekt beobachtet und zu erklären versucht, ist jedoch auch nur zu Mutmaßungen gekommen.

Volpich hat dann nur noch das große Rad geschleppt und die Ergebnisse in Diagrammen veröffentlicht.

Die Abmessungen des Rades betragen, bezogen auf R_z als Zapfenkreisradius (siehe schematische Schaufelraddarstell.)

Zapfenkreisradius		R_z	= 1,0
Radius über Schaufel		R_a	= 1,212
Exzenterkreisradius		R_e	= 1,0
Schaufelhöhe		h	= 0,478
		h_a	= 0,212
		h_1	= 0,266
Schaufelstuhllänge		l	= 0,258
Tauchung (Schaufel U.K - WL)		T_a	= 0,365; 0,487; 0,609 und 0,731
Exzenterlage	über M.W.	$e_{\text{ü.}}$	= 0,0; 0,0745;
	vor M.W.	$e_{\text{v.}}$	= 0,0; 0,0745; 0,1340; 0,1865
Schaufellänge		b	= 1,79 und 1,341
Schaufelzahl		z	= 6 ; 9 ; 11
Schaufelform			gerade und gekrümmt
Krümmungsradius		r	= 0,714

Obwohl Volpich der Ansicht ist, dass der Zapfenkreisradius als Bezugsgrösse zur Charakterisierung besser geeignet ist als der Radius über die Schaufelspitzen, hat er dennoch letzteren gewählt, da das in England üblich sei.

Es ergeben sich bei der Anwendung der Versuchsdiagramme von Volpich zwei grundsätzliche Schwierigkeiten:

1. Volpich hat eine Auftragungsart verwendet, die zwar raumsparend, aber unübersichtlich ist.
2. sind die von Volpich gewählten Koeffizienten nicht dimensionslos, so dass also das englische Masssystem bei der Umrechnung berücksichtigt werden muss.

Die Auftragungsart von Krappinger berücksichtigte zum ersten Male bei Schaufelrädern das Froudesche Ähnlichkeitsgesetz. Das hat sich nicht nur als brauchbar erwiesen, es ist auch notwendig, da das Schaufelrad an der Wasseroberfläche arbeitet und infolgedessen Wellen erzeugt. Zudem sind die Koeffizienten von Krappinger echt dimensionslos.

Er setzt:

für die Eintrittsgeschwindigkeit	$\widetilde{f}_R = \frac{v_e}{\sqrt{g \cdot R_2}}$
für den Schub	$\eta_s = \frac{S}{\rho \cdot R_2^3}$
für das Moment	$\eta_M = \frac{M}{\rho \cdot R_2^4}$
für die Drehzahl	$\eta_n = n \sqrt{\frac{R_2}{g}}$

Volpich hat folgende Koeffizienten definiert

Geschwindigkeit zu	$\frac{V_a}{\sqrt{D}}$
Schub T zu	$\frac{T}{\rho \cdot D^3}$
Leistung DHP zu	$\frac{100 \text{ DHP}}{\rho \sqrt{D^3}}$

(wobei DHP „delivered Horsepower“ bedeutet)

Drehzahl N zu	$N \cdot \sqrt{D}$
---------------	--------------------

Die Dimensionen sind

Länge D	in	[ft]
Geschwindigkeit V_a	in	[kn]
Schub T	in	[lb]
Leistung HP	in	[HP]
Drehzahl N	in	$\left[\frac{1}{\text{min}}\right]$
Dichte ρ	in	$\left[\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3 \cdot \text{sec}^2}\right]$

Die Umrechnung in Krappingers Koeffizienten ergab

$$\frac{V_a}{\sqrt{D}} = 2,157 \frac{v_a}{\sqrt{g \cdot R_z}} = 2,157 \cdot F_R \quad \text{Froudesche Zahl}$$

$$\frac{T}{\rho \cdot D^3} = 2,272 \cdot \frac{S}{\delta \cdot R_z^3} = 2,272 \cdot r_s \quad \text{Schubkennzahl}$$

$$\frac{100 \text{ DHP}}{\rho \cdot \sqrt{D^3}} = 113,0 \frac{N}{\delta \sqrt{g \cdot R_z^3}} = 113,0 \cdot r_N \quad \text{Leistungskennzahl}$$

$$N \cdot \sqrt{D} = 529,6 \cdot n \cdot \sqrt{\frac{R_z}{g}} = 529,6 \cdot r_n \quad \text{Drehzahlkennzahl}$$

wobei	Länge	R_z	in	[m]
Eintritts - Geschwindig-	keiten	v_e	in	[m/sec]
	Schub	S	in	[kg]
	Leistung	N	in	[PS]
	Drehzahl	n	in	[1/sec]
	Erdbeschleunigung	g	in	[m/sec ²]
	spez. Gewicht des Wassers	γ	in	[kg/m ³]

einzusetzen ist

Aus den oben angegebenen grundsätzlichen Schwierigkeiten war es also nicht einfach möglich, durch Umrechnung der Abszissen- Ordinaten- und der Parameterwerte zu brauchbaren Diagrammen zu kommen.

Volpich hat nämlich auf der Abszisse $\frac{v_e}{\sqrt{D}}$, auf der Ordinate $N \sqrt{D}$ aufgetragen und als Parameter $\frac{T}{\gamma \cdot D^3}$ bzw. $\frac{100 \text{ DHP}}{\gamma \cdot D^3}$

genommen, während es erforderlich ist, für die bessere und übersichtlichere Diagrammform von Krappinger auf der Abszisse

$r_R = \frac{v_e}{\sqrt{g \cdot R_z}}$, auf der Ordinate $\frac{S}{\gamma \cdot R_z^3} = r_s$ bzw. $r_N = \frac{N}{\gamma \sqrt{g \cdot R_z^3}}$

und als Parameter $r_n = n \frac{\sqrt{R_z}}{g}$ zu wählen.

Bei Volpich liegen die Kurven in einem relativ dichten Streifen auf einer Diagonalen der Diagrammfläche. Das Blatt ist also nicht ausgenutzt, worunter die Übersichtlichkeit und die Möglichkeit zur genauen Ablesbarkeit leidet. Dagegen sind diese Mängel bei der Darstellungsart nach Krappinger nicht vorhanden. Die Kurven haben den großen Vorteil, daß sie über die ganze Blattfläche verteilt sind. Außerdem hat Volpich Schub- und Leistungskennzahlen in einem Blatt für jedes Rad aufgetragen.

In den hiermit vorgelegten Diagrammen sind die Ergebnisse für jeden Untersuchungsfall auf je zwei Blättern dargestellt, jeweils mit r_s bzw. mit r_N als Ordinate.

Wie auch schon bei Krappinger und Volpich angewendet, wurden Kurven konstanten Wirkungsgrades eingefügt und nicht wie bei Gebers für jede Drehzahl der Verlauf des Wirkungsgrades über der Geschwindigkeit.

In den angeführten Kennzahlen für v_e , S , N , und n ist immer der Zapfenkreisradius R_z enthalten. Eliminiert man diesen, so erhält man

$$\begin{aligned} \text{aus } \mathcal{F}_R &= \frac{v_e}{\sqrt{g \cdot R_z}} & \text{und} & & r_s &= \frac{S}{\delta \cdot R_z^3} \\ R_z &= \frac{v_e^2}{g \cdot \mathcal{F}_R^2} & \text{und} & & R_z &= \sqrt[3]{\frac{S}{\delta \cdot r_s}} \end{aligned}$$

Gleichsetzen und Umformen ergibt

$$\frac{\sqrt[3]{r_s}}{\mathcal{F}_R^2} = \frac{g \cdot \sqrt[3]{S/\delta}}{v_e^2} = r_{sv}$$

und aus

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_R &= \frac{v_e}{\sqrt{g \cdot R_z}} & \text{und} & & r_N &= \frac{N}{\delta \cdot \sqrt{g \cdot R_z^3}} \\ R_z &= \frac{v_e^2}{g \cdot \mathcal{F}_R^2} & \text{und} & & R_z &= \sqrt[3]{\frac{N^2}{\delta^2 \cdot g \cdot r_N^2}} \end{aligned}$$

Gleichsetzen und Umformen ergibt dann

$$\frac{r_N}{\mathcal{F}_R^2} = \frac{N \cdot g^3}{\delta \cdot v_e^7}$$

Um auf ähnliche Form wie für r_{sv} zu kommen, wird gesetzt

$$\frac{\sqrt[3]{r_N}}{\mathcal{F}_R^2} = \frac{g \cdot \sqrt[3]{N/\delta}}{\sqrt[3]{v_e^7}} = r_{Nv}$$

Das ergibt in jedem Blatt eine Schar von Parabeln. Wie in den folgenden Rechenanleitungen noch gezeigt werden wird, dienen diese r_{Sv} - und r_{Nv} -Kurven zur Bestimmung eines optimalen Durchmessers.

Damit sind die Schleppversuche zu wirklich brauchbaren Unterlagen für den Entwurf eines Schäfelrades geworden.

Bei allen Blättern konnten die Kurven relativ sicher und eindeutig umgezeichnet werden. Lediglich das r_s -Blatt des Rades **(K)** bildet eine Ausnahme. Die im oberen Teil gestrichelten Kurvenzüge sind unbestimmt. Sie wurden lediglich der Vollständigkeit wegen aufgenommen.

Für die umgezeichneten Diagramme wurden selbstverständlich Fehlerrechnungen angestellt (ein Beispiel für Fehlerrechnung ist in Tabelle 1 beigelegt). Dies ist durchaus möglich, wenn man für jedes Rad das r_s - und r_N -Blatt zuhilfe nimmt. Es besteht doch grundsätzlich die Beziehung

$$N = \frac{S \cdot v_e}{75 \cdot \eta}$$

Mit

$$S = r_s \cdot \delta \cdot R_z^3$$

$$v_e = F_R \sqrt{g \cdot R_z}$$

$$N = r_N \cdot \delta \sqrt{g \cdot R_z^3}$$

erhält man

$$r_N = \frac{r_s \cdot F_R}{75 \cdot \eta}$$

Man wählt einen beliebigen Punkt im r_s -Diagramm und liest dafür r_N , F_R , r_s und η ab. Daraus errechnet man r_N (Spalte 5 Tab.1).

Mit dem r_N - und F_R -Wert geht man nun in das r_N -Diagramm und liest r_N und η ab. Daraus läßt sich Δr_N und η bestimmen (Spalte 7 u.8).

Man kann auch aus der Definition von r_{sv}

$$r_{sv} = \frac{3 \sqrt[3]{r_s}}{F_R^2}$$

r_s bestimmen, indem man für den angenommenen Punkt r_{sv} abliest und ausrechnet $r_s = (r_{sv} \cdot F_R^2)^3$ und mit dem ursprünglich abgelesenen r_s vergleicht (Spalte 11).

Ähnlich verfährt man mit r_{Hv} :

Nach Definition ist

$$r_H = r_{Hv}^3 \cdot F_R^7$$

Dieser errechnete Wert wird mit dem zu F_R und r_H abgelesenen Wert verglichen. (Spalte 14).

Diese Rechnungen, stichprobenartig für alle Blätter durchgeführt, ergaben Fehler, die im allgemeinen ca. 5% Genauigkeit ergaben. Naturgemäß läßt sich keine Fehlertendenz angeben, d.h. die errechneten Werte liegen teils höher, teils niedriger als die abgelesenen.

Zum Vergleich wurde auf ähnliche Weise die Genauigkeit der englischen Originaldiagramme untersucht. Dabei ergaben sich Ungenauigkeiten, die auch in der Größenordnung von 5% liegen. Damit ist also erwiesen, daß die Genauigkeit durch das Umzeichnen - welches natürlich mit der denkbar größten Sorgfalt durchgeführt worden ist - nicht gelitten hat.

Die Auswertungen der Versuchsergebnisse, die Volpich in seiner Arbeit angestellt hat, sind unbefriedigend, weil es die verschiedenen Einflüsse nicht trennt. Volpich betrachtet lediglich für einige Geschwindigkeiten und einige Schub- bzw. Leistungswerte den Verlauf der maximalen Wirkungsgrade und knüpft daran seine Betrachtungen an.

Im folgenden soll in dieser Arbeit ein anderer Weg beschritten werden, der bei der Auswertung verschiedener Einflüsse ausschließlich das vorhandene Material auswertet und auf alle Mutmaßungen verzichtet. Dieses hat auch den Vorteil, daß man mit den Ergebnissen dieser Auswertungen dem praktischen Konstrukteur tatsächlich brauchbare Entwurfsunterlagen in die Hand gibt.

Da es nicht möglich ist, Schaufelräder so zu berechnen, ist man in stärkerer Masse als bei jedem anderen Propulsionsmittel auf sehr umfangreiche und ausführliche Modellversuche angewiesen. Wenn auch Herrn im Anhang zu /2/ ein Annäherungsverfahren aus den Gebers'schen Modellversuchen abgeleitet hat, und wenn auch das Verfahren zu brauchbaren Übereinstimmungen kommt, so liegen große Gefahren darin, aus relativ wenigen Versuchsergebnissen eine allgemein gültige und rein analytische Berechnungsmethode abzuleiten. Da es aber sehr schwierig sein wird, alle vorkommenden Parameter (Tauchung, Exzenterlage, Schaufelzahl, Schaufelgröße und -Form z.B.) in eine mathematische Form zu bringen, zumal man deren Einflüsse noch nicht auch nur annähernd übersehen kann, beschränken wir uns bei der Auswertung der vorliegenden Modellversuche nicht auf vage Annäherungsverfahren, sondern auf die tatsächlichen Zusammenhänge, wie sie sich unmittelbar aus den ^{Versuchs-}Ergebnissen herleiten lassen.

Die 19 verschiedenen Versuchsvariationen sind in Tabelle 2 dargestellt. Tabelle 3 ordnet die verschiedenen Versuchsvariationen. Aus dieser Zusammenstellung erkennt man den Umfang der Systematik.

Um dem Konstrukteur aus der Fülle des dargebotenen Materials eine Übersicht zu ermöglichen und um einige Zusammenhänge aufzuzeigen, wurden die fünf wichtigsten Versuchskombinationen untersucht und verglichen:

1. Tauchungsverhältnisse	(A - B - C - D)
2. Exzenterlagen	(G - H - I - J)
3. Exzenterlagen	(K - L - M - N)
4. Schaufelanzahl	(P - Q - R)
5. Schaufelanzahl	(S - T - U)

Zu 1. In Bild 1 sind die Schnitte angegeben, die in die Blätter A, B, C und D gelegt und entlang derer die Wirkungsgrade zu den zugeordneten P_R -Zahlen abgelesen wurden. Das Ergebnis sind die Kurven. Man erkennt sofort eine Tendenz: Bei hoher Geschwindigkeit

und niedrigem Schub ist die optimale Tauchung klein (A), bei kleiner Geschwindigkeit ist die optimale Tauchung groß (D).

Da diese eindeutige Tendenz vorliegt, ist es sinnvoll, die jeweils 4 Wirkungsgradkurven durch eine Hüllkurve zu verbinden. Das ist also die Kurve, an die alle Wirkungsgradkurven der nur verschieden getauchten Räder tangieren. Zwischen den vier geschleppten Tauchungen lassen sich also alle beliebigen anderen Tauchungsverhältnisse ablesen. Diese η -Hüllkurven sind in Bild 6 im r_s - F_R -Diagramm eingetragen. Die schraffierten Bereiche geben die jeweils optimale Tauchung für die 4 geschleppten Tauchungsverhältnisse 0.365; 0.487; 0.609; 0.731 entsprechend der Blätter A, B, C und D an. Dazwischen kann man nun interpolieren. Allerdings betragen die Unterschiede im Wirkungsgrad höchstens 2 Prozent, wenn man bei einer zwischenliegenden Tauchung nicht auf der Hüllkurve, sondern auf der Wirkungsgradkurve einer der benachbarten Tauchungen direkt abliest.

Zu 2, 3, 4 und 5. In Bild 2 bis 5 ist derselbe Weg beschritten worden wie in Bild 1. Jedoch hat sich nicht derselbe Erfolg gezeigt. Es läßt sich keine Tendenz erkennen. Es ist also sinnlos, eine Hüllkurve zu ziehen, da der gegenseitige Verlauf der Kurven so unregelmäßig ist, daß man keine Interpolationsmöglichkeit hat. In Bild 7 - 10 sind daher lediglich die Grenzkurven eingezeichnet, d.h. die Linien gleicher Wirkungsgrade zwischen zwei benachbarten Modellvariationen. Diese Blätter dienen also lediglich zur Orientierung in den geschleppten Werten der Exzenterlagen und der Schaufelanzahl. Anhand dieser Blätter läßt sich also bestimmen, für welche Bereiche von Schub und Geschwindigkeit welche Exzenterlage und welche Schaufelanzahl die optimale wäre. Eine physikalische Erklärung für die eigenartige Verteilung der Exzenterverhältnisse und der Schaufelanzahl zu finden, ist sehr schwierig. Es muß noch darauf aufmerksam gemacht werden, daß in Bild 7 und Bild 8 keine Bereiche für © bzw. K erscheinen, da diese beiden Räder © mit festen

Schaufeln und (K) einer reinen Aufwärtslage des Exzentrers) über den ganzen erfassten Bereich schlechter sind als die vergleichbaren der gleichen Serie.

Natürlich behandeln die dargestellten Orientierungsblätter nur die vergleichbaren Schleppergebnisse.

So gibt Bild 6 den Bereich der optimalen Tauchungen nur für eine Exzenterlage ($0,0745$ ü. und $0,1340$ v. Mitte Welle) und nur für Räder mit 9 Schaufeln an. Wie sich andere Exzenterlagen und andere Schaufelzahlen verhalten bei Änderungen der Tauchungsverhältnisse, kann aus dem vorliegenden Material nicht abgelesen werden, denn die optimale Exzenterlage Bild 7 und Bild 8 gilt auch nur für ein Tauchungsverhältnis von $0,487$ und nur für Räder mit 9 Schaufeln. Allerdings gilt die optimale Schaufelzahl (Bild 9 und Bild 10) für das Tauchungsverhältnis $0,487$ bzw. $0,609$, aber nur für eine Exzenterlage $0,0745$ ü. und $0,134$ v. Mitte Welle.

Schrifttum

- /1/ Volpich, H. u. I.C. Bridge: Paddle Wheels, Part I:
Preliminary Model Experiments, Trans.
Inst. E.S.S., S. 327
Part III: Systematic Model Experiments,
Trans. Inst. E.S.S. 1956, S. 468
Part IIa: Further Model Experiments,
and Ship Model Correlation, Trans. Inst.
E.S.S. 1957, S. 505
- /2/ Gebers, F.: Das Schaufelrad im Modellversuch
mit einem Beitrag von F. Horn, Wien 1952

Tabelle 1

Beispiel für Fehlerrechnung.

	① r_n	② F_R	③ r_s	④ η	⑤ $r_n = \frac{F_R \cdot r_s}{\eta}$	⑥ r_N	⑦ η	⑧ $\Delta r_N \%$	⑨ r_{SV}	⑩ $r_s = (r_{SV} \cdot \eta)^3$	⑪ $\Delta r_s \%$	⑫ r_{NV}	⑬ $r_N = (r_{NV} \cdot F_R)^3$	⑭ $\Delta r_N \%$
Ⓐ	0,275 0,250 0,350	1,57 0,997 1,65	0,188 0,337 0,475	0,85 0,60 0,70	0,00464 0,00746 0,01491	0,00440 0,00730 0,01520	0,85 0,60 0,70	-5,5 -2,2 +1,9	0,23 0,70 0,285	0,181 0,331 0,484	+3,7 +1,8 -1,9	0,057 0,195 0,077	0,00435 0,00715 0,01510	+1,1 +4,2 +0,7
Ⓑ	0,300 0,250 0,275	1,260 1,110 1,535	0,636 0,447 0,280	0,60 0,65 0,80	0,01782 0,01018 0,00717	0,01685 0,01050 0,00699	0,60 0,65 0,80	-6,1 +3,1 -2,6	0,54 0,63 0,28	0,634 0,469 0,287	+0,3 -4,9 -2,5	0,152 0,175 0,070	0,01766 0,01412 0,00687	-4,8 -5,9 +1,7
Ⓒ	0,150 0,250 0,300	1,180 0,760 1,805	0,186 0,532 0,211	0,70 0,70 0,60	0,00269 0,01196 0,00848	0,00152 0,01460 0,00870	0,70 0,70 0,60	-6,7 -3,1 +2,5	1,000 0,585 0,185	0,193 0,544 0,219	-3,6 -1,6 -3,6	0,26 0,155 0,051	0,00257 0,01190 0,00826	-2,8 -2,6 +5,1
Ⓓ	0,100 0,150 0,200	0,280 0,383 1,050	0,345 0,696 0,282	0,45 0,35 0,60	0,00292 0,01009 0,00658	0,00305 0,01020 0,00670	0,45 0,35 0,60	+4,3 +1,1 +1,8	9,00 6,00 0,60	0,352 0,681 0,289	-2,0 +2,2 -2,5	2,8 1,95 0,17	0,00308 0,00967 0,00689	-1,0 +4,0 -2,8
Ⓔ	0,150 0,225 0,275	0,455 1,000 1,240	0,424 0,448 0,565	0,35 0,55 0,50	0,00737 0,01088 0,01868	0,00720 0,01080 0,01840	0,35 0,55 0,50	-2,4 -0,7 -1,5	3,70 0,76 0,53	0,449 0,439 0,542	-6,9 +2,0 +4,1	1,19 0,225 0,163	0,00680 0,01139 0,01954	+6,5 -5,5 -6,2
Ⓕ	0,150 0,175 0,325	0,745 0,455 1,765	0,190 0,559 0,594	0,70 0,35 0,70	0,00270 0,00969 0,01987	0,00270 0,00945 0,02015	0,70 0,35 0,70	0,0 -2,5 +1,4	1,02 4,00 0,272	0,181 0,568 0,608	+4,7 -1,6 -2,9	0,280 1,35 0,073	0,00279 0,00993 0,02076	-3,3 -5,1 -3,0
Ⓖ	0,200 0,225 0,300	1,075 0,895 1,020	0,251 0,417 0,436	0,65 0,50 0,35	0,00553 0,00995 0,01694	0,00545 0,01000 0,01725	0,65 0,50 0,35	-4,5 +0,5 +1,8	0,54 0,92 0,72	0,243 0,400 0,420	+3,2 +4,1 -3,7	0,150 0,285 0,248	0,00560 0,01065 0,01683	-2,8 -6,5 +2,4
Ⓜ	0,250 0,300 0,350	1,070 1,035 2,025	0,426 0,646 0,177	0,70 0,55 0,75	0,00868 0,01621 0,00637	0,00840 0,01615 0,00610	0,70 0,55 0,75	-3,3 -0,4 -4,4	0,650 0,795 0,137	0,412 0,618 0,177	+3,4 +4,5 0,0	0,173 0,230 0,035	0,00832 0,01548 0,00598	+1,0 +4,1 +1,9
Ⓡ	0,125 0,200 0,300	0,420 1,055 1,860	0,382 0,267 0,170	0,50 0,70 0,50	0,00428 0,00516 0,00843	0,00410 0,00515 0,00810	0,50 0,70 0,50	-4,4 -0,2 -4,1	4,05 0,58 0,16	0,364 0,270 0,170	+4,7 -1,1 0,0	1,20 0,151 0,047	0,00398 0,00500 0,00800	+2,9 +2,9 +1,2
Ⓝ	0,125 0,250 0,300	0,530 0,755 1,655	0,137 0,490 0,292	0,70 0,45 0,85	0,00138 0,01096 0,00758	0,00140 0,01060 0,00735	0,70 0,45 0,85	+1,4 -3,4 -3,1	1,80 1,43 0,243	0,129 0,544 0,295	+5,8 -10,4 -1,0	0,497 0,425 0,060	0,00144 0,01073 0,00734	-2,9 -1,2 +1,4

D I P L O M A R B E I T .

A U S W E R T U N G V O N
S C H A U F E L R A D - M O D E L L V E R S U C H E N .

- Teil I Schaffung von Berechnungsunterlagen für
 Schaufelräder.
- Teil II Berechnung von Schaufelrädern auf Grund syste-
 matischer Modellversuche.
- Teil III Untersuchung verschiedener Einflüsse auf die
 Arbeitsweise eines Schaufelrades.

- M A N F R E D M Ü L L E R -

Angefertigt in der Zeit vom 17. 12. 1958 bis 16. 3. 1959
am Lehrstuhl für Entwerfen von Schiffen im Institut für
Schiffbau der Universität HAMBURG (Prof. Dr.-Ing. K. Wendel).

Verzeichnis der Bilder und Tabellen.

TEIL I

Bild 1 η über F_R für A-B-C-D.

Bild 2 η über F_R für G-H-I-J.

Bild 3 η über F_R für K-L-B-M.

Bild 4 η über F_R für N-B-P.

Bild 5 η über F_R für Q-C-R.

Tab. 1 Fehlerrechnung.

TEIL II

Bild 1 Schaufelradmodell von Volpich.

Bild 2 η im r_S - F_R -Diagramm für A-B-C-D.

Bild 3 η im r_S - F_R -Diagramm für G-H-I-J.

Bild 4 η im r_S - F_R -Diagramm für K-L-B-M.

Bild 5 η im r_S - F_R -Diagramm für N-B-P.

Bild 6 η im r_S - F_R -Diagramm für Q-C-R.

} Orientierungsblätter

Tab. I Übersicht über die Arbeitsdiagramme

Tab. II Die Versuchsvariationen.

TEIL III

Bild 1 r_n für A-B-C-D im r_S - F_R -Diagramm.

Bild 2 r_n für A-B-C-D im G^J - F_T -Diagramm.

Bild 3 r_n für A-B-C-D im t_S - F_T -Diagramm.

Bild 4 F_n für A-B-C-D im t_S - F_T -Diagramm.

Bild 5 F_n für A-B-C-D im η - F_T -Diagramm.

Bild 6 F_n für G-H-I-J im t_S - F_T -Diagramm.

Bild 7 F_n für G-H-I-J im η - F_T -Diagramm.

Bild 8 F_n für K-L-B-M im t_S - F_T -Diagramm.

Bild 9 F_n für K-L-B-M im η - F_T -Diagramm.

Bild 10 F_n für N-B-P im t_S - F_T -Diagramm.

Bild 11 F_n für N-B-P im η - F_T -Diagramm.

Bild 12 F_n für Q-C-R im t_S - F_T -Diagramm.

Bild 13 F_n für Q-C-R im η - F_T -Diagramm.

Bild 14 Zur Geometrie des Schaufelrades.

Bild 15 β über φ für G-H-I-J.

Bild 16 Zur Geometrie der Aufwärtslage des Exzentrers. (Im Text).

- Bild 17 β über φ für K-L-B-M.
- Bild 18 Zur Geometrie der Tauchungspunkte. (Im Text).
- Bild 19 Diagramm zur Bestimmung der Tauchpunkte für A-B-C-D.
- Bild 20 Diagramm zur Bestimmung der Tauchpunkte für G-H-I-J.
- Bild 21 Diagramm zur Bestimmung der Tauchpunkte für K-L-M.
- Bild 22 Geometrische Konstruktion zur Kinematik für (A).
- Bild 23 Geometrische Konstruktion zur Kinematik für (B).
- Bild 24 Geometrische Konstruktion zur Kinematik für (C).
- Bild 25 Geometrische Konstruktion zur Kinematik für (D).
- Bild 26 Geometrische Konstruktion zur Kinematik für (G).
- Bild 27 Geometrische Konstruktion zur Kinematik für (H).
- Bild 28 Geometrische Konstruktion zur Kinematik für (I).
- Bild 29 Geometrische Konstruktion zur Kinematik für (J).
- Bild 30 Geometrische Konstruktion zur Kinematik für (K).
- Bild 31 Geometrische Konstruktion zur Kinematik für (L).
- Bild 32 Geometrische Konstruktion zur Kinematik für (M).
- Bild 33 α_λ über λ für A-B-C-D.
- Bild 34 α_λ über λ für G-H-I-J.
- Bild 35 α_λ über λ für K-L-B-M.
- Bild 36 η über G für $F_T = 0,75$.
- Bild 37 η über G für $F_T = 1,25$.
- Bild 38 η über G für $F_T = 1,75$.
- Bild 39 η über G für $F_T = 2,25$.
- Bild 40 η über F_T für $G = 0,25$.
- Bild 41 η über F_T für $G = 0,50$.
- Bild 42 η über F_T für $G = 1,50$.
- Bild 43 η über F_T für $G = 3,50$.
- Bild 44 η_λ über G .
- Bild 45 $\Sigma|\alpha_\lambda|$ über η für $F_T = 0,75$.
- Bild 46 $\Sigma|\alpha_\lambda|$ über η für $F_T = 1,25$.
- Bild 47 $\Sigma|\alpha_\lambda|$ über η für $F_T = 1,75$.
- Bild 48 $\Sigma|\alpha_\lambda|$ über η für $F_T = 2,25$.
- Tab. 1 Rechnung β für (H) und (K).
- Tab. 2 Rechnung β für (I).
- Tab. 3 Rechnung β für (J).
- Tab. 4 Rechnung β für (A).
- Tab. 5 Rechnung β für (L).
- Tab. 6 Rechnung β für (M).

- Tab. 7 Rechnung Ein- und Austritt für A-B-C-D .
- Tab. 8 Rechnung Ein- und Austritt für \textcircled{G} .
- Tab. 9 Rechnung für Ein- und Austritt für \textcircled{H} und \textcircled{I} .
- Tab. 10 Rechnung Ein- und Austritt für \textcircled{J} und \textcircled{K} .
- Tab. 11 Rechnung Ein- und Austritt für \textcircled{L} und \textcircled{M} .
- Tab. 12 Rechnung für λ aus G , F_T und r_n für A-B-C-D .
- Tab. 13 Rechnung für λ aus G , F_T und r_n für G-H-I-J und K-L-M .
- Tab. 14 Zusammenstellung α_λ und η für A-B-C-D .
- Tab. 15 Zusammenstellung α_λ und η für G-H-I-J .
- Tab. 16 Zusammenstellung α_λ und η für K-L-M .
- Tab. 17 Zusammenstellung $\Sigma|\alpha_\lambda|$ über η .

Im Anschluß an TEIL II sind die Arbeitsdiagramme für die Schaufelradberechnung, die in diesem Verzeichnis nicht aufgeführt sind, eingeheftet.

TEIL I

Schaffung von Berechnungsunterlagen für
Schaufelräder nach Modellversuchen

TEIL II

Berechnung von Schaufelrädern auf Grund systematischer
Modellversuche.

Arbeitsanleitung

Die von Volpich und Bridge *) mit Schaufelradmodellen von 1040 mm über die Schaufeln gemessenen Durchmesser erzielten Ergebnisse sind in den beigegeführten Diagrammen aufgetragen.

Für die dem Modellrad geometrisch ähnlichen Räder in Großausführung lassen sich mit den Koeffizienten aus den Diagrammen alle für den Schaufelradentwurf notwendigen Werte ermitteln.

Die geometrischen Verhältnisse des Modellrades sind, auf den Zapfenkreisradius R_z bezogen (Bild 1):

Radius über die Schaufelspitze	$R_a = 1,212$
Zapfenkreisradius	$R_z = 1,000$
Exzenterkreisradius	$R_e = R_z$
Schaufelhöhe	$h = 0,478$
innerhalb Zapfen	$h_i = 0,266$
außerhalb Zapfen	$h_a = 0,212$
Schaufelstuhllänge	$l = 0,258$
Tauchung (U.K. Schaufel bis W.L.)	$T = 0,365; 0,487; 0,609$ u. $0,731$
Exzenterlage u. Mitte Welle	$e_u = 0,0$ und $0,0745$
vor Mitte Welle	$e_v = 0,0; 0,0745; 0,134$ u. $0,1865$
Schaufellänge	$b = 1,79$ und $1,34$
Schaufelzahl	$z = 6; 9$ und 11
Schaufelform	flach und gekrümmt
Krümmungsradius	$r = 0,714$

Die Schaufelachsen sind um etwa 15° aus der Senkrechten gegen den Schaufelstuhl geneigt, gemessen an der Innenhälfte der Schaufeln.

Wie aus Tabelle I ersichtlich, sind neunzehn verschiedene

*) Volpich und Bridges: Paddle Wheels Part I - III
Transactions of the Institution of Engineers and Shipbuilders
in Scotland 1955, 56 und 57

Versuchsvariationen (bezeichnet von A bis T geschleppt worden. Tabelle II gibt eine Übersicht über die Zuordnung der zusammengehörenden Variationen.

Zu jeder Versuchsvariation gehören zwei Blätter, je ein r_S - F_R - und ein r_N - F_R -Diagramm mit jeweils r_N , η , r_{SV} bzw. r_{HV} als Parameter. Diese sind echt dimensionslose Größen, die von Krappinger in "Schaufelradberechnung" (Forschungshefte für Schiffstechnik Heft 6, 1954) vorgeschlagen worden sind und sich als die brauchbarsten aller bisher angewendeten Koeffizienten erwiesen haben.

Darin bedeutet Froudesche Zahl $F_R = \frac{v_e}{\sqrt{g \cdot R_z}}$

Schubkoeffizient $r_s = \frac{S}{\delta \cdot R_z^2}$

Leistungskoeffizient $r_N = \frac{N}{\delta \cdot \sqrt{g \cdot R_z^3}}$

Drehzahlkoeffizient $r_n = n \cdot \sqrt{\frac{R_z}{g}}$

Wirkungsgrad $\eta = \frac{S \cdot v_e}{75 \cdot N}$

wobei

Zapfenkreisradius	R_z in [m]
Eintrittsgeschwindigkeit	v_e in [m/sec]
Schub	S in [kg]
Leistung	N in [PS]
Drehzahl	n in [1/sec]
spez. Gewicht des Wassers	δ in [kg/m ³]
Erdbeschleunigung	g in [m/sec ²]

einzusetzen ist.

Für einige Entwurfsrechnungen - wie noch gezeigt werden wird - ist notwendig, einen Parameter in den Diagrammen zu haben, der frei ist vom Raddurchmesser R_z . Als solche Parameter sind die r_{SV} - und r_{HV} -Kurvenscharen zu betrachten.

Diese Kurven sind folgendermaßen entstanden:

Aus

$$F_R = \frac{v_e}{\sqrt{g \cdot R_z}} \quad \text{und} \quad r_S = \frac{S}{\delta \cdot R_z^3}$$

folgt

$$R_z = \frac{v_e^2}{g \cdot F_R^2} \quad \text{und} \quad R_z = \sqrt[3]{\frac{S}{\delta \cdot r_S}} .$$

Gleichsetzen und Umformen ergibt

$$\frac{\sqrt[3]{r_S}}{F_R^2} = \frac{g \sqrt[3]{S/\delta}}{v_e^2} = r_{Sv} .$$

Und aus

$$F_R = \frac{v_e}{\sqrt{g \cdot R_z}} \quad \text{und} \quad r_N = \frac{N}{\delta \cdot \sqrt{g \cdot R_z^3}}$$

folgt

$$R_z = \frac{v_e^2}{g \cdot F_R^2} \quad \text{und} \quad R_z = \sqrt[3]{\frac{N^2}{\delta^2 \cdot g \cdot r_N^2}} .$$

Gleichsetzen und Umformen ergibt dann

$$\frac{r_N}{F_R^2} = \frac{N \cdot g^3}{\delta \cdot v_e^7} .$$

Um auf ähnliche Form wie für r_{sv} zu kommen, wird durch Umformen

$$r_{Nv} = \frac{\sqrt[3]{r_N}}{F_R^2} = \frac{g^3 \sqrt[3]{N/\delta}}{\sqrt[3]{v_e^7}} .$$

Die Diagramme enthalten folgende Bereiche der Koeffizienten:

Auf der Abszisse F_R von 0 bis 2,5

Auf der Ordinate r_s von 0 bis 0,7

bzw. r_N von 0 bis 0,022

Als Parameter r_N von 0,10 bis 0,375 in Abständen von 0,025

η von 0,30 bis Maximum in Abständen von 0,05

r_{sv} von 0,10 bis 10,0 und

r_{Nv} von 0,02 bis 2,0

Es wurden für alle Diagramme stichprobenartige Fehlerrechnungen gemacht. Es ist ja unvermeidlich, daß jedem Experiment Ungenauigkeiten anhaften. Nun ist die Ablesegenauigkeit der Diagramme auch beschränkt. Außerdem sind die hier vorgelegten Entwurfsdiagramme aus den englischen Originalblättern umgezeichnet, wodurch eine weitere Fehlermöglichkeit besteht. Ganz allgemein hat man bei den Schaufelradmodellversuchen auch Maßstabsfehler festgestellt, die nicht dem Froudeschen Ähnlichkeitsgesetz folgen, und die sehr schwer zu erklären sind, da zu viele Einflüsse wirksam sind.

Bei der Fehleruntersuchung wurde im allgemeinen eine Ungenauigkeit von ca. 5% festgestellt. Es ist sehr zu empfehlen, nach jedem Entwurf aus den Diagrammen eine Genauigkeitsuntersuchung anzustellen, um sich Klarheit über die Zuverlässigkeit der Diagrammwerte zu verschaffen.

Nach der Formel $\eta = \frac{S}{75} \cdot \frac{V_0}{V}$ ist dieses sehr schnell möglich.

Den Diagrammen vorangestellt sind fünf Orientierungsblätter Bild 2 bis Bild 5. Diese Orientierungsblätter geben die Bereiche der optimalen Tauchungsverhältnisse, der optimalen Exzenterlagen und der optimalen Schaufelsahlen an. Im Bild 2 (optimale Tauchungsverhältnisse) kann man interpolieren, d.h. für eine zwischen zwei eingezeichneten Tauchungstreifen liegende Eintauchung kann man optimale Wirkungsgrade ablesen. Für die anderen Blätter trifft dies nicht zu. Da sind nur die Grenskurven eingezeichnet. Nach Bild 5 und Bild 6 ist es nicht möglich anzugeben, wo etwa Räder mit 7, 8 und 10 Schaufeln liegen. Das ist ein Nachteil. Da man aber aus den Blättern keine Gesetzmäßigkeit ablesen kann, ist man dabei also auf Schaufelradversuche angewiesen, die aber nicht bekannt sind. Für die Exzenterlage gilt Entsprechendes. Aber dem Konstrukteur bieten diese Blätter immerhin die Möglichkeit aus der Fülle der Diagramme schnell auf das Diagramm zu kommen, das für das projektierte Rad optimale Wirkungsgrade enthält.

Mitstrom und Sog: Wie bei Propellerrechnung muß beim Zusammenwirken von Schiff und Schaufelrad auch Sog und Mitstrom berücksichtigt werden.

Die Sogsiffer ist definiert als

$$\vartheta = \frac{S - W}{S} \quad \text{und}$$

die Mitstromsiffer

$$\psi = \frac{v - v_e}{v}$$

Bei Seitenradschiffen ist die Mitstromsiffer immer negativ.

Ohne an dieser Stelle auf die spärlichen Versuche über das Maß von Sog- und Mitstromsiffer einzugehen, werden hier die Angaben übernommen, die Krappinger im "Handbuch der Werften 1956" dazu gemacht hat.

Ohne Berücksichtigung der Wassertiefe wird hier mit $\psi = -0,06$ gerechnet

Für die Sogsiffer kann gesetzt werden:

für Schlepper mit Anhang: $\vartheta = 0,02$ bis $0,06$
(unabhängig von der Wassertiefe; die größeren Werte gelten für größere Geschwindigkeiten)

für freifahrende Schiffe auf unbeschränkter Wassertiefe:

$$\vartheta = 0,1 \text{ bis } 0,3$$

für freifahrende Schiffe auf beschränkter Wassertiefe:

$$\vartheta = 0,1 \text{ bis } 0,2$$

(die größeren Werte gelten für die kleineren Geschwindigkeiten)

Für Heckradschiffe gibt es bisher gar keine experimentellen Angaben. Für beide Werte kann etwa $0,1$ bis $0,2$ gesetzt werden.

Für den Schaufelradentwurf sind sechs Werte

notwendig :

Schub	S
Leistung	N
Drehzahl	n
Eintritts-Geschwindigkeit	v_e
Wirkungsgrad	η
und Zapfenkreis - Radius	R_z

Wenn von diesen Werten 3 bekannt sind, können die anderen 3 aus den Diagrammen ermittelt werden.

Im folgenden werden verschiedene Kombinationen zusammengestellt mit kurzen Lösungsangaben. Einige dieser Aufgabenstellungen sollen an Beispielen numerisch durchgerechnet werden.

1. Gegeben: S, v_e , R_z ; Gesucht: N, n und η .
Lösung: direkt über F_R und r_n .
2. Gegeben: S, v_e , n; Gesucht: R_z , N und η .
Lösung: r_{sv} errechnen und damit η_{\max} schneiden.
Dazu F_R , r_s oder r_n ablesen und daraus R_z bestimmen.
3. Gegeben: N, v_e , R_z ; Gesucht: S, n, η .
Lösung: direkt über F_R und r_n .
4. Gegeben: N, v_e , n; Gesucht: R_z , S, η .
Lösung: r_{nv} rechnen und mit η_{\max} schneiden.
Aus F_R , r_n oder r_n R_z bestimmen.
5. Gegeben: N, S, v_e ; Gesucht: R_z , n und η .
Lösung: Mit r_{nv} oder r_{sv} η_{\max} schneiden und aus zugeordneten F_R oder r_n R_z bestimmen.
6. Gegeben: R_z , S, N; Gesucht: v_e , n und η .
Lösung: Mit r_s oder r_n η_{\max} schneiden und aus zugehörigem F_R und r_n v_e und n bestimmen.
7. Gegeben: n, v_e , η ; Gesucht: R, N und S.
Lösung: durch Elimination von R_z aus F_R und r_n erhält man

$$r_n = \frac{v_e \cdot n}{S \cdot F_R}.$$

Diese Hyperbel rechnet man aus und liest beim geforderten η ab. Aus den diesem Schnittpunkt zugeordneten Werten r_s , r_H und F_R kann man R_s , H und S bestimmen.

(Das Beispiel 7 soll nur zeigen, daß selbst bei sehr ungewöhnlicher Aufgabenstellung mit Hilfe der Diagramme eine eindeutige Lösungsmöglichkeit gefunden werden kann).

Diese Zusammenstellung ließe sich beliebig variieren. Doch enthält sie schon alle in der Praxis vorkommenden Aufgabenstellungen. Deshalb sollen jetzt einige Rechenbeispiele folgen.

1. Beispiel:

Ein Binnenschiff mit Seitenrädern habe bei 21 km/h (=5,83 m/sec) einen Widerstand von 4900 kg. Der größte mögliche Außendurchmesser betrage 4,7 m. Leistung, Drehzahl und Wirkungsgrad sollen berechnet werden.

Diesem Außendurchmesser entspricht ein Zapfenkreisradius

$$R_s = \frac{R_a}{1,212} = 1,94 \text{ m}.$$

Die Mitstromsiffer wird mit $\psi = -0,06$, die Sogziffer wird mit $\vartheta = 0,13$ angenommen.

$$v_e = (1 - \psi) \cdot v = [1 - (-0,06)] \cdot 5,83 = 6,18 \text{ m/sec}.$$

$$S_{ges} = \frac{W}{1 - \vartheta} = \frac{4900}{1 - 0,13} = 5630 \text{ kg}.$$

Für ein Rad ergibt sich ein Schub

$$S = 2815 \text{ kg}$$

Daraus ergibt sich

$$F_R = \frac{v_e}{\sqrt{g \cdot R_s}} = \frac{6,18}{\sqrt{9,81 \cdot 1,94}} = 1,41$$

und

$$r_s = \frac{S}{\delta \cdot R_s^3} = \frac{2815}{1000 \cdot 7,30} = 0,385.$$

In den Orientierungsdiagrammen findet man in Bild 2 die optimale Tauchung zwischen \textcircled{B} und \textcircled{C} , entsprechend 0,487 und 0,609 Tauchungsverhältnis. Da die optimale Exzenterlage nur für ein Tauchungsverhältnis von 0,487 angegeben werden konnte, wird dieses Tauchungsverhältnis beibehalten. Bild 3 gibt für diesen Punkt eine Exzenterlage von 0,0 über und 0,134 vor Mitte Welle an (entsprechend Diagrammblatt \textcircled{I}) mit einem Wirkungsgrad von $\eta = 75\%$. Aus Bild 4 liest man aber eine Exzenterlage von 0,0745 über und 0,1865 vor Mitte Welle ab (entsprechend Diagrammblatt \textcircled{M}) mit einem Wirkungsgrad von über 80%. Für die optimale Schaufelzahl wird Bild 5 herangezogen. Danach liegt das projizierte Rad in einem Bereich von 11 Schaufeln. Der Wirkungsgrad liegt dabei auch über 80%.

Da man nach den geforderten Werten vollkommen freisüßig ist in Bezug auf Exzenterlage, Tauchung und Schaufelzahl, kann man jetzt entweder nach Diagrammblatt \textcircled{M} (9 Schaufeln, Exzenterlage 0,075 u. und 0,1865 vor Mitte Welle) oder nach Diagrammblatt \textcircled{P} (11 Schaufeln, Exzenterlage 0,0745 u. und 0,134 vor Mitte Welle) rechnen.

Im folgenden wird beides gezeigt :

a) Blatt \textcircled{M} :

für $F_R = 1,41$ und $r_n = 0,385$

ergibt sich

$$r_n = 0,282 \quad \eta = 81\%$$

$$r_H = 0,0086$$

Danach errechnet sich
die Drehzahl n zu

$$n = r_n \cdot \sqrt{\frac{g}{R_z}} = 0,282 \cdot \sqrt{\frac{9,81}{1,94}} = 0,635 \text{ U/sec}$$

$$\underline{n = 38 \text{ U/min}}$$

Die Leistung N zu

$$r_N = \frac{N}{\gamma \sqrt{g \cdot R_z^3}} \quad N = r_N \cdot \gamma \cdot \sqrt{g \cdot R_z^3}$$

$$N = 0,0086 \cdot 1000 \sqrt{9,81 \cdot 103} = 274 \text{ PS}$$

Da zwei Räder vorhanden sind

$$\text{ist } N = \underline{548 \text{ PS}}$$

Zur Kontrolle wird gerechnet

$$N = \frac{S_{\text{ges}} \cdot v_e}{75 \cdot \eta} = \frac{5630 \cdot 6,18}{75 \cdot 0,81} = 573 \text{ PS}$$

Das ist eine Differenz von 4,6% gegenüber der aus r_N errechneten Leistung.

Zusammenfassend hat Diagramm M also ergeben:

$$\text{Drehzahl } n = 38 \text{ U/min}$$

$$\text{Wirkungsgrad} = 81\%$$

$$\text{und Leistung } N = 570 \text{ PS}$$

b) Diagrammblatt ② :

$$\text{Für } r_s = 0,385 \text{ und } F_R = 1,41$$

ergibt sich

$$r_n = 0,264 \quad \eta = 80\%$$

$$r_N = 0,0089$$

$$n = r_n \cdot \sqrt{\frac{g}{R_z}} = 0,264 \sqrt{\frac{9,81}{1,41}} = 0,594 \text{ U/sec}$$

$$n = 35,6 \text{ U/min}$$

=====

$$N = r_N \cdot \delta \cdot \sqrt{g \cdot R_z^3} = 0,0089 \cdot 1000 \sqrt{9,81 \cdot 103} =$$

$$N = 283 \text{ PS} .$$

Für beide Räder also

$$N = 566 \text{ PS}$$

=====

Aus

$$N = \frac{S \cdot v_e}{75 \cdot \eta} = \frac{5630 \cdot 6,18}{75 \cdot 0,80} = 580 \text{ PS}$$

errechnet sich eine Differenz von 2,5% gegenüber der aus r_N berechneten Leistung.

Damit hätte man also eine nahezu äquivalente Alternative zwischen diesen beiden Rädern. Nach der Zusammenstellung der geometrischen Verhältnisse kann man nun das Rad in allen Einzelheiten entwerfen.

2. Beispiel:

Ein Dieselschlepper leistet am Getriebeabtrieb 800 PS. Der Dieselmotor dreht mit 360 U/min. Der größtmögliche Zapfenkreisradius beträgt 2,00 m. Welchen Trossenzug kann der Schlepper bei einer Geschwindigkeit von 12 km/h (= 3,33 m/sec) auf unbeschränkter Wassertiefe ausüben? Welche Übersetzung muß das Getriebe erhalten? Der Widerstand des Schleppers bei 12 km/h beträgt 670 kg.

Die Mitstromeiffer betrage $\psi = - 0,06$

und die Sogsiffer $\psi_s = 0,04$.

$$v_e = 3,33 \cdot 1,06 = 3,53 \text{ m/sec}$$

Die Leistung an einem Rad beträgt

$$N = 400 \text{ PS}$$

Damit ist

$$F_R = \frac{v_e}{\sqrt{g \cdot R_z}} = \frac{3,53}{\sqrt{9,81 \cdot 2,00}} = 0,80$$

und

$$r_N = \frac{N}{8 \sqrt{g \cdot R_z^3}} = \frac{400}{1000 \sqrt{9,81 \cdot 128}} = 0,0113$$

Mit diesen Werten muß man nun in die Orientierungsdiagramme gehen, um sich das optimale Rad herauszusuchen. Doch sind die Orientierungsdiagramme für $r_N - F_R$ aufgebaut. Es soll nun ein Weg gezeigt werden, wie man mit relativ geringem Aufwand trotzdem zum Ziele kommt.

Aus der Tauchungsserie (A) bis (D) liest man aus den r_N Diagrammen für $F_R = 0,8$ die Wirkungsgrade mit den zugeordneten r_N -Werten ab. Wie im Hilfsdiagramm auf Seite 11a gezeigt, trägt man diese η -Werte über r_N auf. In (a) sind die Kurven der Tauchungsserie. Die Kurvenscharen (b) und (c) bezeichnen die Exzenterserie und schließlich (d) und (e) die Schaufelseries. Für $r_N = 0,0113$ liest man nun aus jeder Kurvenschar den größten Wirkungsgrad ab und kommt zu folgender Auswahl:

Kurvenschar (a): Das Rad (D) hat nahezu 59% Wirkungsgrad.

Kurvenschar (b): (J) hat besten Wirkungsgrad, allerdings nur 53%, entfällt also.

Kurvenschar (c): (M) mit 53% entfällt auch.

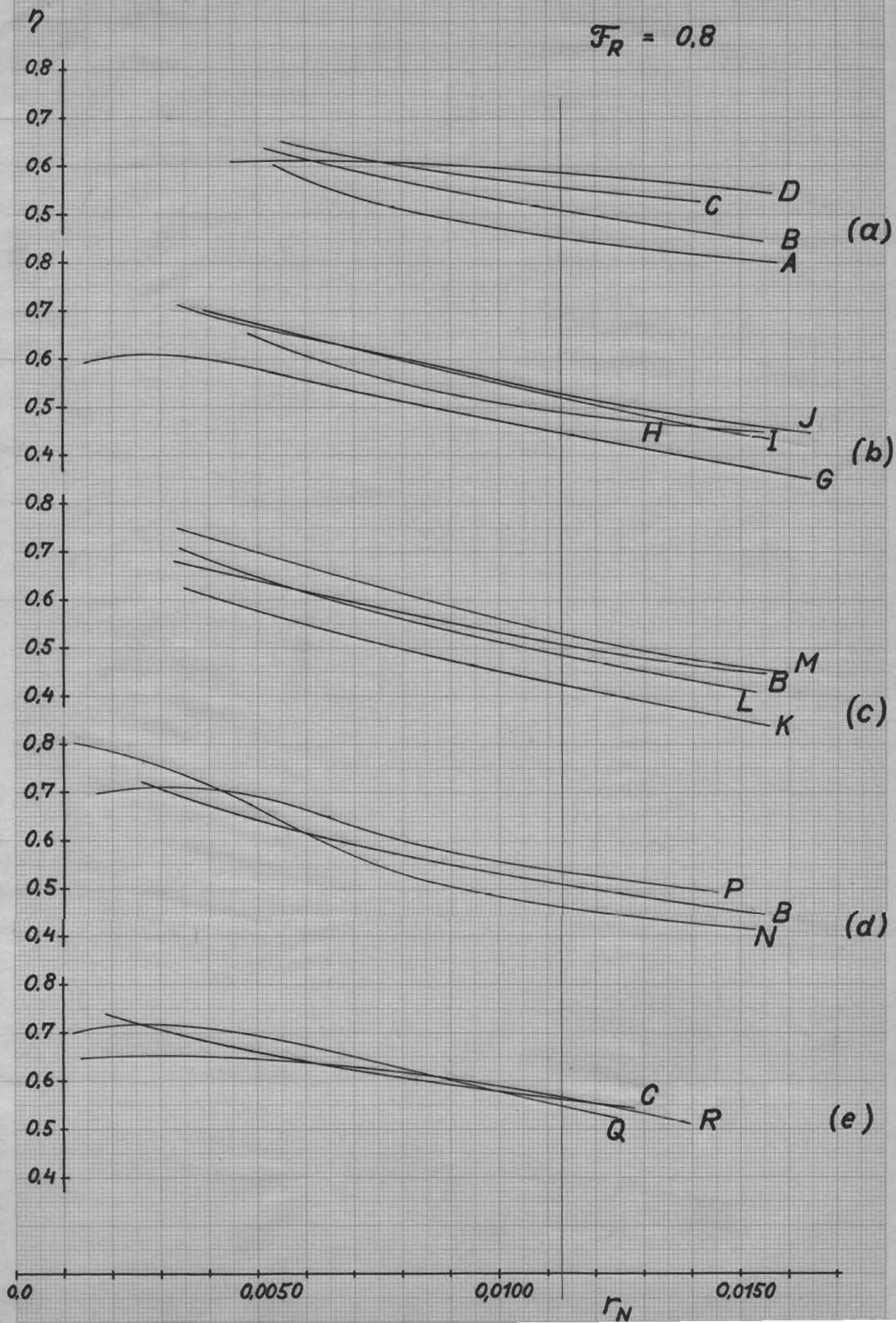
(Aus den Kurvenscharen (b) und (c) sieht man übrigens, daß (G) und (K) über den ganzen Bereich die weitaus schlechtesten Wirkungsgrade haben. Deshalb erscheinen diese beiden Räder auch in den Orientierungsblättern Bild 3 bzw. Bild 4 gar nicht).

Kurvenschar (d): (P) hat knapp 54 %

Kurvenschar (e): (R) hat knapp 57 %.

Somit ergibt sich das für diese Aufgabenstellung optimale Rad in Diagramm (D), evtl. aus Diagramm (R). Wie Tabelle I zeigt,

$$\mathcal{F}_R = 0.8$$



Das Übersetzungsverhältnis des Getriebes ergibt sich zu

$$i = \frac{360}{26,2} = 13,75$$

b) Diagrammblatt (R):

Für $F_R = 0,8$ und $r_H = 0,0113$

ergibt sich (leicht extrapoliert)

$$r_N = 0,209$$

Mit F_R und r_N aus dem r_N - F_R -Diagramm:

$$r_g = 0,631$$

$$S_1 = r_g \cdot \gamma \cdot M_z^3 = 0,631 \cdot 1000 \cdot 8,0 = 5050 \text{ kg}$$

für ein Rad. Für beide Räder also

$$S = 10.100 \text{ kg}$$

$$\text{Mit } S_1 = \frac{M_1 \cdot 75 \cdot \gamma}{V_g} = \frac{400 \cdot 75 \cdot 0,57}{3,53} = 4850 \text{ kg}$$

Eine Differenz von weniger als 4% gegenüber dem aus r_g errechneten Schub.

Wegen dieser Unsicherheiten in den Ergebnissen wird natürlich mit den ungünstigeren Werten gerechnet :

Trossensug

$$Z = W - W_{\text{schl.}} = (1 - \psi) \cdot S - W_{\text{schl.}}$$

$$= (1 - 0,04) \cdot 9700 - 670 = 8640 \text{ kg}$$

Aus $r_n = 0,209$ berechnet sich die Drehzahl

$$n = r_n \sqrt{\frac{g}{R_z}} = 0,209 \sqrt{\frac{9,81}{2,00}} = 0,464 \text{ U/sec}$$

$$n = 27,8 \text{ U/min}$$

=====

Und damit ergibt sich das Übersetzungsverhältnis des Getriebes:

$$i = \frac{360}{27,8} = 12,95$$

Unter Berücksichtigung der verschiedenen Tauchungen und der verschiedenen Schaufelanzahl kann man nun zwischen diesen zwei im wesentlichen gleichwertigen Räder \textcircled{D} und \textcircled{R} entscheiden.

3. Beispiel:

Ein Schiff habe bei 20 km/h (5,55 m/sec) ^{einen} Widerstand von 8860 kg. Es wird nach dem optimalen Seitenrad gesucht. Das heißt: es muß ein optimaler Sapfenkreisradius gefunden werden. Leistung und Drehzahl werden dafür gesucht.

Mit $\psi = -0,06$

wird $v_0 = v (1 - \psi) = 5,55 \cdot 1,06 = 5,9 \text{ m/sec}$

und der erforderliche Schub wird mit $\vartheta = 0,2$

$$S_{ges} = \frac{W}{1 - \vartheta} = \frac{8860}{0,8} = 11080 \text{ kg}.$$

Damit bringt ein Seitenrad einen Schub $s_1 = 5540 \text{ kg}$ auf.

Da alle weiteren Angaben fehlen, muß mit

$$r_{sv} = \frac{g \sqrt[3]{S/g}}{v_e^2}$$

gerechnet werden:

$$r_{sv} = \frac{9,81 \sqrt[3]{\frac{5540}{1000}}}{34,8} = 0,50 .$$

Eine Durchsicht aller $r_s - F_R$ - Diagramme zeigt, daß die Blätter (A), (M), (N) und (P) für diesen r_{sv} - Wert einen Wirkungsgrad von 80% erreichen.

Diagramm (A):

Für den Schnittpunkt mit $\eta = 0,80$

liest man ab :

$$\begin{aligned} F_R &= 1,04 \\ r_n &= 0,204 \\ r_s &= 0,162 \quad (\text{zur Kontrolle}) \end{aligned}$$

mit r_n und F_R aus dem $r_n - F_R$ - Blatt

$$r_n = 0,00270$$

Aus F_R kann R_s bestimmt werden

$$R_s = \frac{v_e^2}{F_R^2 \cdot g} = \frac{34,8}{1,08 \cdot 9,81} = 3,28 \text{ m} .$$

Zur Kontrolle wird aus r_s auch noch der Zapfenkreisradius bestimmt:

$$R_z = \sqrt[3]{\frac{S}{g \cdot r_s}} = \sqrt[3]{\frac{5540}{1000 \cdot 0,162}} = 3,25 \text{ m} .$$

Der Unterschied beträgt 3 cm, also weniger als 1%! R_z erscheint in der r_n - Formel in der 3. Potenz. Damit ist natürlich eine größere Ableseempfindlichkeit verbunden.

Mit $R_z = 3,28$ m wird

$$n = r_n \cdot \sqrt{\frac{g}{R_z}} = 0,204 \sqrt{\frac{9,81}{3,28}} = 0,353 \text{ U/sec}$$

$$n = 21,2 \text{ U/min}$$

=====

$$N_1 = r_N \cdot \delta \sqrt{g \cdot R_z^3} = 0,00270 \cdot 1000 \sqrt{9,81 \cdot 4086} =$$

$$N_1 = 549 \text{ PS}$$

~~212-12~~

auf ein Rad. Kontrolle mit $N = \frac{S \cdot v_e}{75 \cdot \eta}$ ergibt

$$N = \frac{5540 \cdot 5,9}{75 \cdot 0,80} = 545 \text{ PS}$$

Diagramm (M) :

$$\begin{aligned} r_R &= 1,15 \\ r_n &= 0,235 \\ r_s &= 0,285 \\ r_H &= 0,0053 \end{aligned}$$

$$R_z = \frac{v_e^2}{g \cdot r_R^3} = \frac{34,8}{9,81 \cdot 1,32} = 2,68 \text{ m ,}$$

zur Kontrolle

$$R_z = \sqrt[3]{\frac{S}{\delta \cdot r_s}} = \sqrt[3]{\frac{5540}{1000 \cdot 0,285}} = 2,69 \text{ m .}$$

Mit $R_z = 2,68$ wird

$$n = r_n \cdot \sqrt{\frac{g}{R_z}} = 0,235 \sqrt{\frac{9,81}{2,68}} = 0,45 \text{ U/sec}$$

$$\underline{n = 27,0 \text{ U/min}}$$

Die Leistung an einem Rad

$$N_1 = r_N \cdot g \sqrt{g \cdot R_z^3} = 0,0053 \cdot 1000 \sqrt{9,81 \cdot 2,68^3} =$$

$$\underline{N_1 = 523 \text{ PS}}$$

$$\text{Vergleich mit } N = \frac{S \cdot v_e}{75 \cdot \eta} = 545 \text{ ergibt } 4,2 \% \text{ Abweichung.}$$

Diagramm ⑤ :

Für Schnittpunkt mit $\eta = 0,80$:

$$P_R = 1,17$$

$$r_n = 0,242$$

$$r_s = 0,312$$

$$r_H = 0,0061$$

$$R_z = \frac{v_e^2}{g \cdot r_R} = \frac{34,8}{9,81 \cdot 1,37} = \underline{\underline{2,58 \text{ m.}}}$$

Kontrolle:

$$R_z = \sqrt[3]{\frac{S}{g \cdot r_s}} = \sqrt[3]{\frac{5540}{1000 \cdot 0,312}} = 2,61 \text{ m.}$$

$$n = r_n \sqrt{\frac{g}{R_z}} = 0,242 \sqrt{\frac{9,81}{2,58}} = 0,47 \text{ U/sec}$$

$$\underline{n = 28,2 \text{ U/min}}$$

$$N_1 = r_N \cdot \gamma \sqrt{g \cdot R_z^3} = 0,0061 \cdot 1000 \sqrt{9,81 \cdot 2,58^3} = \underline{\underline{527 \text{ PS}}}$$

(3,4 % Abweichung).

Für Schnittpunkt mit $\eta = 0,85$

$$F_R = 1,13$$

$$r_n = 0,225$$

$$r_g = 0,252$$

$$r_H = 0,0044$$

$$R_g = \frac{v_g^2}{F_R^2 \cdot g} = \frac{34,8}{1,28 \cdot 9,81} = \underline{\underline{2,77 \text{ m}}}$$

Kontrolle:

$$R_z = \sqrt[3]{\frac{5540}{1000 \cdot 0,252}} = 2,80 \text{ m.}$$

$$n = 0,225 \sqrt{\frac{9,81}{2,77}} = 0,423 \text{ U/sec} = \underline{\underline{25,4 \text{ U/min.}}}$$

$$N_1 = r_N \cdot \gamma \sqrt{g \cdot R_z^3} = 0,0044 \cdot 1000 \sqrt{9,81 \cdot 2,77^3} = \underline{\underline{487 \text{ PS}}}$$

Kontrolle

$$N = \frac{5540 \cdot 5,9}{75 \cdot 0,85} = 512 \text{ PS (Abweichung 5,2 \%)}.$$

Diagramm (P) :

$$F_R = 1,12$$

$$r_n = 0,208$$

$$r_g = 0,242$$

$$r_H = 0,0045$$

$$R_z = \frac{v_0^2}{F_R \cdot g} = \frac{34.8}{1,26 \cdot 9,81} = \underline{\underline{2,84 \text{ m}}}$$

Kontrolle:

$$R_z = \sqrt[3]{\frac{5540}{1000 \cdot 0,242}} = 2,84 \text{ m.}$$

$$n = 0,208 \sqrt{\frac{9,81}{2,84}} = 0,387 \text{ U/sec} = \underline{\underline{23,2 \text{ U/min}}}$$

$$N_1 = 0,0045 \cdot 1000 \sqrt{9,81 \cdot 2,84^3} = \underline{\underline{544 \text{ PS}}}$$

Die Leistung ist bei allen Rädern gleich, dagegen unterscheiden sie sich nur etwas in Zapfenkreisradius und Drehzahl.

Wenn der Radius zu groß sein sollte, so kann man auf $r_{zv} = 0,50$ aufwärts gehen. Der Wirkungsgrad und der Radius werden kleiner, die Drehzahl wird größer.

Anhand dieser drei Beispiele ist der Rechnungsgang prinzipiell erklärt worden mit den notwendigen Kontrollrechnungen. Es mag hiermit genügen. Alle anderen Aufgabenstellungen lassen sich ähnlich lösen.

Tabelle II

Variierte Größen	Blätter	Bereich	Bemerkungen
Tauchungsverhältnis	A-B-C-D	0,365 bis 0,731	9 gekrümmte Schaufeln
Tauchungsverhältnis	E-F	0,365 und 0,731	9 flache Schaufeln
Exzenterlage	G-H-I-J	0,0 bis 0,1865 v. W. Mitte	0,0 ü.W.Mitte, 9 gekr. Sch.
Exzenterlage	K-L-B-M	0,0 bis 0,1865 v. W. Mitte	0,0745 ü.W.Mitte, 9 gekr. Sch.
G-K, H-L, I-B, J-M stellen einen Vergleich für eine nur vertikale Exzenterverschiebung dar.			
Schaufelanzahl	N-B-P	6-9-11	0,487 Tauch.verh., gekr. Sch.
Schaufelanzahl	Q-C-R	6-9-11	0,609 Tauch.verh., gekr. Sch.
Schaufelform	A-E	flach und gekrümmt	0,365 Tauch.verh., 9 Schaufeln
Schaufelform	D-F	flach und gekrümmt	0,731 Tauch.verh., 9 Schaufeln
Schaufellängenverhältnis	B-S	1,79 und 1,34	0,487 Tauch.verh., 9 gekr. Sch.
Schaufellängenverhältnis	C-T	1,79 und 1,34	0,609 Tauch.verh., 9 gekr. Sch.

TEIL III

Untersuchung verschiedener Einflüsse auf die
Arbeitsweise eines Schaufelrades.

seitend in Teil I und Teil II die angegebenen Einflüsse, die für die Arbeitsschritte des Regelsystems wichtig sind, mit w sein berücksichtigt werden, sein für die mit den Diagrammen mit r_s -, r_N -, F_R - und r_n -Kannziffern verbunden sind sein für die Einblicke auf die ganzheitliche Auswertung notwendig sind, welche im folgenden einige weiteren Vergleichen behandelt werden, die die die Definition natürlicher Kannziffern tiefen Einblicke in die Arbeitsschritte des Regelsystems zulassen.

Bei den Kannziffern

für Gesamtheit $F_R = \frac{v_e}{\sqrt{g \cdot R_z}}$,

für Regler $r_s = \frac{s}{\delta \cdot R_z^2}$,

für Leitung $r_N = \frac{N}{\delta \sqrt{g \cdot R_z^2}}$

und für Vorgabe $r_n = n \sqrt{\frac{R_z}{g}}$ ist als ein =

zige Bezugsgrößen der Zugfunktionskondition R_z aufzuweisen. Zeigt man nun in der r_s - F_R -Diagramm für die eine Reihe der Funktionsknoten A-B-C-D in der r_n -Knoten ein, so zeigt man auf Bild 1, dass diese Knoten abhängig voneinander stehen. In dieser Darstellung ist für eine nicht nur r_n als Parameter aufzuweisen, sondern auch der Funktionsverhältnis. Um nun auch die Funktion als Parameter zu eliminieren, werden die Funktion T des Knoten in die Ordinaten- und Abszissenkannziffer r_s bzw F_R eingefügt:

$$F_R \cdot \frac{1}{\sqrt{T/R_z}} = \frac{v_e}{\sqrt{g \cdot R_z \cdot T/R_z}} = \frac{v_e}{\sqrt{g \cdot T}} = F_T . \quad \text{in } F_R\text{-Werte}$$

sowohl als auch die Abstände auf den entsprechenden Krümmungseigenschaften sind, um die F_T -Werte zu erhalten.

Die Krümmungseigenschaften sind

$$\text{für (A)} \quad T/R_z = 0,365$$

$$\text{für (B)} \quad = 0,487$$

$$\text{für (C)} \quad = 0,609$$

$$\text{für (D)} \quad = 0,731$$

Wenn man aufgrund der Umformung von r_s ermittelt, so erhält man:

$$r_s \cdot \frac{1}{(T/R_z)^3} = \frac{S}{\mu \cdot T^3}$$

Löst man nun $G' = \frac{S}{\rho \cdot v_e^2 \cdot F} = \frac{S}{\rho \cdot v_e^2 \cdot b \cdot T}$ als Ergebnis = Krümmungseigenheit ab, wobei b die Krümmungslänge bedeutet, und betrachtet man ein $G-F_T$ -Diagramm, in dem man wieder die Krümmung als Parameter einzeichnet, so erhält man 4 Ergebnisse (Bild 2). Wenn man jetzt jeden Punkt der Kurven mit dem Quadratpunkt abgezeichnet hat, wird auf der Ordinate

$$G' \cdot \frac{v_e^2}{g \cdot T} = \frac{S \cdot v_e^2}{\rho \cdot v_e^2 \cdot b \cdot T \cdot g \cdot T} = \frac{S}{\mu \cdot b \cdot T^2} = t_s$$

In Bild 3 ist immer noch wieder die Krümmung r als Wert T als Parameter, wobei die Kurven in t_s-F_T -Koordinaten liegen aufgetragen sind. Wie aber schon in Bild 2 zu erkennen ist, werden hier die Kurven immerhin noch sehr gut. Ein weiterer Vorteil.

In Bild 4 sind alle die vier Kurven A-B-C-D für jeden Krümmungswert sehr gut zu erkennen. Das

wird benötigt, weil der Druckschleimdruck r_n der F_n entspricht
wird:

Wenn man nämlich r_n auf der $\sqrt{T/R_z}$ findet,
so erfüllt man

$$r_n \cdot \frac{1}{\sqrt{T/R_z}} = n \sqrt{\frac{R_z}{g} \frac{R_z'}{T}} = \frac{n \cdot R_z}{\sqrt{g \cdot T}} = F_n .$$

Mit dieser Darstellung ist nun also die Krümmung als
Parameter vollständig eliminiert.

Die übrigen Darstellungsmittel sind in [4] für
die Widerstandsverhältnisse einer bestimmten Länge
gegeben.

Da die 4 Ränder A-B-C-D völlig identisch sind
(gleiche Bezugsdaten, gleiche Reihenfolge und -form) und
sie bei bestimmten Krümmungsergebnissen zugeordnet
sind, müssen sich die offensichtlichsten Differenzen auf
den der die bestimmten Krümmungen hervorheben
bestimmten Winkel bei Ein- und Austritt markanter
Reihenfolgepunkte (Drehpunkte, Mitte und Oberpunkte) an-
nehmen lassen, wenn man von Reibungsdruck, Luft-
druck, Reibungsdruckverteilung usw. ab-
zieht — und wenn man die Drehpunkte nicht auf
Abweichungsfähigkeit der Abtriebsorgane verweist!

Nach dieser Art sind die Abtriebsorgane, wenn
man, wie in Bild 5 gezeigt, η über F_7 aufträgt,
mit F_n als Parameter.

Genauso mit bestimmten Reihenfolgepunkten muß
man Bild 6 und 7 und Bild 8 und 9 betrachten. In

G-H-I-J bzw. K-L-B-M im ts-Fr-Diagramm mit Fr als Parameter verglichen werden. Diese beiden Vergleichsreihen sind $w =$ gut für die Winkeluntersuchungen bisher geeignet als die Vergleichsreihe A-B-C-D. Die in Bild 6 bis 9 veranschauligten Differenzen können nicht planmäßig mit entsprechenden Winkeln erklärt werden, denn diese Winkel sind bei gleicher Krümmung und bei gleicher Pfeilfolge und -form geteilt worden. Lediglich die Vergleichsreihe ist geändert worden. Es ist also der Krümmungswinkel der Pfeile auf ihren Weg auf der Ober- und die gegenseitige Beeinflussung der Pfeile bei den jeweils 4 Werten der 2 Vergleichsreihen gleich. Wenn sorgfältig auf die Luftströmung von Eintrittswinkel der Pfeile abgesehen ist, so ist aber im Gegensatz zu Krümmungsreihen der Weg der Pfeile auf der Ober- gleich bei den Vergleichsreihen, wobei anzunehmen ist, daß die Luftströmung gleich weit auf der Ober- mitgeführt worden. Es bleiben also im Gegensatz zu den Kopf- und Tragkraftverhältnissen, die die Nachschubkräfte sind die nur auf die Winkelstellungen zu erklären sind.

Nicht mit Winkeln kann man die Differenzen erklären, die sich bei Vergleich der Pfeilfolge/Reihen ergeben, wie sie in Bild 10 und 11 bzw. Bild 12 und 13 für 6, 9 und 11 Pfeile (bei gleicher Krümmung) und bei einem Krümmungsverhältnis von 0,487 bzw. 0,609 dargestellt sind. Diese Unterschiede kann man nur mit gegenseitiger Beeinflussung der Pfeile und mit der Festsetzung daß von den einzelnen Pfeilen günstige Nachschubverhältnisse resultieren. Es ist unmöglich,

Einzel Problem ausschließlich zu behandeln, da es allein
 ohne inwiderwärtliche Widersprüche beruht, die Kinnere-
 tilgen Befehlshaber der Tugend zu zeigen. Die Tugend der Weisheit
 nicht allein eine Notwendigkeit im Leben der Tugendlichen,
 sondern zu wichtig - das die Tugendlichen bestimmen - eine Auf-
 forderung im Leben der Tugendlichen. Wenn man das als einleuchtend
 nach mit dieser inwiderwärtlichen Befehlshaber lösen könnte,
 so ist es nicht möglich, die Tugendlichen am Ort der Tugend
 zu zeigen und damit die Tugend, die auf die Tugend der Weis-
 heit und dazu nach die Tugendlichen zu zeigen wollen
 und nachfolgende Tugend und Tugend der Tugendlichen
 der Tugend. Tugend der Tugendlichen Tugend, die Tugend-
 liche sind und Tugend.

Einzel Problem kann man mit der Tugendlichen Weis-
 heit im Tugendlichen Tugendlichen Tugendlichen.
 Man muß die Tugendlichen Tugendlichen mit Tugendlichen Tugend-
 lichen im Leben der Tugendlichen Tugendlichen Tugendlichen
 Tugendlichen Tugendlichen und die bei Tugendlichen Tugendlichen
 der Tugendlichen Tugendlichen Tugendlichen Tugendlichen Tugend-
 lichen. Die der Tugendlichen Tugendlichen Tugendlichen
 - und mit der! - könnte man Tugendlichen Tugend-
 lichen der Tugendlichen, die Tugendlichen Tugendlichen der Tugend-
 lichen und die Tugendlichen Tugendlichen Tugendlichen.

Einzel Problem kann man mit der Tugendlichen Tugendlichen
 Tugendlichen. Es sind von allen Tugendlichen Tugendlichen nicht ein-
 mal Tugendlichen der Tugendlichen Tugendlichen im Tugendlichen
 Tugendlichen Tugendlichen Tugendlichen Tugendlichen. Die Tugendlichen Tugend-
 lichen Tugendlichen Tugendlichen Tugendlichen.

hohen Maßstabes bei den Vorlesungen unterbei der zu-
 fügen zu sein. Allerdings sind bis zu noch keine
 Entscheidungen getroffen worden, die die Einflüsse, die
 die Arbeitskraft der Teilnehmer bestimmt, einzeln
 zu kennen und zu erklären versucht haben. Es ist jedoch
 zu hoffen, daß bei allen noch nicht vergessenen
 Vorgesetzten welche Maßnahmen getroffen werden, um
 diesen Einflüssen über den Einfluß der Teilnehmer zu
 helfen zu können.

Es müssen sich noch große Aufgaben stellen für
 zukünftige Teilnehmermodellierungen.

Zur Ermittlung des Gefälleverhältnisses.

Den folgenden sollen die grundsätzlichen Verhältnisse der Gefälleverhältnisse untersucht werden. Es wird der Winkel β (Winkel zwischen der Gefälle und der Horizontalen) in Abhängigkeit der Gefälle q für die inneren Hälften des Rades bestimmt, von dem aufsteigend werden für die- und die Höhe von 6 markierten Gefällestellungen die Winkel q und die zugehörigen die- und die Höhenwinkel β bestimmt. In einer geeigneten Weise werden entsprechende Einheitsgrößen des Verhältnisses abgezogen und schließlich die Winkel zwischen der relativen und den Gefällegrößen zum Höhenwinkel β und der Gefälle für die 6 markierten Gefällestellungen festgestellt. Diese Winkel geben mit den - nach der zugehörigen - Höhenstellungen ein Maß für die Höhen bei die- und die Höhe der Gefälle. Es sollen diese Winkel mit den auf den Arbeitsverhältnissen bestimmten Werten verglichen werden und untersucht werden, ob sie irgendwelche Zusammenhänge auf dem Vergleich ableiten lassen.

Wenn auf Bild, Teil II richtig ist, folgt mit der entsprechenden Größe der Winkelgrößen des Rades um die Ränder, für die anderen Längen gegeben sind Abmessungen, die in einem Maß von der Kreislinie aufsteigend der Höhenlage abhängig sind. Damit sind weiter über die Gefällestellungen - finden. Das diese Verhältnisse kann man die entsprechenden

Lauchlösungen vorgehen. In dieser Beziehung sind es nur die Königslinien betroffen. Es würde die Rechnung sehr unnötig komplizieren, wenn man die Krümmung der Niveaulinien in Betracht ziehen würde. Da aber alle Querschnitte des Rohrs eine konstante Niveaulinienkrümmung haben, ergibt sich also immer die selbe Differenz des Winkels β , wenn man für die gewählten Unterteilung flache Niveaulinien annimmt. Außerdem dürfte die Größenordnung dieser Winkeldifferenzen (Königslinien, flache Niveaulinien) klein sein gegen die als ingestrichelt betrachteten Neffensverflechtungen und die parallel-also auch ingestrichelt-angenommenen Einheitsgeraden.

In Bild 14 sind alle notwendigen Bezugslinien eingezeichnet, die in der Rechnung eingebracht werden.

Aus dem Cosinus-Satz

$$\cos \varphi = \frac{R_z^2 + e^2 - d^2}{2 e \cdot R_z} \quad \text{ergibt sich die}$$

$$\text{Hilfslänge } d^2 = R_z^2 + e^2 - 2 e \cdot R_z \cdot \cos \varphi$$

Es ist ferner

$$\cos \gamma = \frac{R_z^2 + d^2 - e^2}{2 d \cdot R_z}$$

$$\text{oder} \quad \gamma = \arccos \left(\frac{R_z^2 + d^2 - e^2}{2 d \cdot R_z} \right)$$

für δ gilt:

$$\cos \delta = \frac{d^2 + l^2 - R_e^2}{2 \cdot d \cdot l}$$

oder

$$\delta = \arccos\left(\frac{d^2 + l^2 - R_e^2}{2 \cdot d \cdot l}\right)$$

mit

$$\varepsilon = \gamma + \delta \quad \text{erfüllt man nun}$$

$$\varepsilon = \arccos\left(\frac{R_z^2 + d^2 - e^2}{2 d \cdot R_z}\right) + \arccos\left(\frac{d^2 + l^2 - R_e^2}{2 d \cdot l}\right)$$

In diese Gleichung sind die Ausdrücke für d^2 einzusetzen. Dann ergibt sich:

$$\varepsilon(\varphi) = \arccos\left(\frac{R_z^2 - e \cdot R_z \cos \varphi}{R_z \sqrt{R_z^2 + e^2 - 2e \cdot R_z \cos \varphi}}\right) + \arccos\left(\frac{R_z^2 + l^2 - R_e^2 + e^2 - 2e R_z \cos \varphi}{2 \cdot l \sqrt{R_z^2 + e^2 - 2e \cdot R_z \cos \varphi}}\right)$$

Wenn man auf Bild 14 leicht ableiten lässt, ist:

$$\beta = \varphi - 75^\circ + \varepsilon$$

Da bei den Modellrechnungen von Volpich $R_z = R_e$, was einsteht, ist die Formel noch. Um für die jeweilige Auswertung mit den auf R_z bezogenen Verhältniszahlen rechnen zu können, sind die ganze Gleichung auf R_z^2 gekürzt. Es ist dann ungültig:

$$\beta(\varphi) = \varphi - 75^\circ + \arccos\left(\frac{1 - \frac{e}{R_z} \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 + \left(\frac{e}{R_z}\right)^2 - 2 \frac{e}{R_z} \cos \varphi}}\right) + \arccos\left(\frac{\left(\frac{l}{R_z}\right)^2 + \left(\frac{e}{R_z}\right)^2 - 2 \frac{e}{R_z} \cos \varphi}{2 \frac{l}{R_z} \sqrt{1 + \left(\frac{e}{R_z}\right)^2 - 2 \frac{e}{R_z} \cos \varphi}}\right)$$

$\frac{l}{R_z}$ ist für alle Räder gleich 0,258, wobei nur $\frac{e}{R_z}$ als Variable bleibt.

Mit dieser Gleichung werden alle Räder gerechnet, deren Epizykloiden von Mitteln Wellen auf nur einer Seite vorhanden ist (H, I und J) (Tabelle 1, 2 und 3).

G sind auf Tabelle 8 einzeln gerechnet, weil es ein Rad mit festen Nocken ist. In Bild 15 ist der Verlauf von β über dem Drehwinkel φ aufgetragen.

Wenn man nun die Bezugslage nach rechts wendet, so kann man die Formel für $\beta(\varphi)$ in entsprechenden Beibehalten.

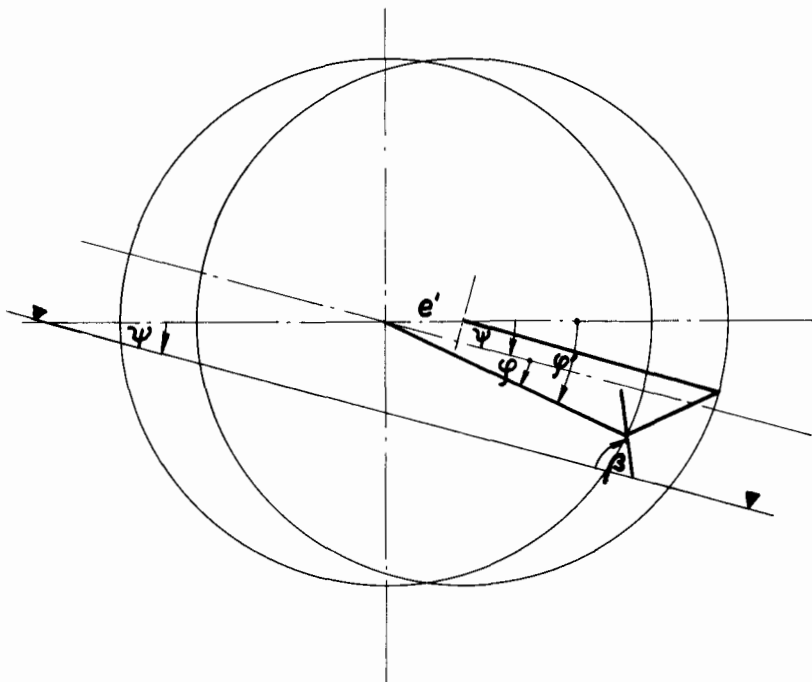


Bild 16

Aus Bild 16 folgt, daß man statt e setzen muß

$$e' = \sqrt{(e_{\text{vor}})^2 + (e_{\text{über}})^2}.$$

Die Neuposition ist um ψ geneigt, wobei

$$\tan \psi = \frac{e_{\text{über}}}{e_{\text{vor}}}.$$

Es wird also

$$\varphi = \varphi' - \psi$$

für β ergibt sich also

$$\beta = \varphi' - \psi - 75^\circ + \varepsilon$$

so ist die Rechnung für (K), (A) (= (B) = (C) = (D)), (L) und (M) ausgehend von entsprechenden Bezugslagen in Tabelle 1, 4, 5 und 6 durchgeführt und in Bild 17 β über φ aufgetragen.

Einmal ist also für jede von Volpich gezeichnete Figur der Winkel von β über die unten Randfläche bekannt. Und nun kann man wieder einfach die Tangential γ bestimmen, bei dieser beliebigen Figurfolgenreihe sind die Punkte und dazu der Winkel β , unter dieser jeder Figurfolgenpunkt die Maßzahl eintrifft.

Dazu muß zunächst noch eine weitere Annahme eingeführt werden: Es wird für die Angewandte angenommen, daß die Figurfolgenreihe durch die Zylinderkreislänge bedingt ist. Auf konstruktiven Gründen ist dies in Wirklichkeit natürlich nicht der Fall. Aber die Folge ist sehr gering, da die Figurfolgenreihe in Wirklichkeit sehr nahe am Zylinderkreis liegt (bei Volpichs Rändern beträgt die Entfernung ca. $0,05 \cdot R_z$ [siehe Bild 1, Teil II]).

Zu dieser Betrachtung werden 6 markierte Figurfolgenstellungen unterteilt, die wohl für die Arbeitsbedingungen des Randes die wichtigsten sind. Es sind dies

1. Eintritt Unterkante Schaufel (U.K.)
2. Eintritt Mitte Schaufel
3. Eintritt Oberkante Schaufel (O.K.)
4. Austritt Oberkante Schaufel
5. Austritt Mitte Schaufel
6. Austritt Unterkante Schaufel

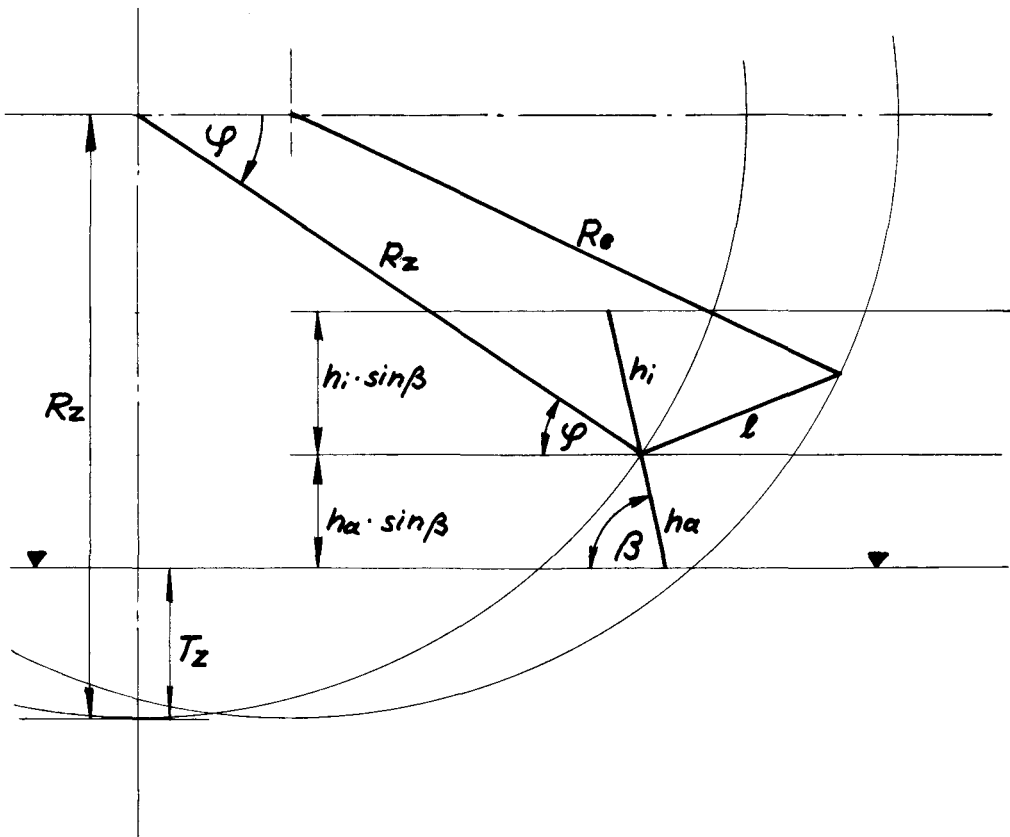


Bild 18

dafür gegeben ist auf Bild 18 ist die Bedingungsgleichung:

$$\text{für U.K.} \quad \sin \varphi = 1 - \frac{T_z}{R_z} - \frac{h_a}{R_z} \cdot \sin \beta$$

$$\text{für Mitte} \quad \sin \varphi = 1 - \frac{T_z}{R_z}$$

$$\text{für O.K.} \quad \sin \varphi = 1 - \frac{T_z}{R_z} + \frac{h_i}{R_z} \cdot \sin \beta$$

Die Eintrittspunkte liegen bei $\varphi < 90^\circ$, die Austrittspunkte bei $\varphi > 90^\circ$.

Bildet ist das Krümmungsverhältnis der Zylinderachse definiert gewesen als Verhältnis der Krümmung der tiefsten Punkte der Zylinder bis zur Oberflächenebene bezogen auf R_z ($\frac{T_a}{R_z}$).

Wir können aber mit die einfachen obigen Gleichungen annehmen, wenn wir die Krümmung definieren als Abstand zwischen tiefstem Punkt der Zylinderkante und der

senkrecht bezogen auf R_z ($\frac{T_z}{R_z}$).

Für alle Ränder ist $h_a = 0,212$ und $h_i = 0,266$

oder

$$\frac{T_a}{R_z} = \frac{h_a}{R_z} = \frac{T_z}{R_z}$$

sind für

$\frac{T_a}{R_z} = 0,365$	$\frac{T_z}{R_z} = 0,153$
$= 0,487$	$= 0,275$
$= 0,609$	$= 0,397$
$= 0,731$	$= 0,519$

Die drei einfachen Bedingungengleichungen für ein- bzw. Austritt von U.K., Mitte und O.K. sind wegen β nicht einfach zu lösen, da β eine Funktion von φ ist. Aber graphisch läßt es sich einfach lösen.

Über φ hängt man $\sin \varphi$ auf und erhält

$$1 - \frac{T_z}{R_z} - \frac{h_a}{R_z} \cdot \sin \beta \quad \text{bzw.} \quad 1 - \frac{T_z}{R_z} + \frac{h_i}{R_z} \cdot \sin \beta \quad \text{verbleibend}$$

auf und trägt diese Kurven über φ auf.

In jedem der beiden Schnittpunkte mit $\sin \varphi$ trägt man die erhaltenen Werte φ für ein- bzw. Austritt.

Mit den den Schnittpunkten zugeordneten φ -Werten liest man in Bild 15 bzw. Bild 17 die zugehörigen β -Werte ab. Damit hat man für Eintritt bzw. Austritt die 6 markierten Schnittpunkte in beiden interkurrenten Werten φ und β .

In Tabelle 7 sind die Werte für A, B, C und D angegeben, in Bild 19 die Schnittpunkte bestimmt. In Tabelle 7 unten sind die Winkel β und φ zu =

kurvengefallen.

In Tabelle 8 ist die Aufhängung und Zählweise =
Haltung für φ und β der 6 markierten Tefäpfe/Haltungen
für ⑤, in Tabelle 9 für ⑥ und ⑦, in Tabelle 10
für ⑧ und ⑨ und in Tabelle 11 für ⑩ und ⑪.

Auf Bild 20 sind die ein- bzw. drittelgipfligen
für ⑤, ⑥, ⑦ und ⑧ und auf Bild 21 für ⑨, ⑩ und ⑪
abgelesen.

Die geometrischen Aufstellungen der Punkte sind durch die
allein gegebenen der Koordinaten der in der Abbildung
in der Abbildung bekannt.

Die Bestimmung der Aufhängung φ mit den dazu-
gehörigen Tefäpfe/Haltungen β müßte so aufzufällig ge-
eignet werden, damit man bei der nachfolgenden Kinn-
markierung der Aufhängung die 6 markierten Tefäpfe/Haltungen
mit der nötigen Genauigkeit zeichnen kann. Die geo-
metrische Konstruktion dieser Punkte wäre zu überaus
genau und im Gegensatz zu den anderen. Außerdem ist
es für eine solche folgende Konstruktion ganz möglich,
die ganze Konstruktion der Tefäpfe/Haltungen aufzuführen zu
bezeichnen.

Wenn man die Aufhängung der Tefäpfe zu über-
prüfen, muß man auf die Kinnmarkierung ganz genau
mit zurückgehen. Die Tefäpfe ist fast mit dem Tefäpfe-
hänge verbunden. Und diese Tefäpfehänge bringt sie
sicherlich auf dem Zählkreis mit der Aufhängungsfähigkeit
mit der Punkte und anders mit in der Tefäpfehänge mit

den Linsen zueinander, sodass eine Bewegung im den optischen-
mittelpunkt bewirkt wird. Sogar verläuft die Refraktion eine
überlegte Auslenkung im der Zylinderkugel mit einer
Anfangsbedingung. Durch die Einwirkung kann man diese
Veränderung sorgfältig andern kontrollieren, indem man den
Zugkraftgesetz folgt. Der Zylinderkugelmittelpunkt der Refrak-
tion ist mit dem Randmittelpunkt und der optischen Kug-
elmittelpunkt sind mit dem optischenmittelpunkt verbunden. Im
Refraktionsgesetz dieser beiden Phasen liegt die Zugkraftgesetz-
gesetz, um den die die Phasenbewegung der Refraktion/Kugel
und damit der Refraktion gesondert werden kann. Die Zugkraft-
kraft einer Refraktionskugel erfüllt die Zugkraftgesetz
der Zylinderkugel (=Anfangszugkraft) sein dann
abnehmen zum Zugkraftgesetz. Und die Richtung der
verändernden Zugkraft der Refraktionskugel liegt
punktförmig auf dem Verbindungsstrahl zum Zugkraftgesetz.
In einem Koordinatensystem kann man nur die
Einheitszugkraft der Refraktion hinzufügen und man
erhält die verändernde Relativzugkraft der Refraktion
zum Refraktionsgesetz. Der Winkel zwischen der verändernden Relati-
vzugkraft und der Refraktion - α - kann ge-
messen werden, das ist ein Maß für die Abweichung
bei Ein- und Austritt der Refraktionskugel. Wir haben uns
auf 6 markante Refraktionskugel beschränkt. Sind
der Winkel α 0° , so heißt das, dass der Refraktionskugel
ohne Ab- und Austritt die Refraktion die Refraktion der
Refraktion. Das ist die optimale Arbeitsbedingung.

In Bild 22 bis 32 ist die Konstruktion eingefügt worden für die verschiedenen Füllungsverhältnisse und die verschiedenen Geometrien, ausgehend von beliebig geformten Röhren.

Zu diesen Bildern muß noch folgendes gesagt werden. Die Röhre sollte oben durch ein Gitter sein, in dem die Ausströmung mit notwendigen Vorrichtungen geregelt werden. Die Vorrichtungen für die geometrische Anordnung sind erläutert worden. Diese kinematische Ausströmung entspricht dazu noch die große Indizierung, daß die Rohröffnungen als gleich und in der Mitte und die Einströmrichtung der Rohröffnung als parallel zur Rohröffnung angenommen wird. Wenn man also die Qualitäten beibehalten kann, die lediglich einen groben Überblick gestatten.

Ausgehend von der Modellströmung, bei der der Rand mit einer Strömungslinie bei verschiedenen Füllungsverhältnissen gegeben wird, ist eine Strömungsgleichung angenommen mit verschiedenen Einströmrichtungen als Vorzeichen. In den Bildern 22-32 sind für die Strömungsgleichung auf dem Zylinder Rand 10 [cm] gezeichnet. Damit lassen sich für alle 6 Füllungsverhältnisse die entsprechenden Füllungsverhältnisse nach Größe und Richtung aufzeichnen.

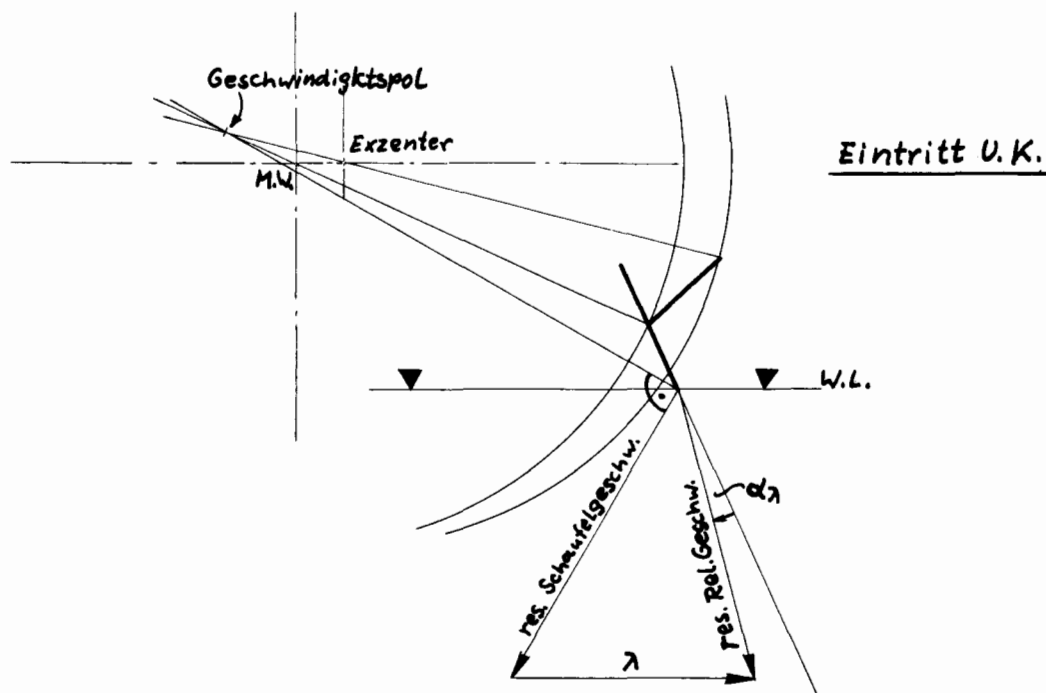
Die Einströmrichtung v_e ist als Verhältnis π zur Strömungsgleichung einzufügen:

$$\pi = \frac{v_e}{u} = \frac{v_e}{2\pi \cdot n \cdot R_z}$$

für π bis 1,0 (= 10 [cm])

In diesem Sinne liegen alle von Volpich untersuchten
Verfahren und Regelspezifisierungen.

Auf dem λ -Faktor ist λ mit Werteänderungen von 0,1
abgetragen, wobei bei jeder Regelspezifisierung mit-
gezeichnet sind α λ -Winkel gegeben.



Es genügt nun nicht, die abgelesenen α λ -Werte für die
6 Regelspezifisierungen direkt zeichnen den entsprechenden Rändern
mit dem Wirkungsgrad zu vergleichen. Es ist bekannt
und liegt schon aus Grund der Orientierungsblätter (Bild 2
Bil 6 im Teil II) offensichtlich geworden, dass der Wirkungs-
grad η bei kleinen Regelspezifisierungen λ groß ist
und mit steigenden Regelspezifisierungen abfällt. Es
dafür aber die α λ -Winkel der einzelnen Ränder nur
mit dem Wirkungsgrad bei gleichem Regelspezifisierungs-
grad und gleicher Gefällesteilheit v_e (Fr) verglichen
werden.

der Trübleistungsfaktor ist definiert als

$$G = \frac{S}{\frac{1}{2} v_e^2 \cdot F} = \frac{S}{\frac{1}{2} v_e^2 \cdot b \cdot T}$$

mit der Trübleistungszahl

$$ts = \frac{S}{\delta \cdot b \cdot T^2}$$

und der Froude'schen Zahl

$$Fr = \frac{v_e}{\sqrt{g \cdot T}} \quad \text{wobei, wenn man}$$

hier auf der linken Seite S bzw. v_e auflöst

$$S = ts \cdot \delta \cdot b \cdot T^2$$

und $v_e^2 = Fr^2 \cdot g \cdot T$ und in die Formel

für G einsetzt:

$$G = \frac{2 \cdot ts}{Fr^2} \quad \text{hier sind Parabeln}$$

im $ts - Fr$ -Diagramm. Im Arbeitsskizzenplan liegen
aber nur im $r_s - Fr$ -Koordinatensystem vor.

Auf den vom Anfang dieses III. Teiles abgeleiteten
Zusammenhängen ergibt sich dafür

$$G = \frac{2 \cdot r_s}{Fr^2 \cdot \frac{b \cdot T}{R^2}} \quad \text{Es sind wieder nur}$$

Parabeln im $r_s - Fr$ -Diagramm. Auf die einfache
numerische Auswertung wird hier verzichtet. Es sind
vier G -Werte als Konstante in die Arbeitsblätter
eingetragen worden und zwar $G = 0,25; 0,5; 1,5; 3,5$.
Die entsprechenden ganzen Werte. Bei ebenfalls 4
 Fr - (Fr -) Werten, und zwar $Fr = 0,75; 1,25; 1,75$ und $2,25$
sind die zugehörigen r_s -Werte und Wirkungsgrade

abgelesen.

Nun muß man noch die Zusammenhangs zwischen r_n und π finden. Es ist definiert worden

$$\pi = \frac{v_e}{u} = \frac{v_e}{2\pi \cdot n \cdot R_z}$$

auf $F_T = \frac{v_e}{\sqrt{g \cdot T}}$ stellt man $v_e = F_T \sqrt{g \cdot T}$ und auf

$r_n = n \sqrt{\frac{R_z}{g}}$ stellt man $n = r_n \sqrt{\frac{g}{R_z}}$.

Wenn man diese Ausdrücke in die Formel für π einsetzt, ergibt sich:

$$\pi = \frac{\sqrt{T/R_z}}{2\pi} \cdot \frac{F_T}{r_n}.$$

In Tabelle 12 sind die oben angegebene Überlegung für die Hängeseile A-B-C-D und in Tabelle 13 für die Seilketten G-H-I-J und K-L-M zusammengefaßt. Daraus ergibt sich der mittlere Wert für π von 0,5 bis 1,0. Die α_n -Winkel werden für diese π -Werte mit den Bildern 22 bis 32 abgelesen und in Bild 33, 34 und 35 über π aufgetragen. In diesen Kurven kann man für die erforderlichen - in Tabelle 12 und 13 angegebenen - π -Werte interpolieren und die zugehörigen α_n -Winkel ablesen. Die Winkel α_n sind in Tabelle 14 für A-B-C-D, in Tabelle 15 für G-H-I-J und in Tabelle 16 für K-L-M mit η verglichen. Auf der Skizzenzahl der Winkel muß jetzt ein Zusammenhang mit den zugehörigen Wirkungsgraden hergestellt werden. Aber wie? — Die Wirkungsgrade werden noch einmal sorgfältig der =

gestellt werden. Man kann ja die (reine und) Wirkungs-
grade bei gleichen F_T -Werten über σ vergleichen, was man
kann auf den Verlauf der Wirkungsgrade für einen
Effizienzwirkungsgrad über bestimmten Zufälligkeiten be-
trachten. Man sieht hier der Wirkungsgrad für bestimmten
Effizienzwirkungsgrade und bestimmten Zufälligkeiten?
In Bild 36 bis 39 ist η über σ aufgetragen für die 4
 F_T -Werte. Man sieht davon, dass die Wirkungsgrade mit
steigendem Effizienzwirkungsgrad abfallen. Ferner liegt (M)
immer - fast über den ganzen betrachteten Bereich -
am günstigsten, in dieser Reihenfolge danach verläuft (A)
(außer für $F_T = 0,75$ (Bild 36)). (K) und (G) liegen immer
sehr nahe beieinander, sind aber die ungünstigsten. Danach für
(D) können in dem nächsten Bereich verlaufen, anschließend
hin bei den folgenden von (K) und (G). Das sind Erkenntnisse,
die man auf den Bildern n 1, 2 und 3 (Teil I) und auf den
Orientierungsbildern Bild 2, 3 und 4 (Teil II) zusammen-
rücken. Mit zunehmendem Frägen fällt der Wirkungsgrad
(A-B-C-D). Das Verhalten des Frägers verläuft den
Wirkungsgrad (G-H-I-J und K-L-B-M). Allerdings
bleiben (I) und (J) sehr nahe beieinander, vielleicht ein
Anzeichen dafür, dass die nur geringe vorhandene Frägen-
leistung bei (I) und (J) ein Optimum hat. Allerdings
bringt eine Aufrechterhaltung des Frägers in
den von Voelckel betrachteten Bereichen immer
Wirkungsgradgewinn: (G-K beide fluss!), über H-L,
I-B und J-M. Diese Verhältnisse kann man ad indi-

miten fortsetzen. Auf demselben Gebiet kommt man bei Betrachtung der Bilder 40 bis 43, in denen die Wirkungsgrade bei gleichem σ über F_T aufgetragen sind. Das sollen diese Kurven zu mit den Winkeln α in Zusammenhang gebracht werden.

Zieht man nun eine Betrachtung zum idealen Wirkungsgrad η_{id} , der in den Bildern eingetragene ist. In Bild 44 ist die Formel angegeben, nach der η_{id} berechnet läßt. Diese Formel, die ganz allgemein für alle Proportionsmittel gilt, ist nun als nicht ganz vollständig zu betrachten. Aber ein Vergleich mit der für η_{id} nicht mehr eingetragenen Kurve kommt ergibt, daß die Verlauf von η_{id} über σ nicht wesentlich ändert. Die Kurve für $F_T = 0$ (0,50) bleibt liegen. Die Kurve für $F_T = 4$ im wesentlichen auf. Die anderen F_T -Werte rücken sehr aufwärts. Es ändert sich also nicht wesentlich an der notwendigen Folgerung, daß die Proportionsmittel mit zunehmender Eintrittsgeschwindigkeit v_e und niedrigeren Geschwindigkeitsgrad abhängig über dem idealen Wirkungsgrad liegen! Eine Erklärung mag sein, daß der Lufteintritt die Luftdichte auf dem Wasser herabsetzt, während der Austritt die σ größer sind, als das für die Dichte auf einem Wasser voraussetzt. Das führt, daß die Wirkungsgrade kleiner werden, als in den Bildern 36 - 43 eingetragen.

Das nun zu den Winkeln. Nach der hier mit mehreren Inhaltstücken zusammengefaßt =

nimm über Änderungen der erfindenen Einflußfunktion
 müßte man sich Regeln bei Vergleich der Winkel mit
 den Tabellen 14, 15 und 16 finden können. Was das ich
 nicht gelingen. Denn man ist sich immer im Klaren
 sein muß, daß die für gegebenen Konstruktions-
 qualitativen Flüsse zu lassen, findet man in einigen
 Fällen Gesetzmäßigkeiten, wenn man die Winkel-zum
 Beispiel für Eintritt U.K. - vergleicht, dann sind oft =
 Konstruktions. Mit den Winkeln anderer Konstruktions-
 geinen Regelmäßigkeiten sind mir zufällig zu sein.
 Es ist also nicht möglich, eine Konsequenz der Möglichkeit
 von Ein- oder Austritt irgendwelcher Konstruktions-
 finden. Auf der Vergleich der negativen α zwischen den
 Rändern ist ebenfalls gelingend. Denn wenn man den
 Gedanken aufgibt, mit diesem Vergleich auf die
 Möglichkeit einzelner Konstruktions- und -stellungen
 für das ganze Abschnittsgesamt der Rand zu prüfen
 zu wollen und die Gesamtheit der Winkel α oder
 6 Konstruktionsstellungen „gleichberechtigt“ in Betracht zu
 ziehen, indem man die Winkel für die
 6 Konstruktionsstellungen bildet und diese Räume dann
 mit den zugehörigen η -Werten für G und F, zwischen
 den Rändern vergleicht, so stellt man die geringste
 Änderung. Es ist natürlich nicht strengfertig, die nega-
 tiven α -Winkel abgezogen, dann die Vergleichen
 geben für die Lage in Bezug auf die Konstruktions-
 an. In diesen Fällen subtile Abschlüsse, wenn es

Winkel $\alpha_n \neq 0!$ Es werden also für die Kurven der Oberflächentypen von α_n ($\sum |\alpha_n|$) gemacht. Die Tabelle 17 stellt $\sum |\alpha_n|$ und die zugehörigen Wirkungskorden η zusammen. Die Überlegt wird wieder auf die geographische Darstellung hingewiesen. Es bestätigt sich die Annahme, daß bei großer Winkelkurve der Wirkungskorden kleiner wird. In Bild 45, 46, 47 und 48 ist für die 4 Φ -Werte 0,75; 1,25; 1,75 und 2,25 für die entsprechenden Θ -Werte 0,25; 0,5; 1,5 und 3,5 die Winkelkurve $\sum |\alpha_n|$ über η aufgetragen. Auf der rechten Seite erkennt man sofort, daß die Änderung der -abstände reaktionsgemäß stark variieren - Punkte von rechts unten nach links oben geht, das heißt: bei kleiner Winkelkurve große Wirkungskorden, bei großer Winkelkurve kleine Wirkungskorden. Auf der linken Seite ist die Richtung, wenn man die Punkte der Kurve bei gleichem Θ verbindet.

Die „vollständigen“ Kurven \textcircled{G} und \textcircled{K} geben teilweise die größten Winkelkurven, \textcircled{I} und \textcircled{J} liegen auf der rechten Seite. Das ist \textcircled{A} und \textcircled{M} nicht ganz so gut, ist bedauerlich. Es ist ja eine qualitative Beschreibung! Am Anfang ist aber darauf hingewiesen worden, daß die die gesamte Kurve G-H-I-J und K-L-B-M besser für die Winkelkurvenführung eignen, weil der Wirkungskorden gleich ist, als die Wirkungskurven A-B-C-D, bei der auf die von links zu rechts im absteigenden zunehmenden Diagramm

beeinflussungen über aufhalten sind. Es ist nötig zu erklären, daß - besonders ausgezogen bei $\sigma = 0,25$ - die Punkte A-C-D (B) gemäß der nötig zur $\sigma =$ (Zustimmung) deutlich sind der Richtung der übrigen Punkte gegenüberfallen. Das kann aber eine notwendige Unterstützung dafür angesehen werden, daß die getroffenen Beobachtungen die aufeinanderfolgenden Faktoren nicht vollständig berücksichtigt haben.

Als Ergebnis dieses Arbeit kann zu vermerken = heißt werden, daß in Teil I und II benutzten Arbeits- und Reagenzienlisten für den Vergleichswert der mit den Beobachtungen von Volpich und Bridge veröffentlicht werden. Im Teil III ist gezeigt worden, wie die geeigneten Kenngrößen der Krümmungsverhältnis T/R_2 eliminiert werden konnte und gleichmäßig ist der Einfluß der Krümmungswinkel für die Arbeitsweise der Vergleichswerte erklärt werden. Die Erklärung der Zusammenhänge bei verschiedenen Krümmungswerten kann nur die neuen Befunde notwendig sein.

Zum Abschluß sei noch auf. Handelt es sich um Aufgabenerfüllung gedruckt. Ganz besonders dankbar = heißt aber auch den Einzigen, die dessen Anleitung und seine Beförderung in diesem Arbeit mit großer Freude an der Aufgabe genossen haben.

Wolfgang Müller

Literaturangaben:

[1] Volpich und Bridge „Paddle Wheels“

Transactions of the Inst. of Eng. and Shipbuilders in Scotld. 1955/56/57

[2] Gebers „Das Schaufelrad im Modellversuch“

Wien, Springer-Verlag 1952

[3] Krappinger „Schaufelradberechnung“

Forschungshefte f. Schiffstechnik Heft 6, 1954

[4] Rossell and Chapmann „Principles of Naval Architecture“

Vol. II p. 90

Form: dies nicht benutzte Literatur, ohne Zitiern =
unvollständig bei weiteren Arbeiten über Propellerbau
geben könnte:

Rob. Taggart „Paddle Wheel in Maritime History“

ASNE Journal Aug 1958 (unzufällig!)

Saunders „Hydrodynamics in Ship Design“

H.C. Sadler and Kirby „Design of Pass. Vessels on the Great Lakes“

Transactions SNAME Vol 33, 1925

K.E. Schoenherr „Propulsion and Propellers“

Principles SNAME Vol. II 1939

J.D. van Manen „Fundamentals of Ship Resistance and Propulsion“

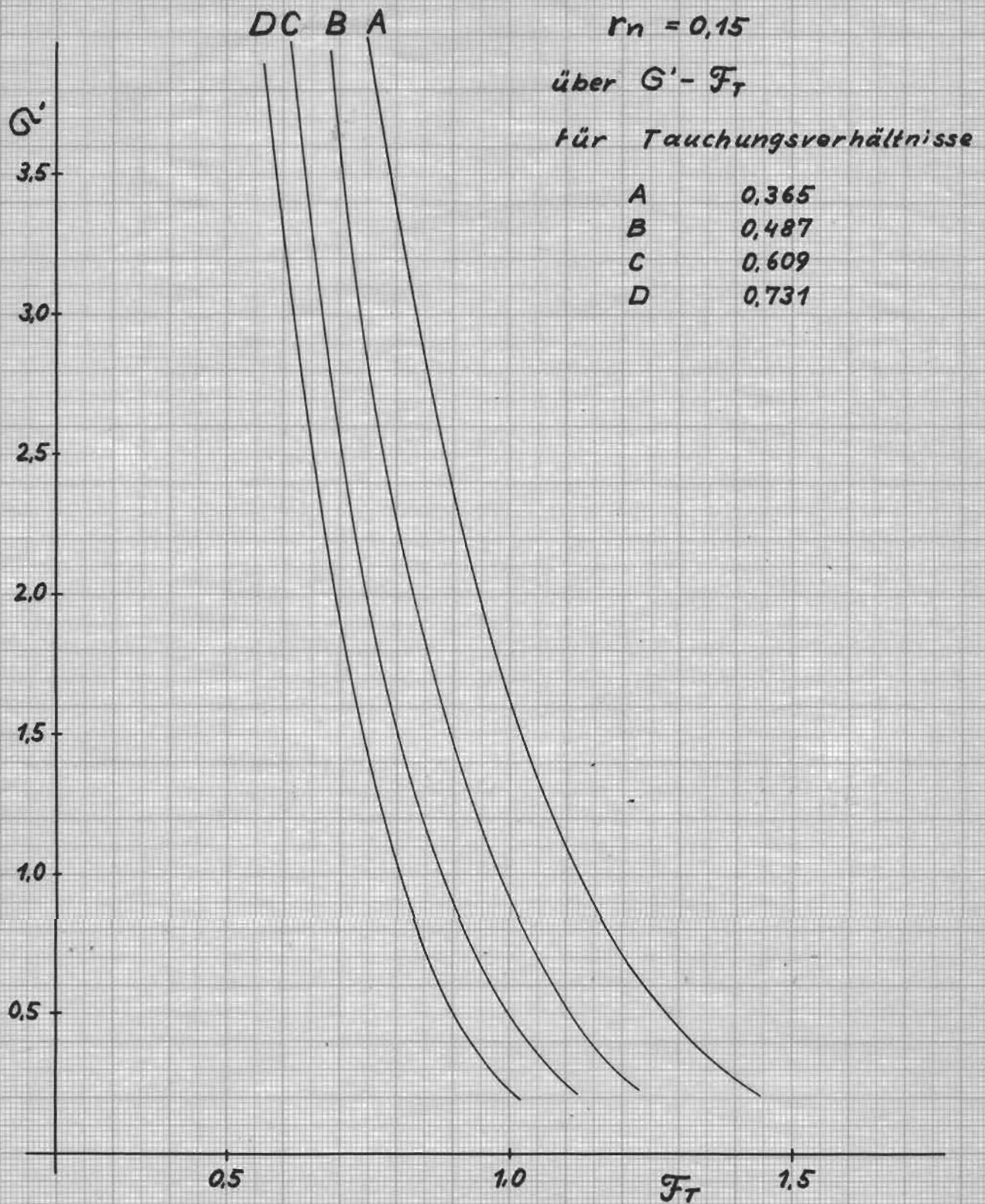
Intern. Shipbuilding Progress Vol 4 No 30 1957

Lied 1
4
5
8
9

} Illustration
Kroppinger

Lied 22 - 32

~ DINA 2



$$F_T = \frac{v_e}{\sqrt{g \cdot T}}$$

$$r_n = n \sqrt{\frac{R_z}{g}}$$

$$G' = \frac{S}{\rho \cdot v_e^2 \cdot b \cdot T}$$

$$I_s = \frac{S}{\gamma \cdot B \cdot T^2}$$

$$F_T = \frac{v}{\sqrt{g \cdot T}}$$

$$r_n = n \cdot \sqrt{\frac{R_z}{g}}$$

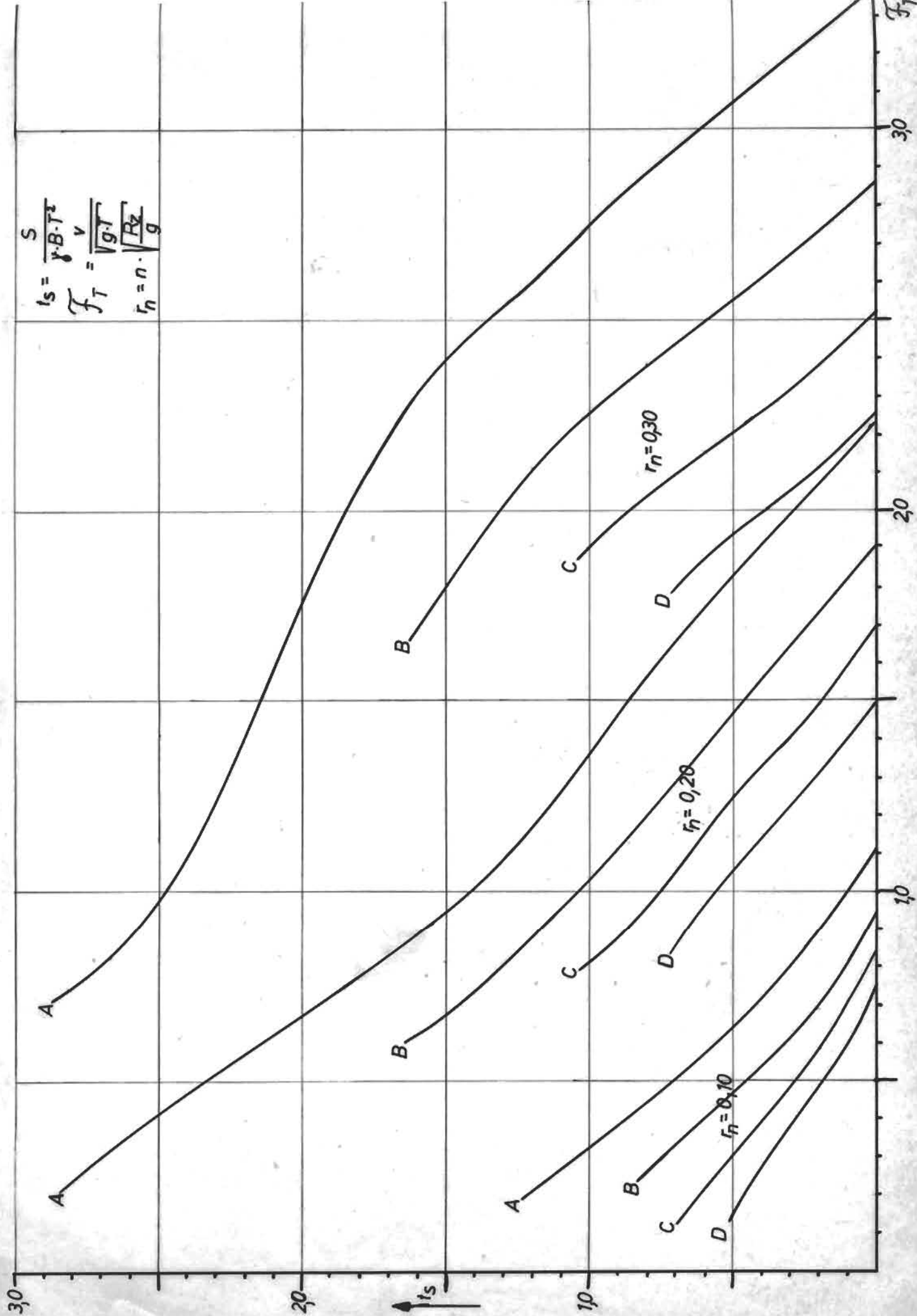


Bild 6

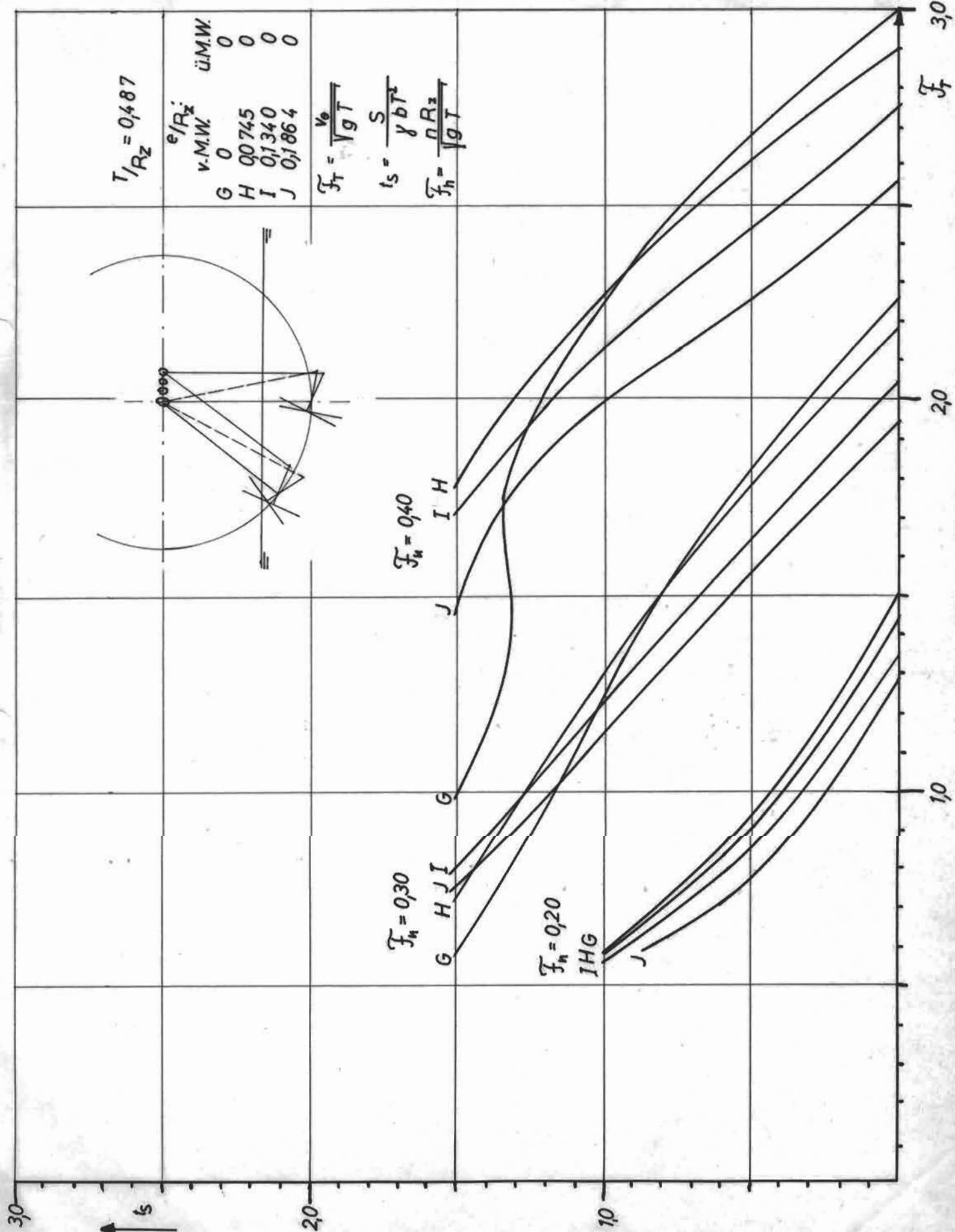


Bild 7

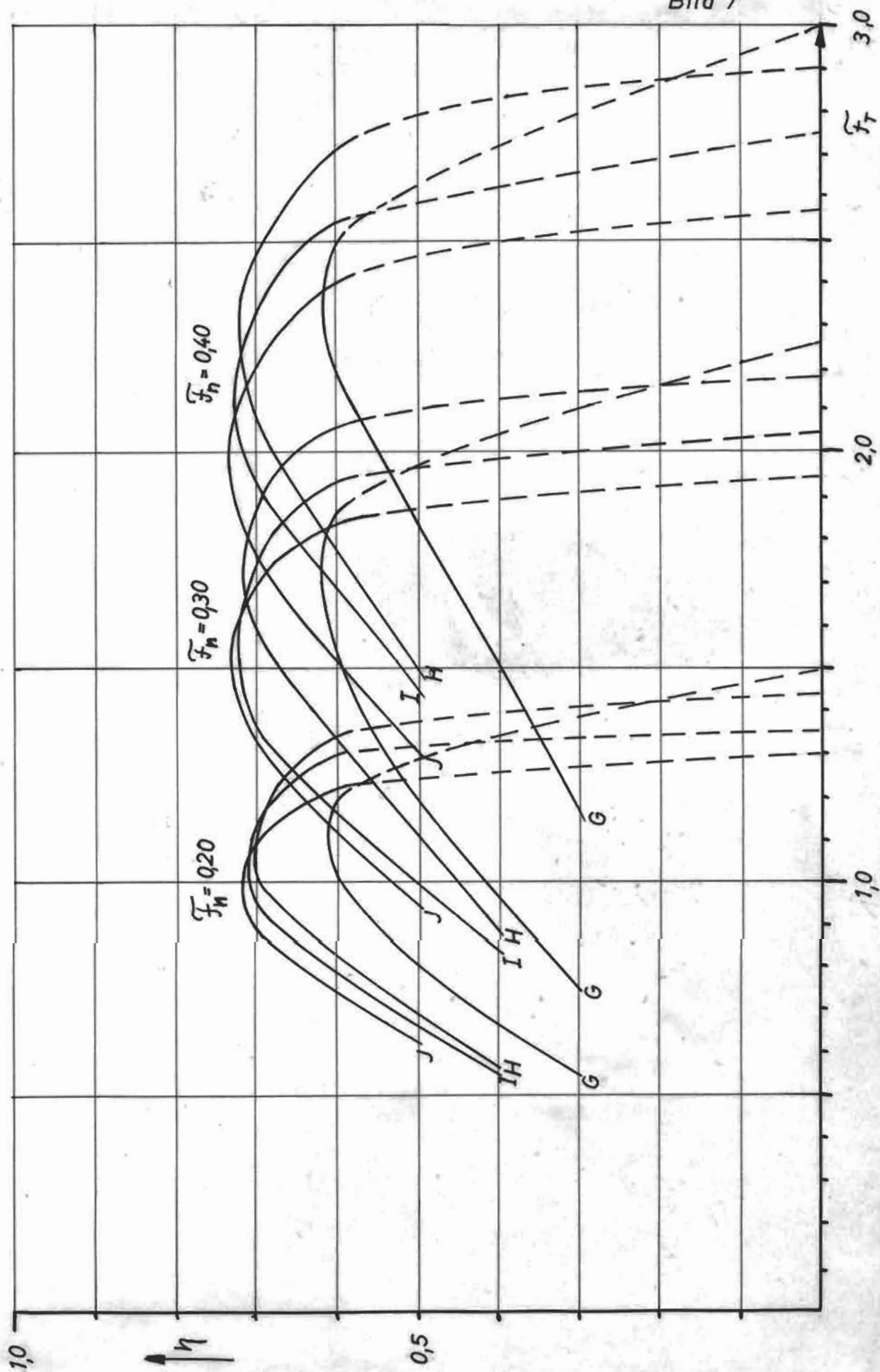


Bild 10

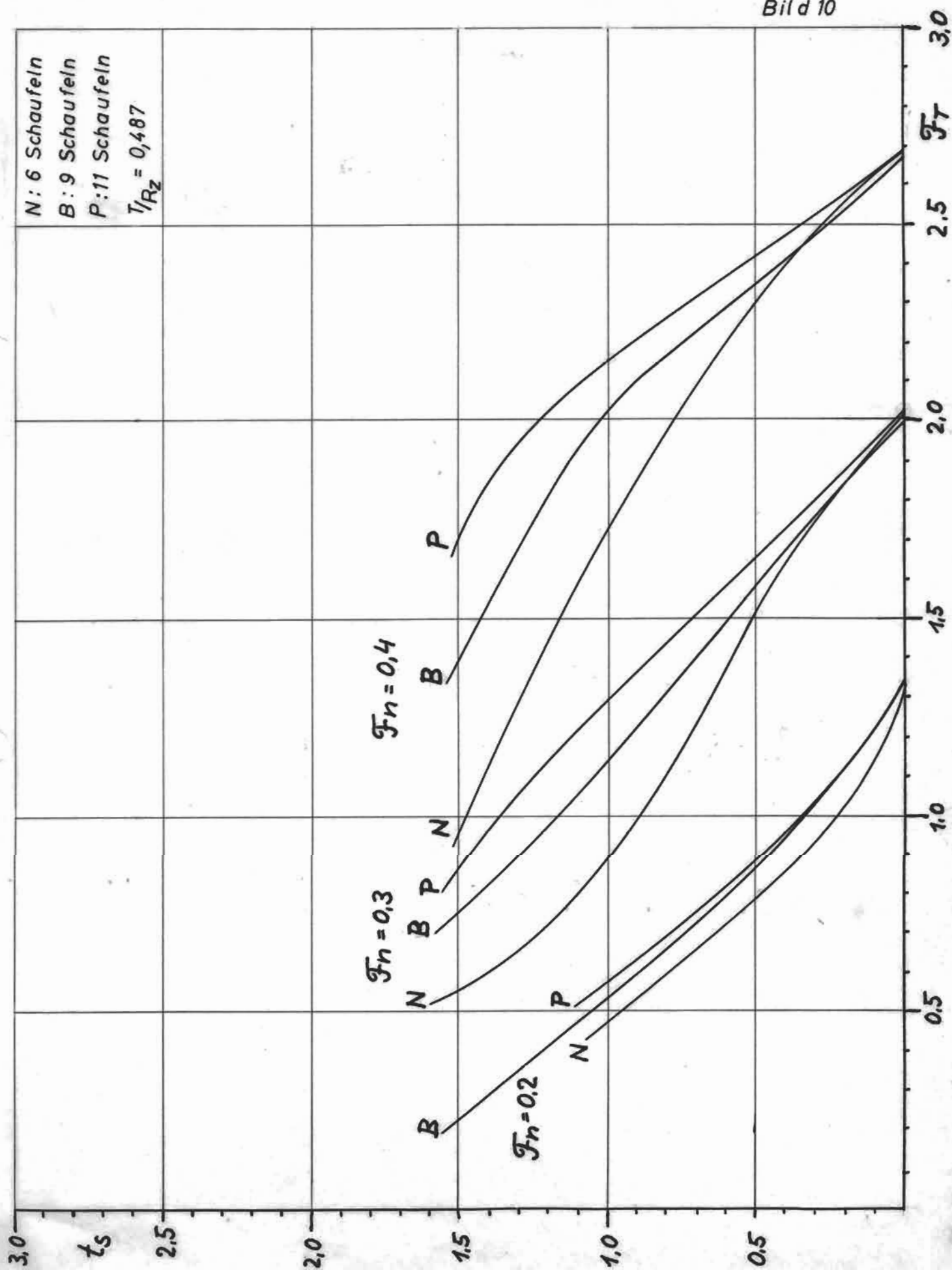


Bild 11

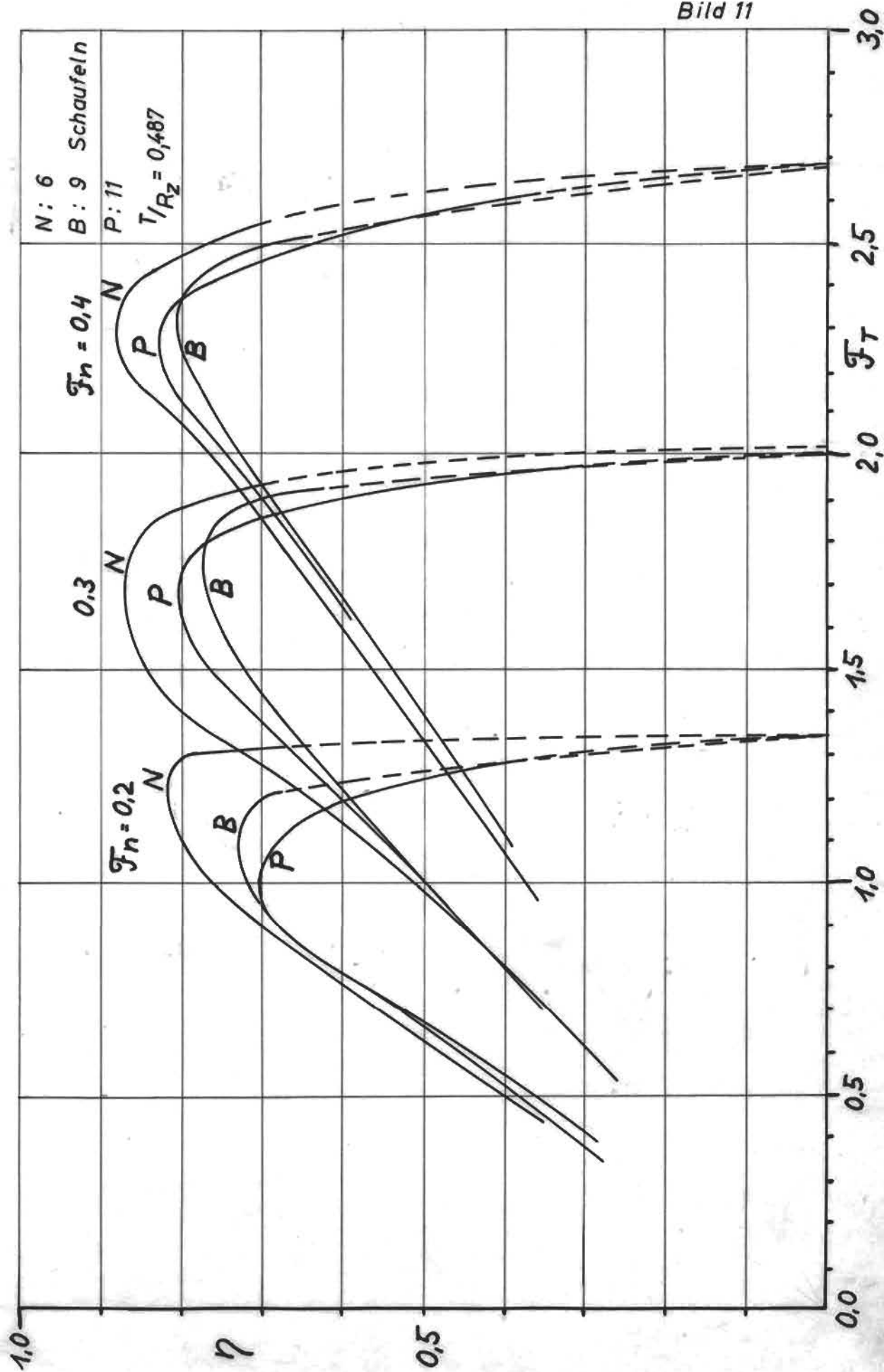


Bild 12

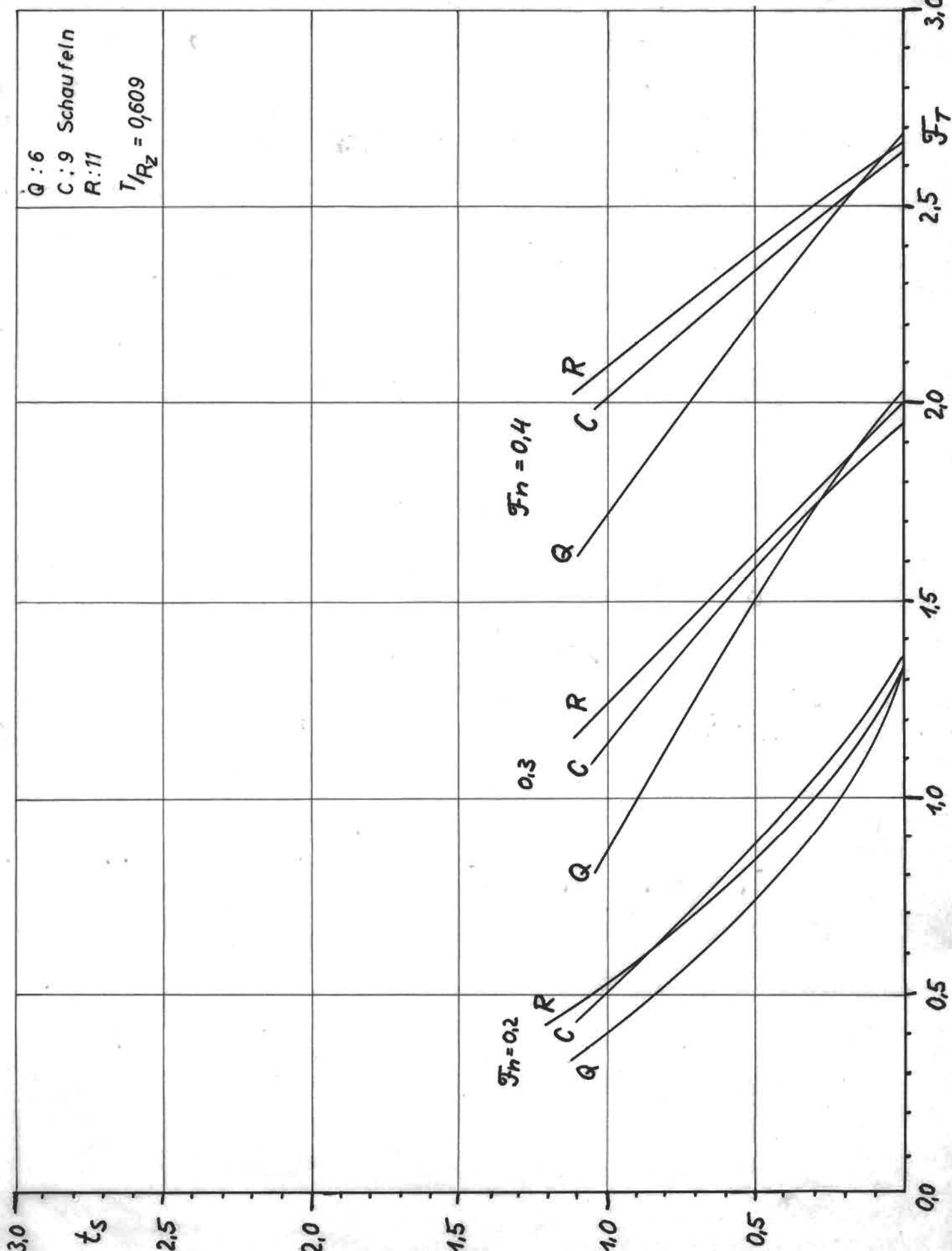


Bild 13

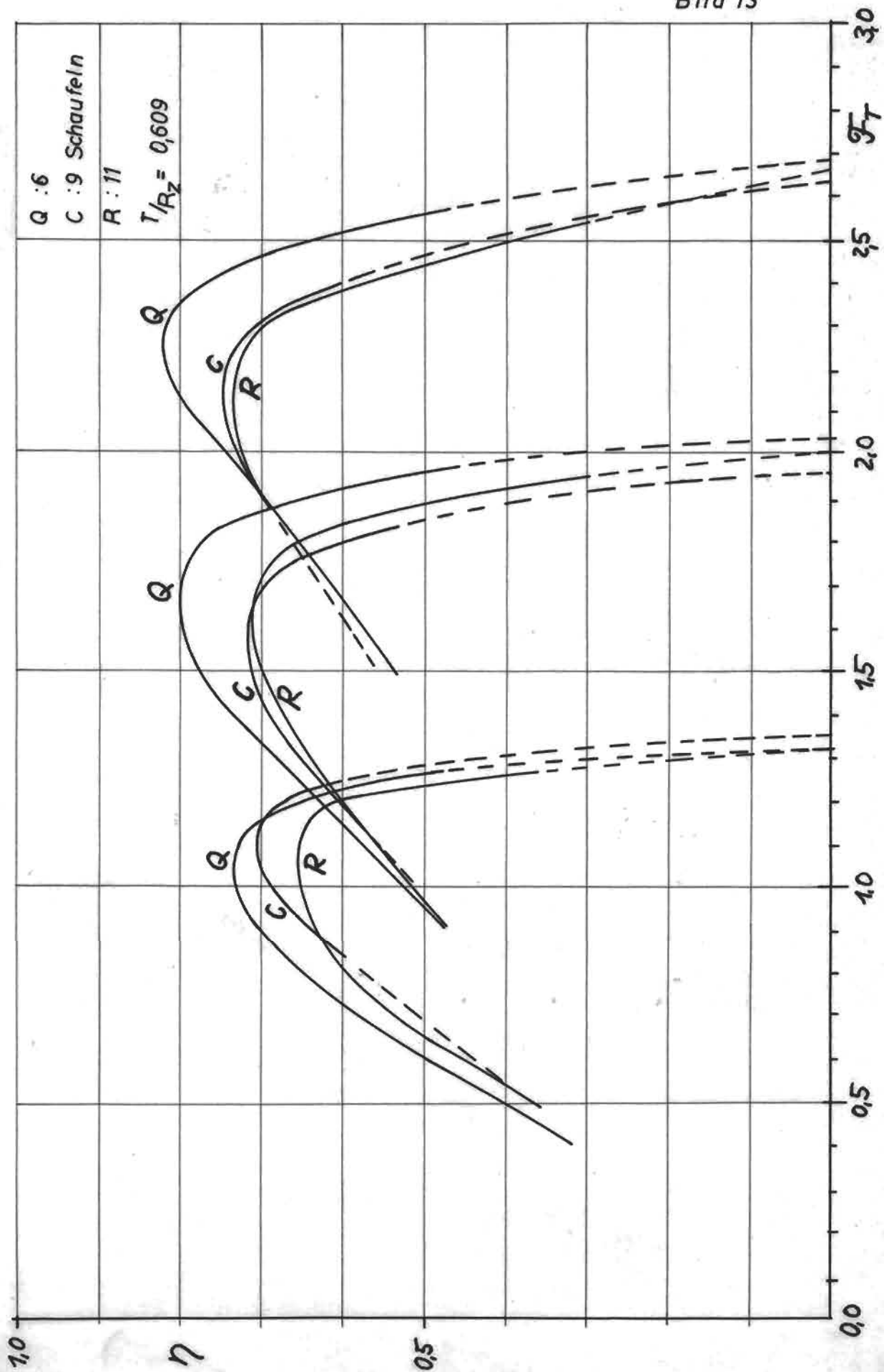
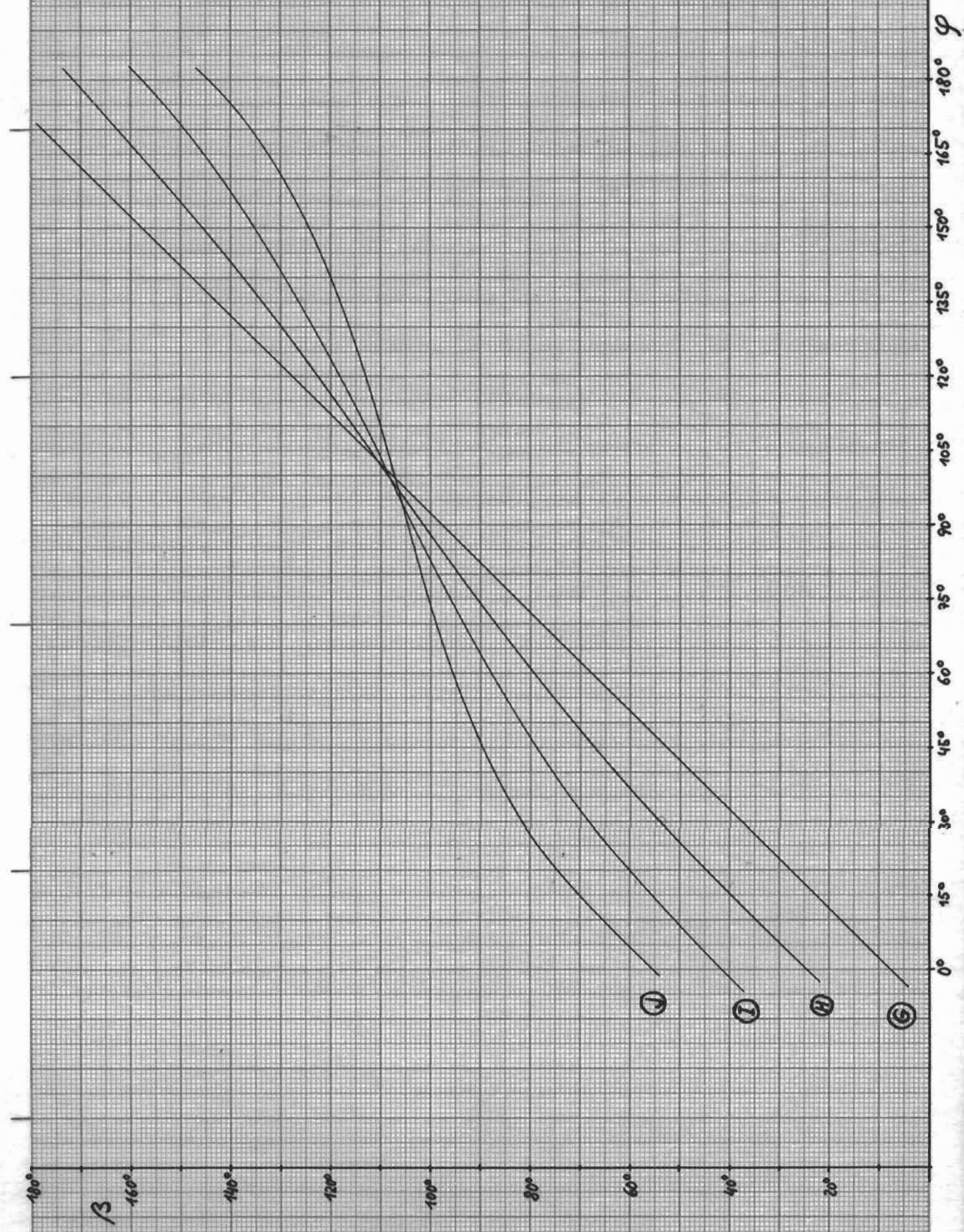
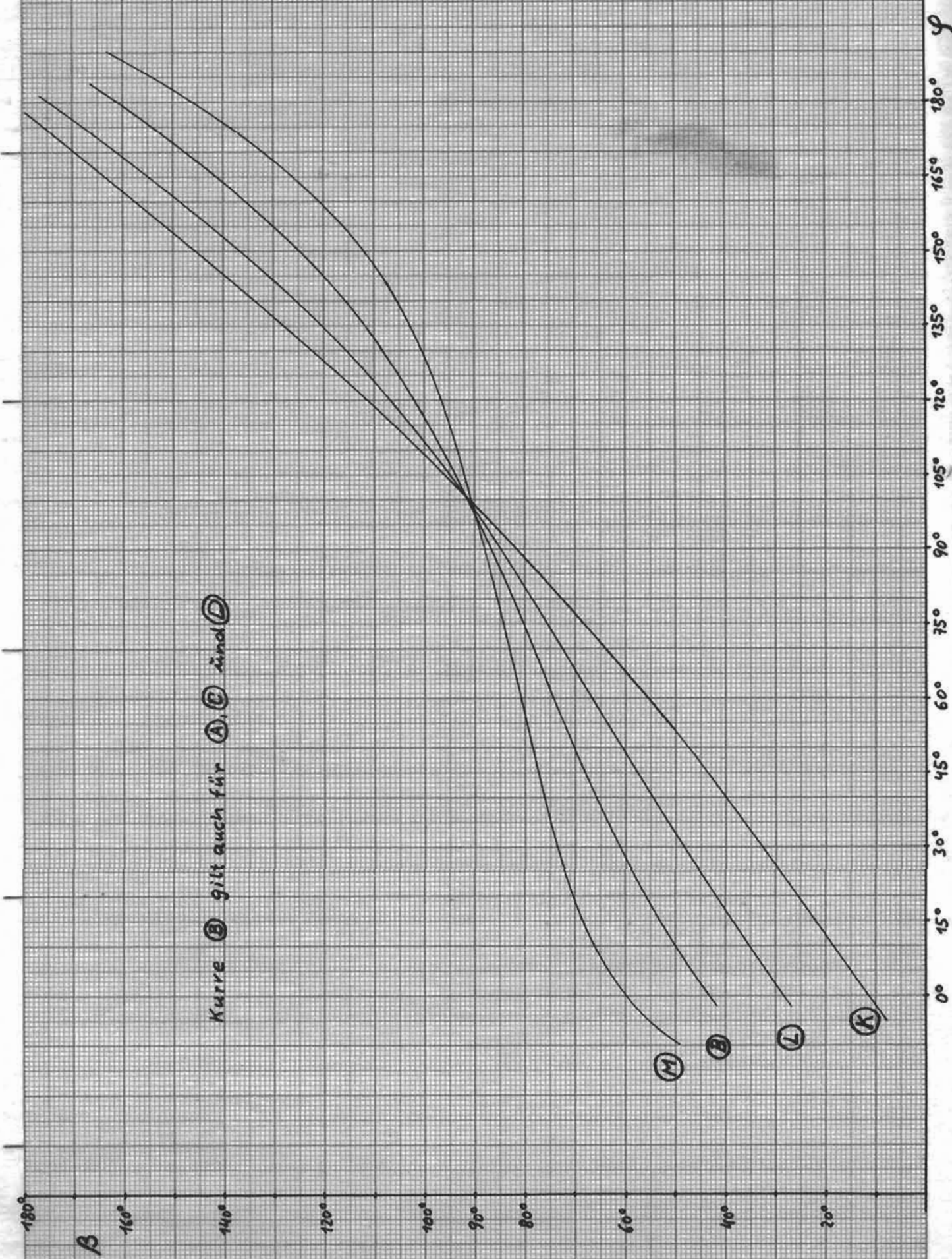
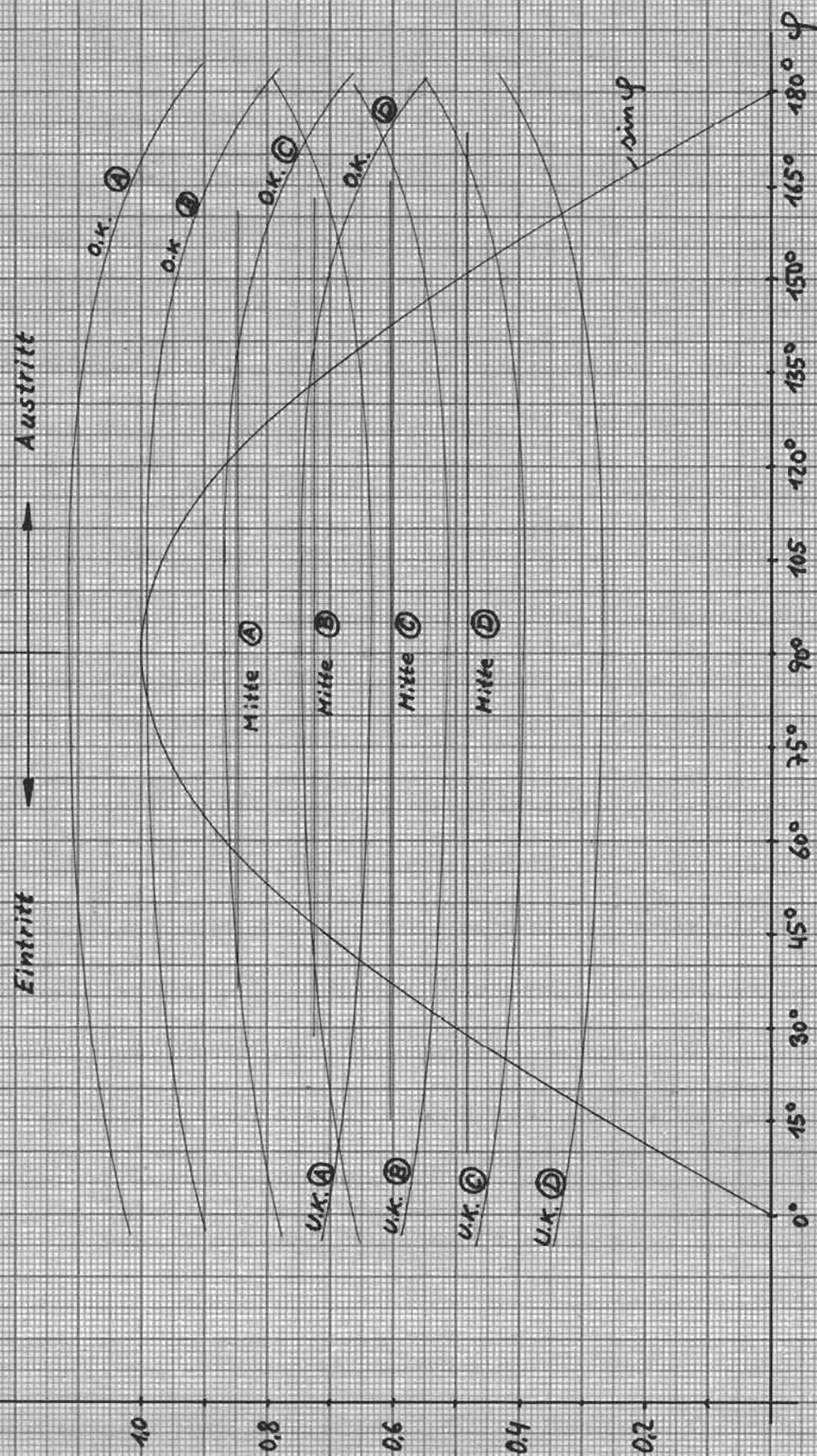
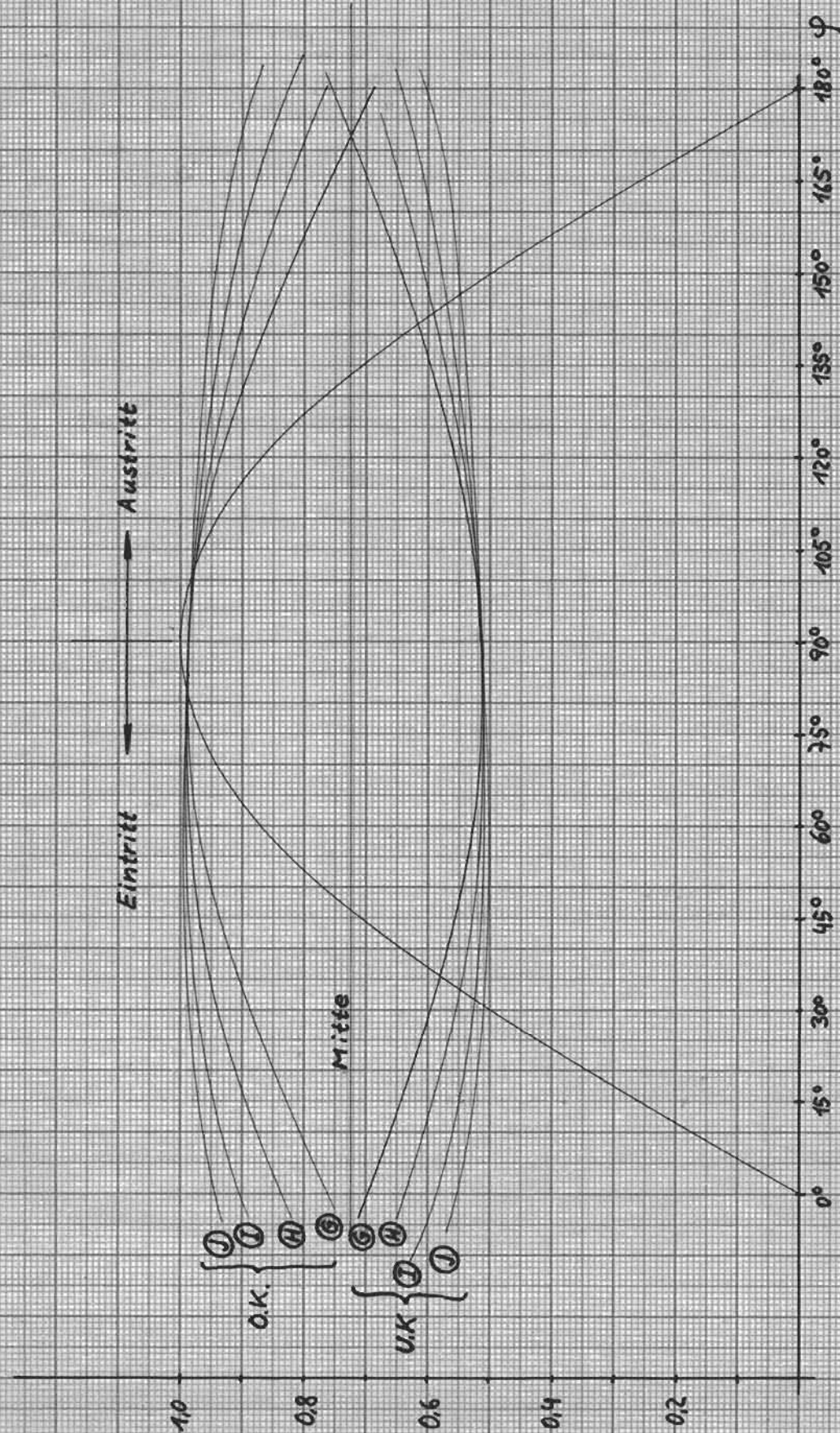


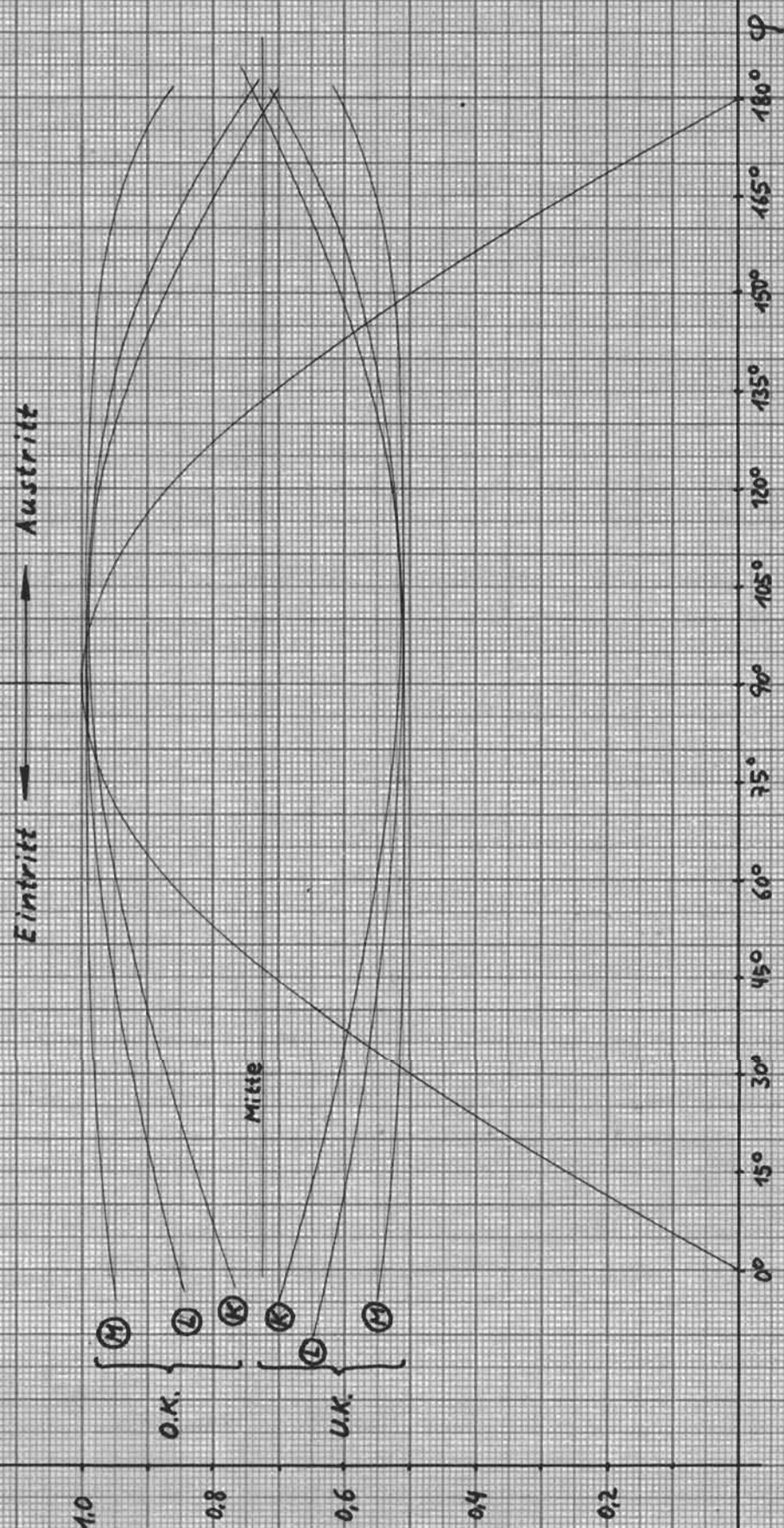
Bild 15











Winkel zw. res. Relativgeschw.
und Schaufel über λ

Exzenterlage 0.0745 u.
0.1340 u. Mitte Welle

α_λ 90° 80° 70° 60° 50° 40° 30° 20° 10° 0° -10° -20° -30° -40° -50°

(A)

$$\frac{I}{R} = 0.365$$

O.K. Schaufel
taucht nicht ein!

(B)

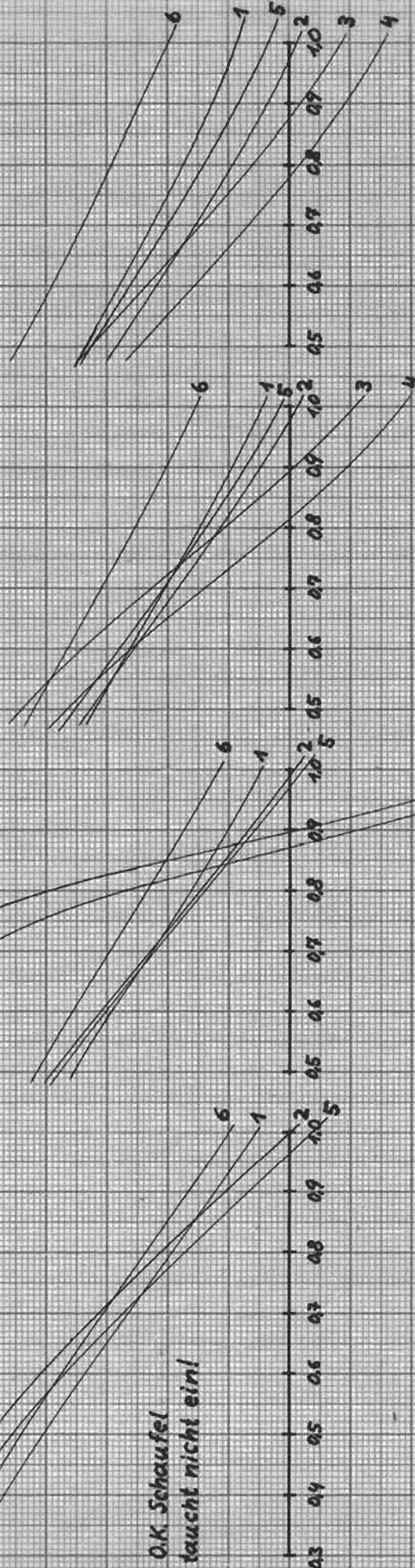
$$\frac{I}{R} = 0.487$$

(C)

$$\frac{I}{R} = 0.609$$

(D)

$$\frac{I}{R} = 0.731$$



- 1 Eintritt U.K.
2 Eintritt Mitte
3 Eintritt O.K.
4 Austritt O.K.
5 Austritt Mitte
6 Austritt U.K.

Winkel z. m. res. Relativgeschw. und Schaufel
über λ

$$\frac{I}{R} = 0.487$$

(G)

0.0 ü. Mitte Welle
0.0 v.

(H)

0.0 ü. M.W.
0.0745 v.

(I)

0.0 ü. M.W.
0.1340 v.

(J)

0.0 ü. M.W.
0.1065 v.

90° 80° 70° 60° 50° 40° 30° 20° 10° 0° -10° -20° -30° -40° -50°

0.6 0.7 0.8 0.9 1.0

0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 2

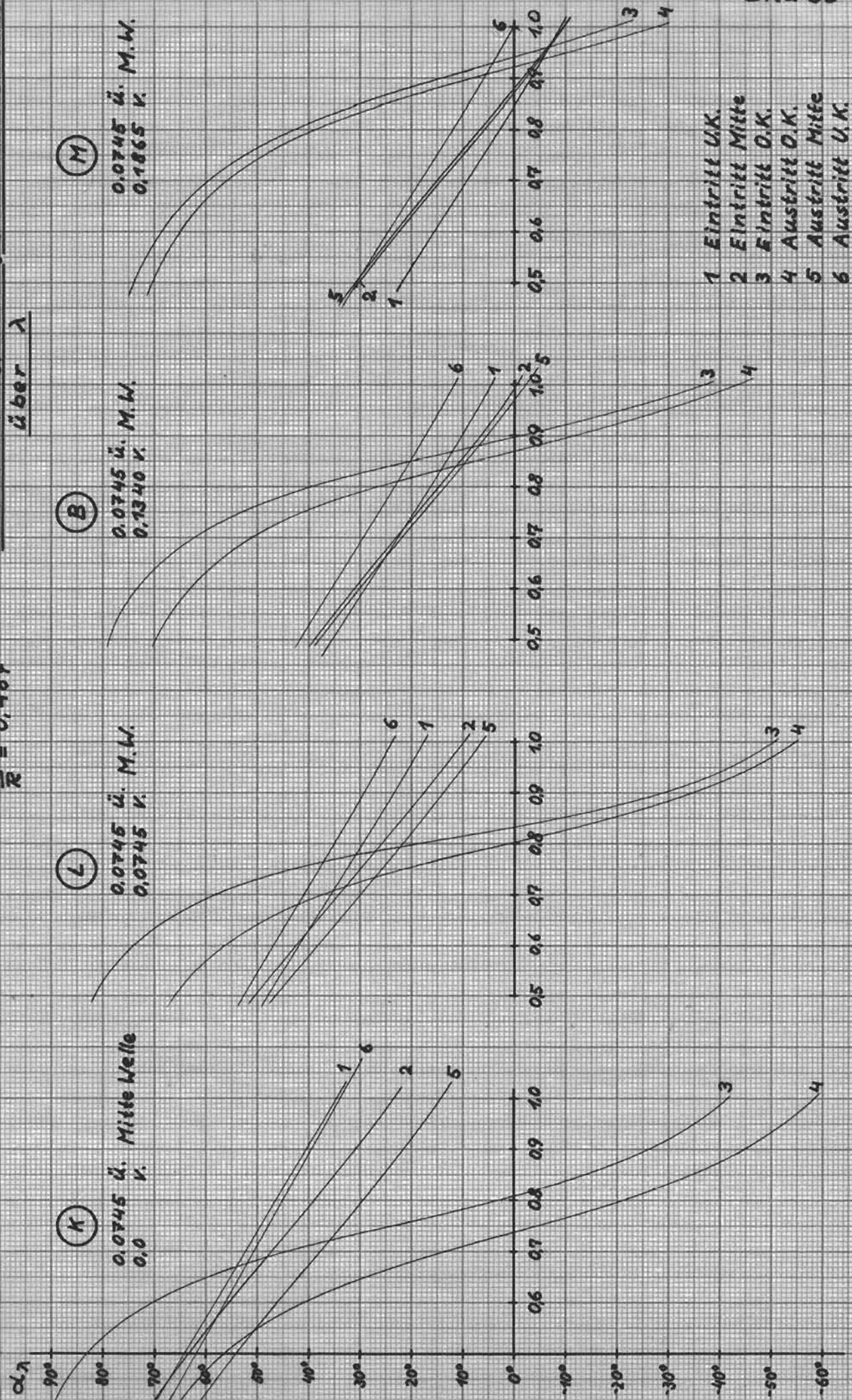
0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0

0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0

- 1 Eintritt U.K.
- 2 Eintritt Mitte
- 3 Eintritt O.K.
- 4 Austritt O.K.
- 5 Austritt Mitte
- 6 Austritt U.K.

Winkel zw. res. Relativgeschw. und Schaufel
über λ

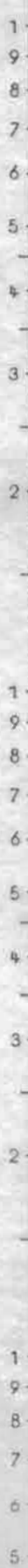
$$\frac{I}{R} = 0,487$$



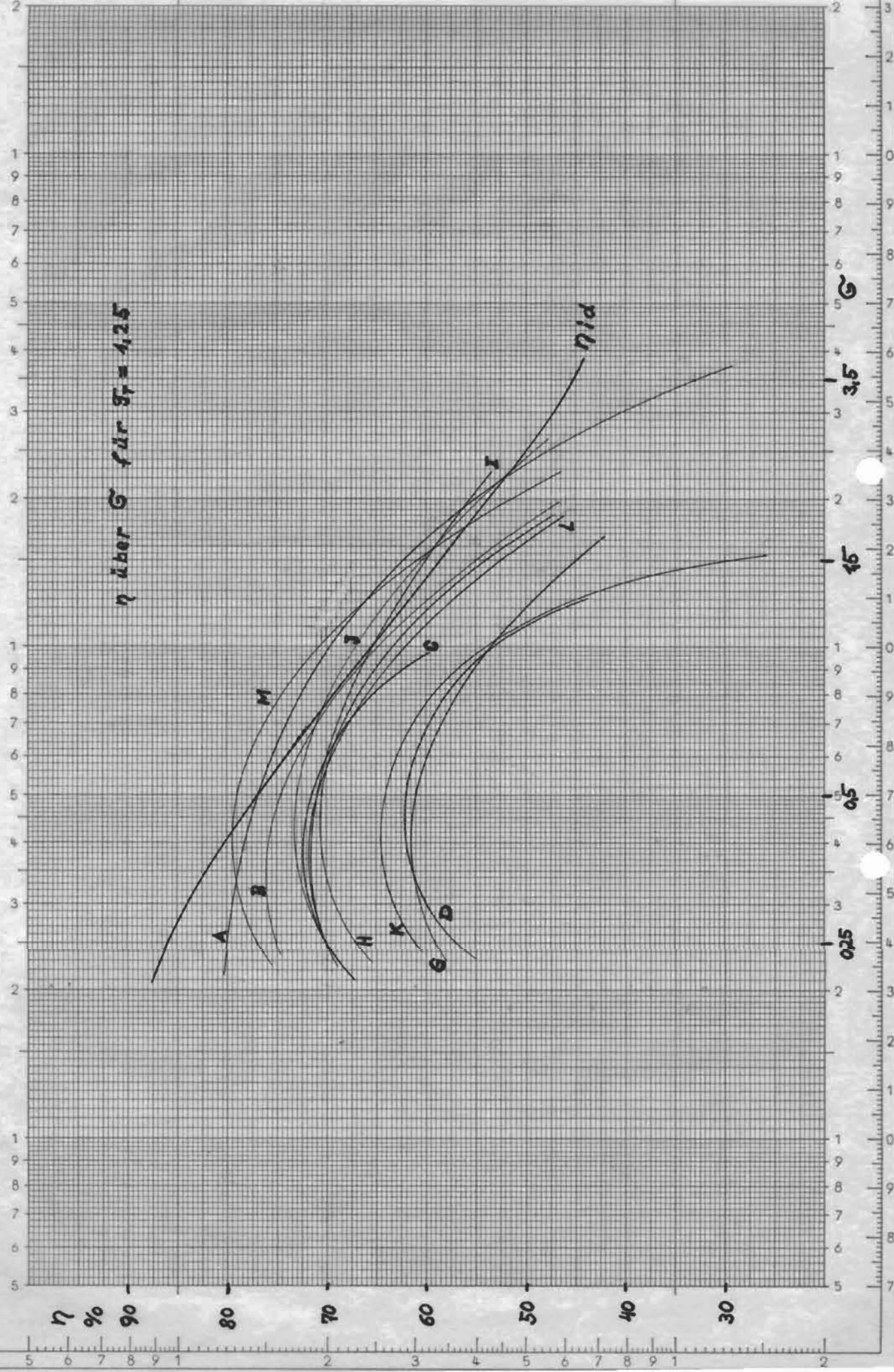
1
9
8
7
6
5
4
3
2

1
9
8
7
6
5
4
3
2

1
9
8
7
6
5



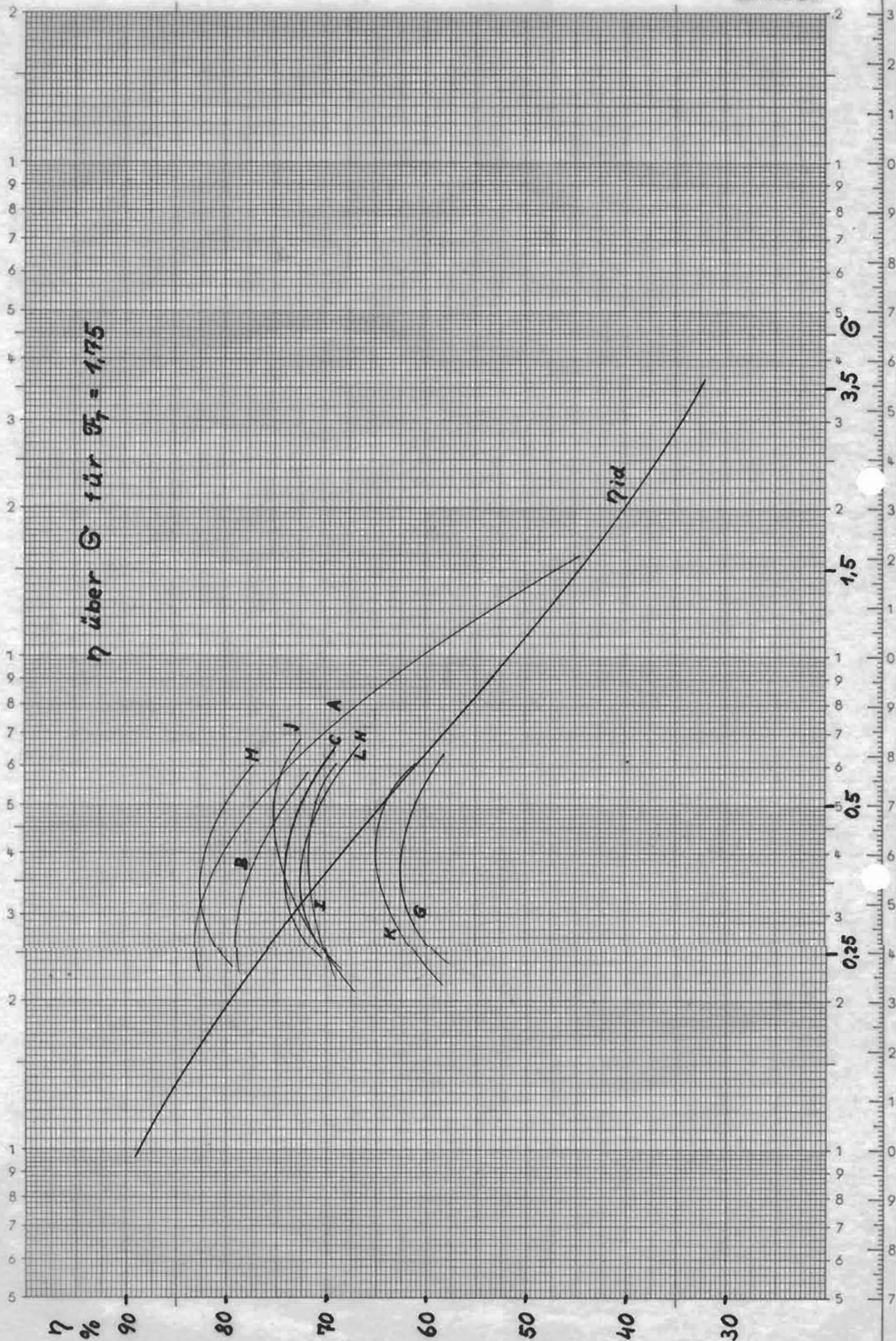
Yang



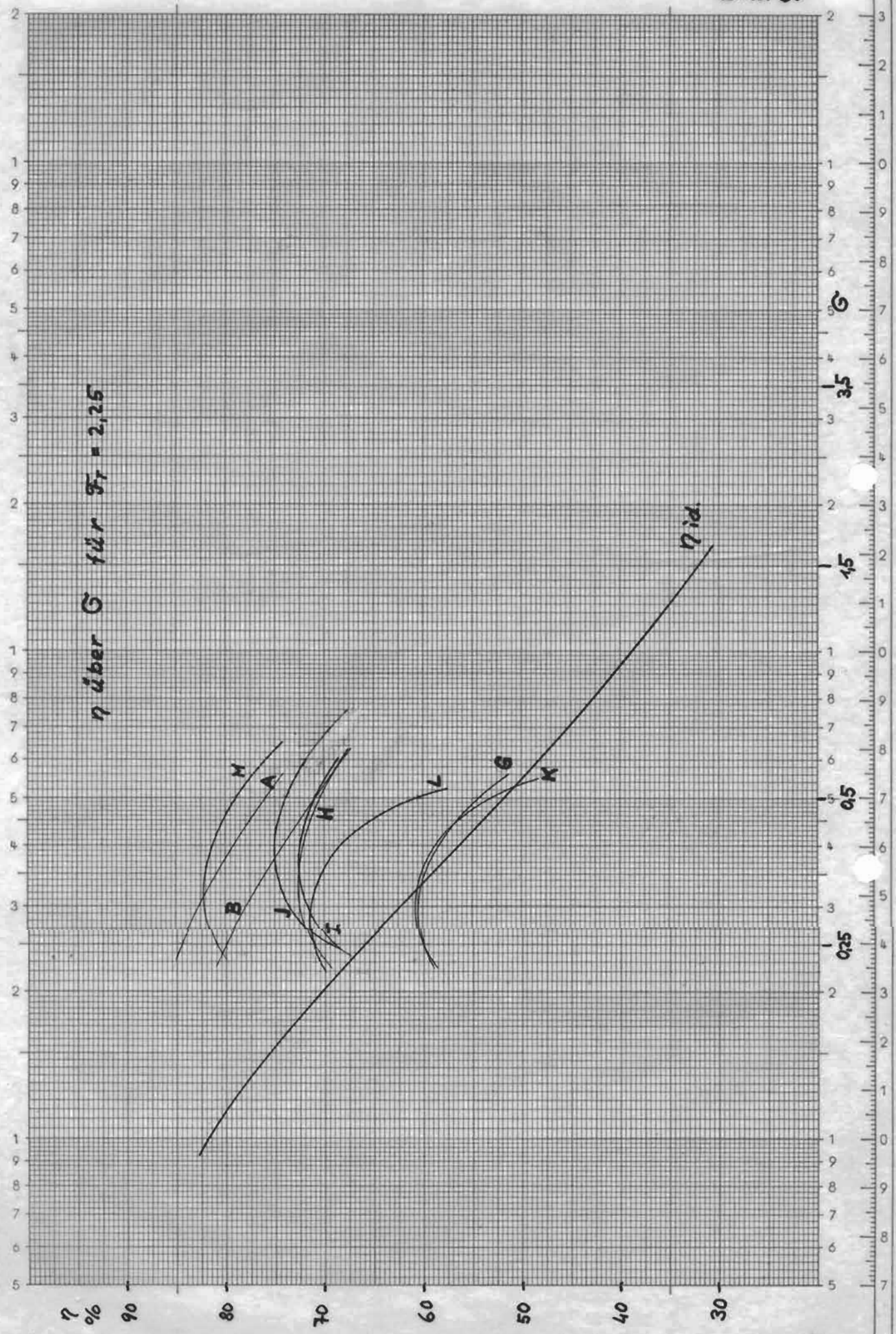
DIN A4
Nr. 8120T.
lin x log
Modul 100

früher

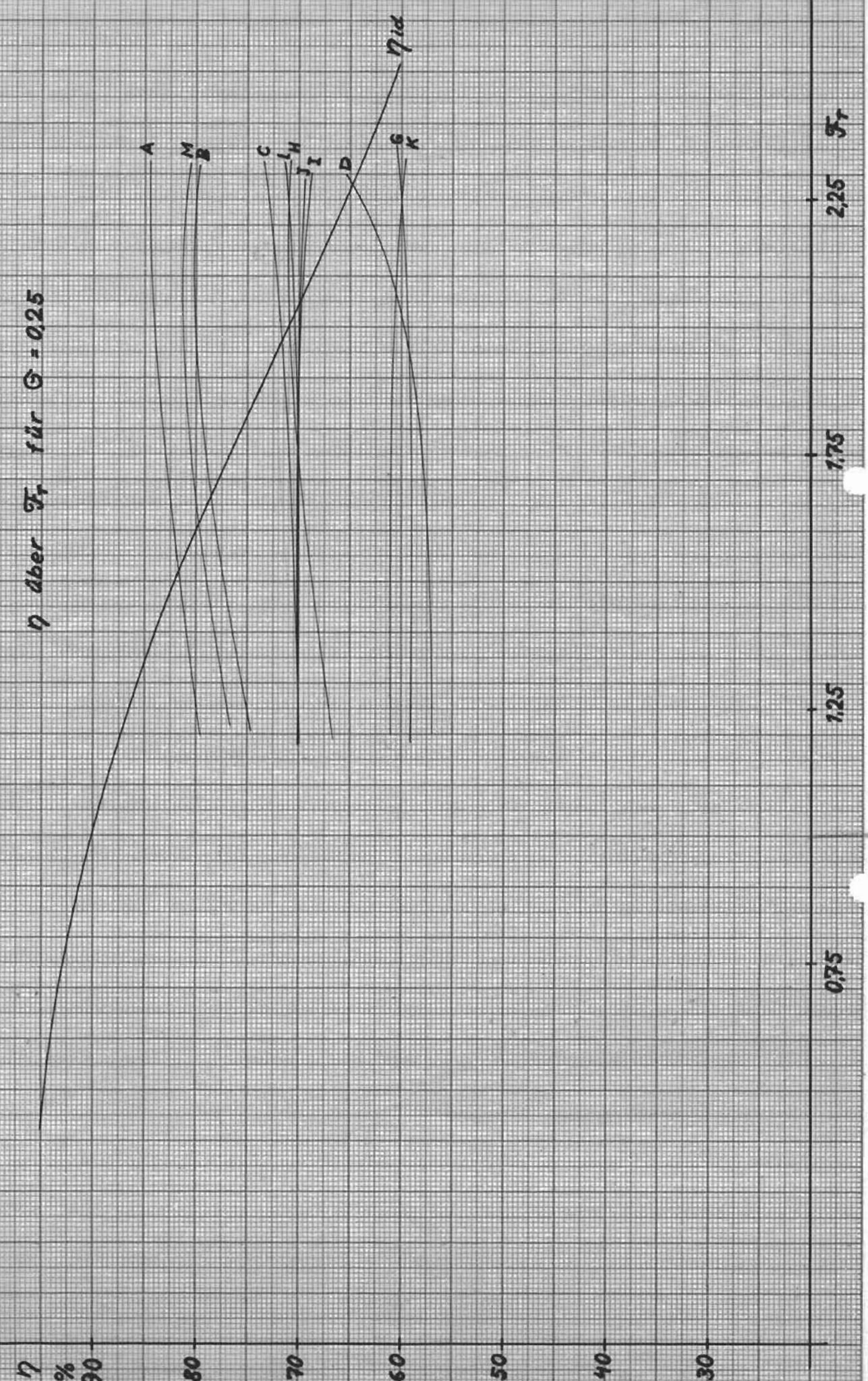
η über \dot{G} für $F_r = 1,75$

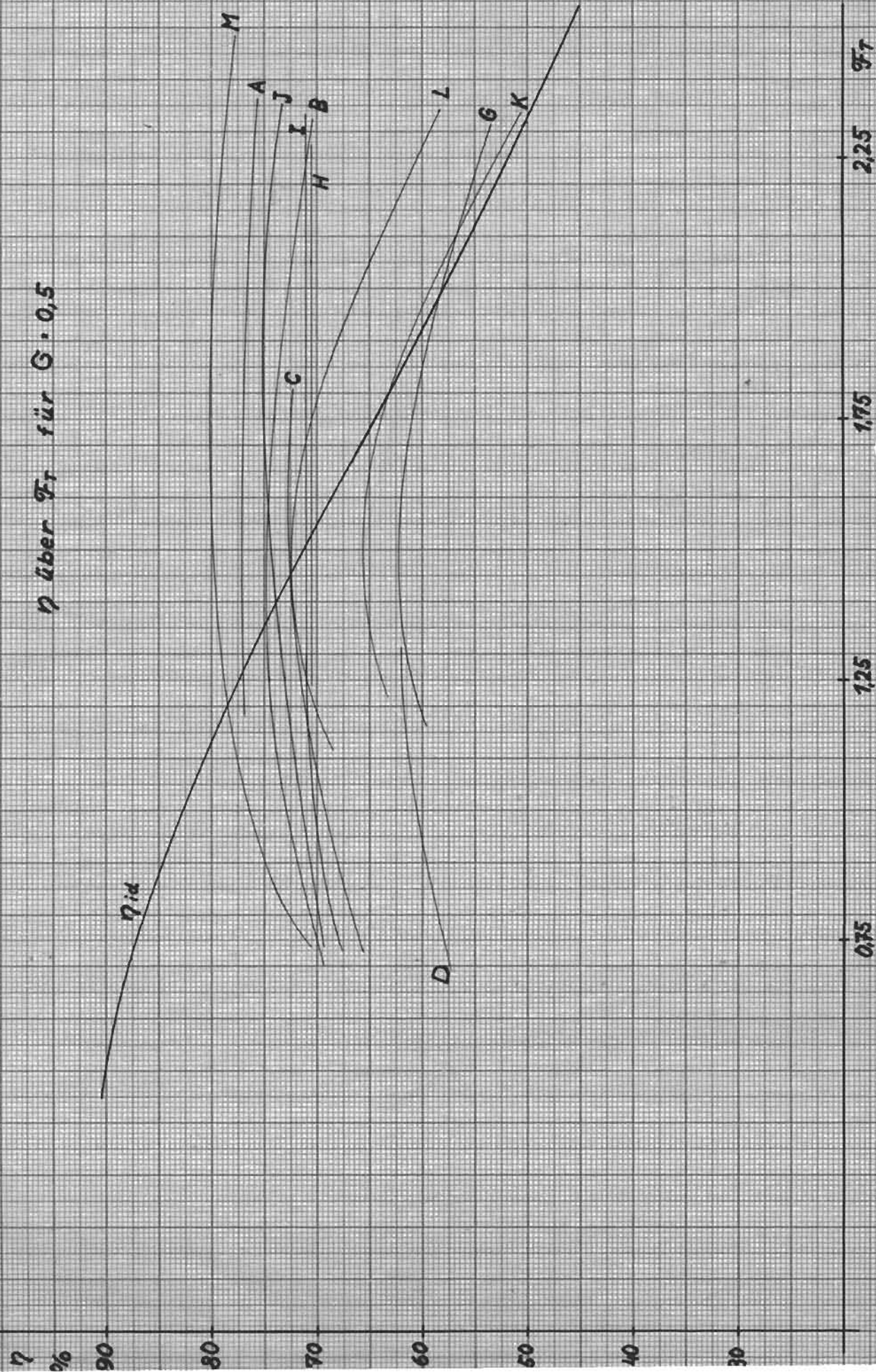


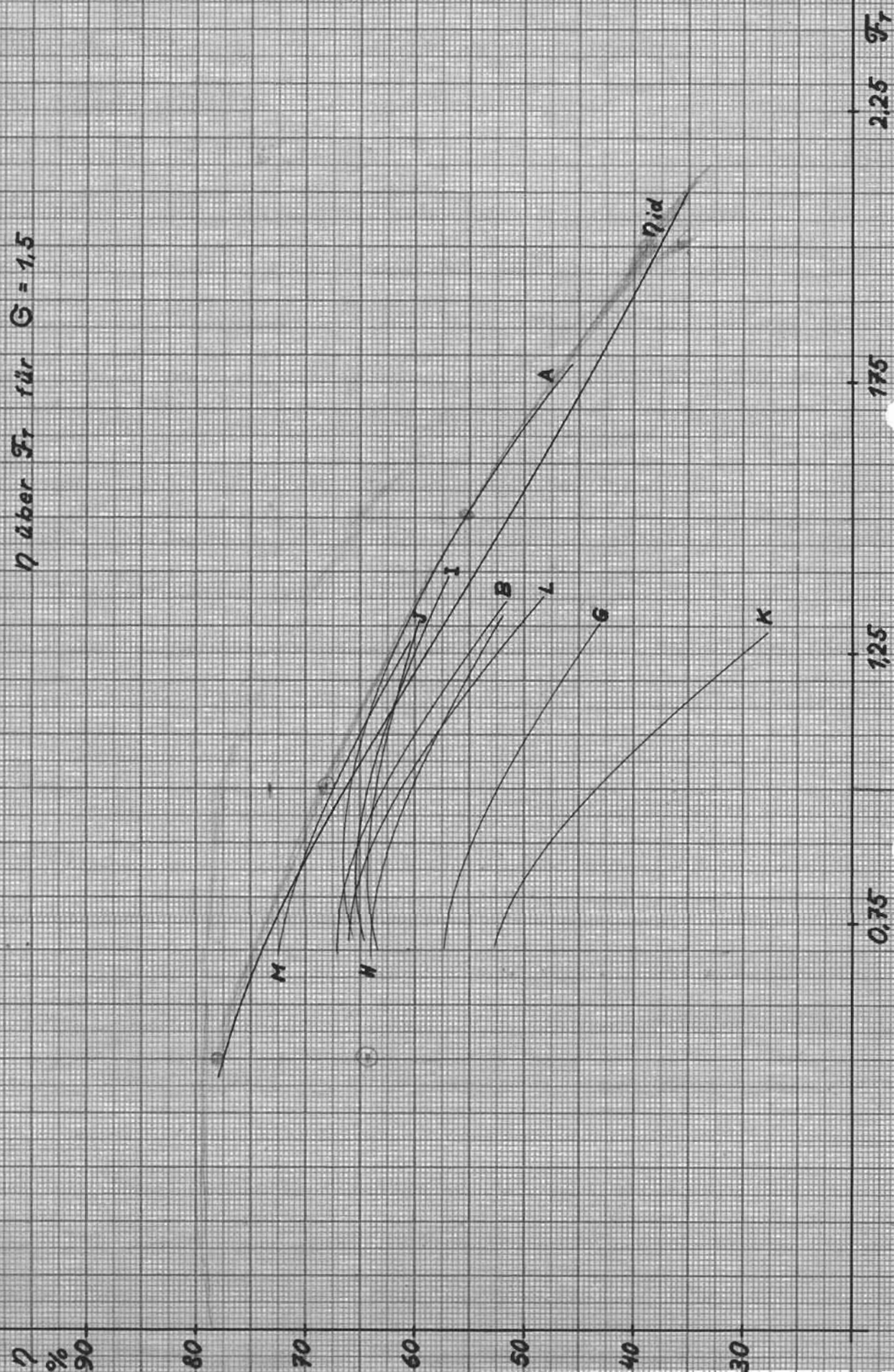
η über G für $Fr = 2,25$



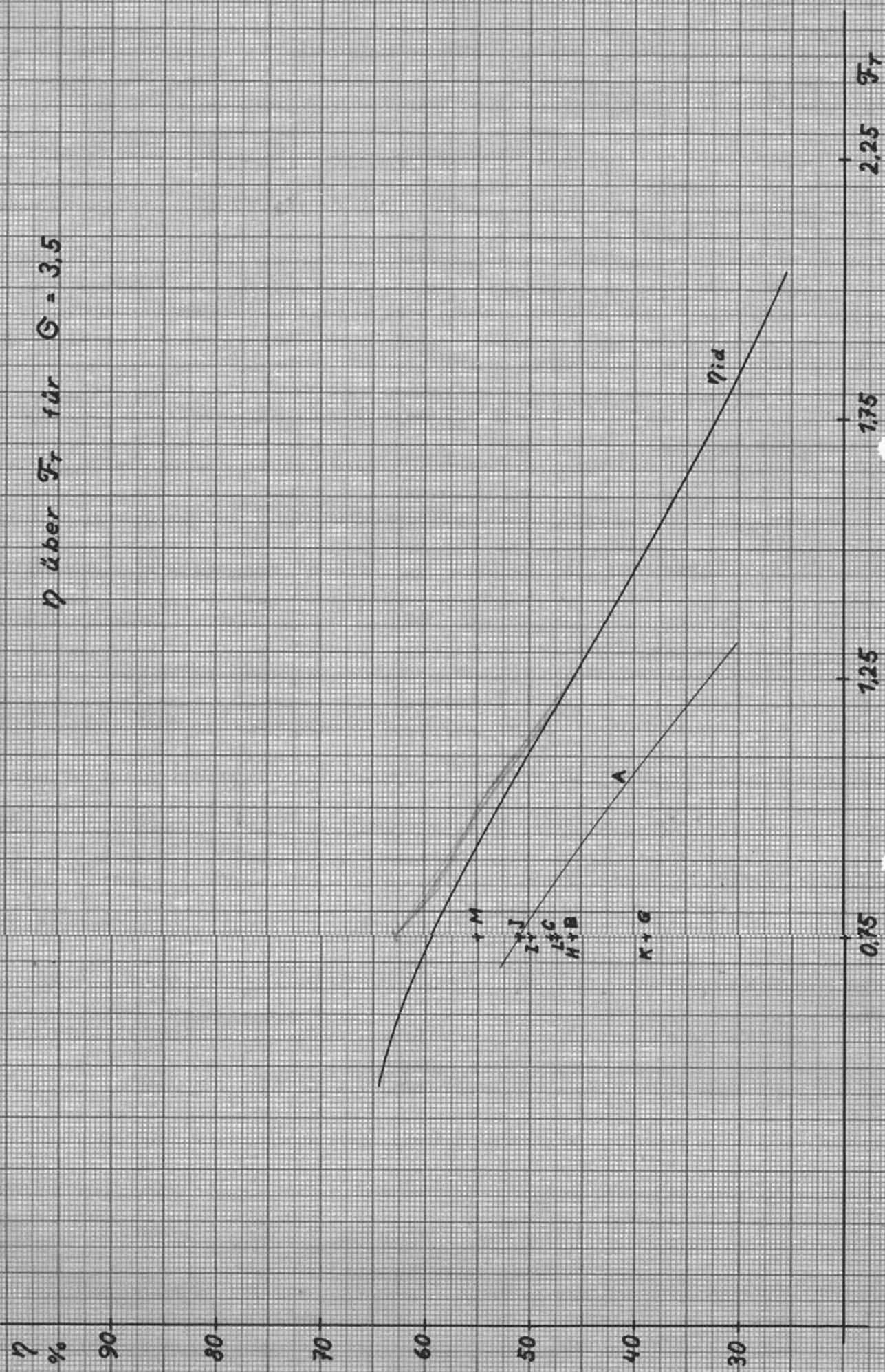
η über T_r für $G = 0.25$



η über η_T für $G = 0,5$ 

η über Fr für $G = 1.5$ 

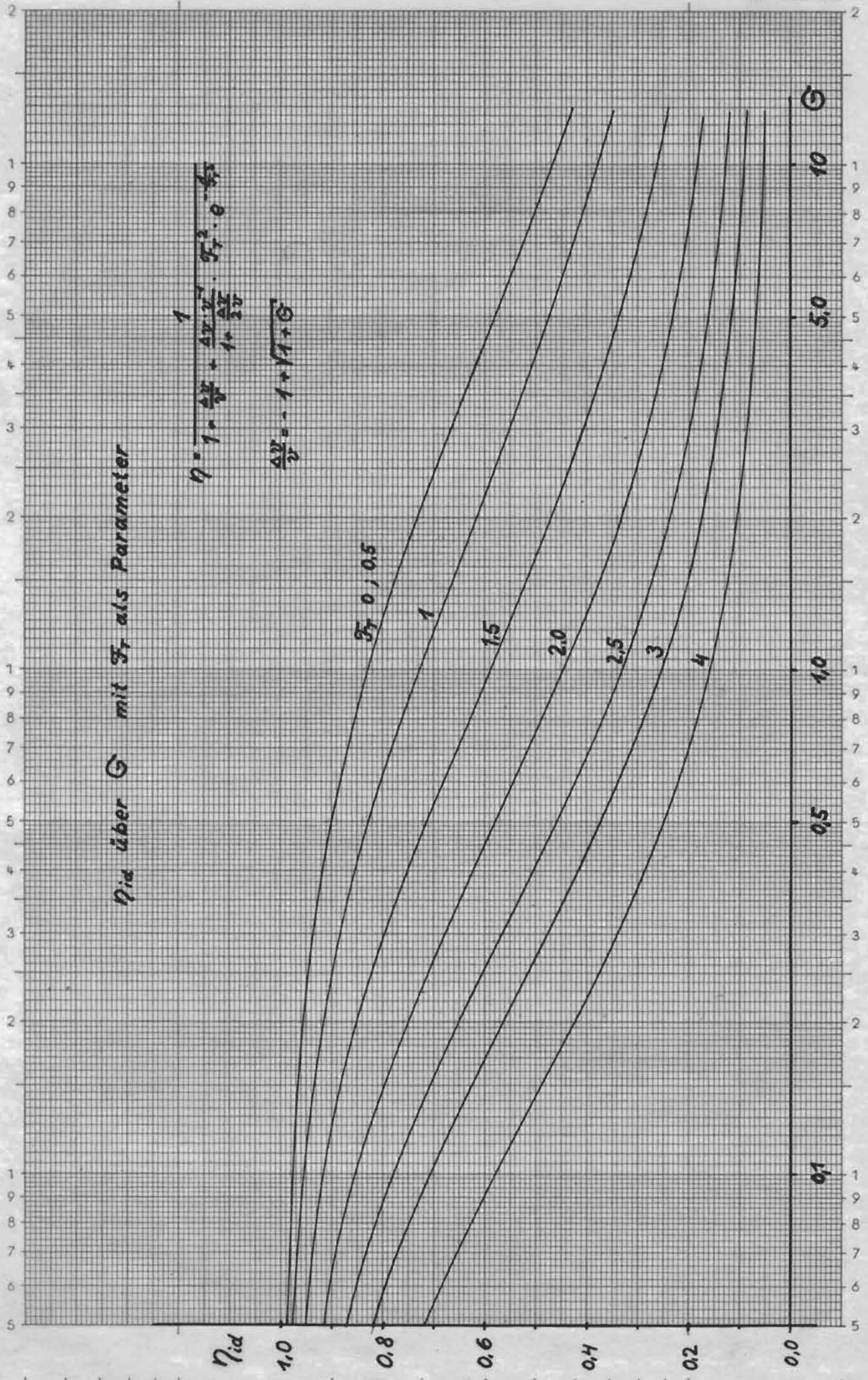
η über T_r für $G = 3,5$



η_{id} über G mit F_r als Parameter

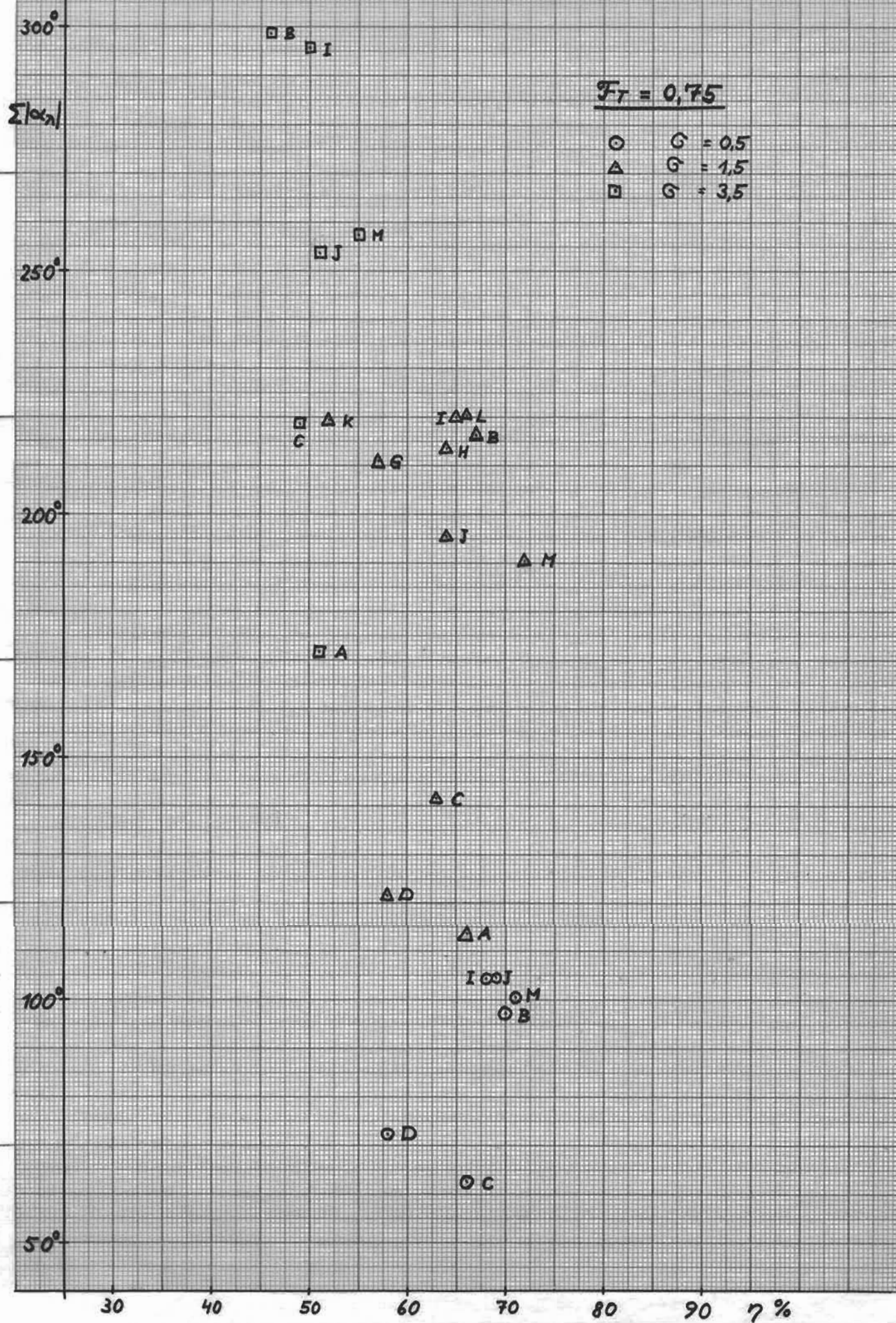
$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\Delta v}{v} + \frac{\Delta v \cdot v^4}{1 + \frac{\Delta v}{v}} \cdot F_r^2 \cdot 10^{-\frac{4}{F_r}}}$$

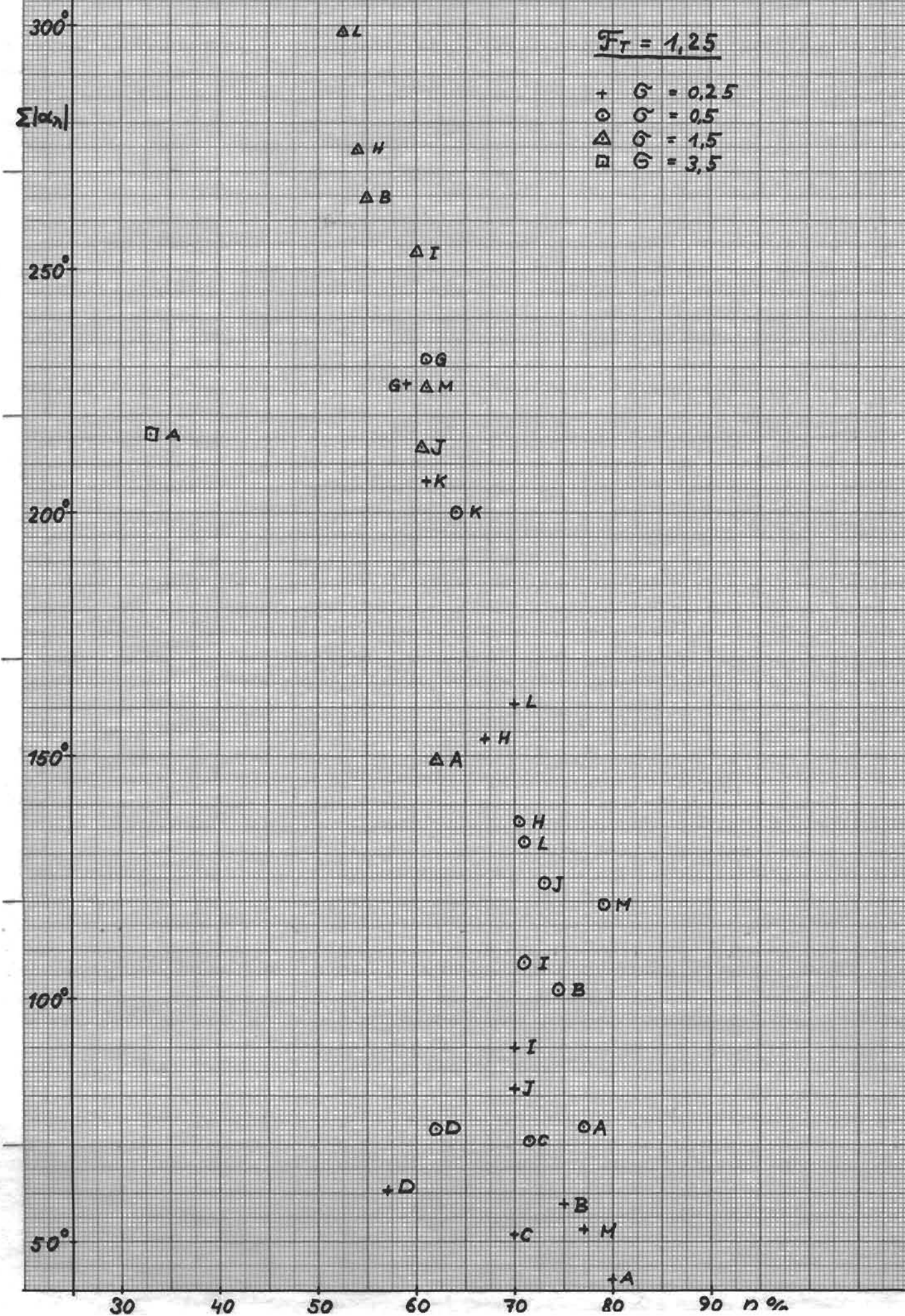
$$\frac{\Delta v}{v} = -1 + \sqrt{1 + G}$$



$$F_T = 0,75$$

- \circ $G = 0,5$
 \triangle $G = 1,5$
 \square $G = 3,5$





300°

 $\sum |\alpha_{\lambda}|$

250°

200°

150°

100°

50°

$$\underline{F_7 = 1.75}$$

$$+ \quad G = 0.25$$

$$\circ \quad G = 0.5$$

$$\Delta \quad G = 1.5$$

+ G
○ G

+ K

○ K

Δ A

+ L

+ H

○ H

○ L ○ B

○ J

○ M

+ I
+ I

+ J

○ C

○ A

+ D

+ C

+ B

+ M

+ A

30

40

50

60

70

80

90

η %

300°

 $\Sigma |\alpha_n|$

$$\overline{F_T} = 2,25$$

$$+ G = 0,25$$

$$\odot G = 0,5$$

250°

200°

150°

100°

50°

30

40

50

60

70

80

90

n %

 $\odot G$

+G

+K

 $\odot K$

+L

+H

 $\odot B$ $\odot H$ $\odot M$ $\odot L$ $\odot J$

+I

 $\odot I$

+J

 $\odot A$

+D

+C

+B

+M

+A

(H) (K) Rechnung für Exzenterlage 0,00 ü. und 0,0745 vor Mitte Welle
und für Exzenterlage 0,0745 ü. und 0,00 vor Mitte Welle

$$e = 0,0745 \quad e^2 = 0,00555$$

$$R_z = R_e = 1,00$$

$$L = 0,258$$

$$L^2 = 0,06656$$

Für (H): $\beta = \varphi - 75^\circ + \arccos\left(\frac{1,0000 - 0,0745 \cos \varphi}{1,00555 - 0,1490 \cos \varphi}\right) + \arccos\left(\frac{0,07205 - 0,1490 \cos \varphi}{0,516 \sqrt{1,00555 - 0,1490 \cos \varphi}}\right)$

Für (K): $\varphi = \varphi_{(H)} - 90^\circ$ (Spalte 2) $\beta = \beta_{(H)} - 90^\circ$ (Spalte 18)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
φ	$\varphi_{(K)}$	$\cos \varphi$	$0,0745 \cdot \cos \varphi$	$0,1490 \cdot \cos \varphi$	$1,0000 - 0,0745 \cos \varphi$	$1,0000 - 0,1490 \cos \varphi$	$1,00555 - 0,1490 \cos \varphi$	$\sqrt{\frac{1,0000 - 0,0745 \cos \varphi}{1,00555 - 0,1490 \cos \varphi}}$	$0,516 \cdot \frac{1}{9}$	$\frac{6}{9}$	$\frac{12}{10}$	$(12) \cdot \frac{1}{10}$	$(12) \cdot \frac{1}{10}$	$(13) + (14)$	$\varphi - 75^\circ$	$(15) + (16)$	$(17) - 90^\circ$
0°	0°	1,00000	0,07450	0,14900	0,92550	0,85655	0,92550	0,92550	0,47756	1,00000	-0,1611	0,0°	99,3°	99,3°	-75°	24,3°	18°
15°	15°	0,96593	0,07196	0,14392	0,92804	0,86163	0,92824	0,92824	0,47897	0,9997	-0,1500	1,3°	98,6°	99,9°	-60°	39,9°	3°
30°	30°	0,86603	0,06451	0,12903	0,93549	0,87652	0,93623	0,93623	0,48309	0,9992	-0,1179	2,3°	96,7°	99,0°	-45°	54,0°	18°
45°	45°	0,70711	0,05267	0,10535	0,94733	0,90020	0,94878	0,94878	0,48957	0,9985	-0,0680	3,1°	93,9°	97,0°	-30°	67,0°	33°
60°	60°	0,50000	0,03725	0,07450	0,96275	0,93105	0,96491	0,96491	0,49789	0,9977	-0,0049	3,9°	90,3°	94,2°	-15°	79,2°	48°
75°	75°	0,25882	0,01928	0,03856	0,98072	0,96699	0,98335	0,98335	0,50741	0,9973	+0,0660	4,2°	86,8°	91,0°	0°	91,0°	63°
90°	90°	0,00000	0,0	0,0	1,00000	1,00555	1,00277	1,00277	0,51743	0,9972	+0,1392	4,3°	82,0°	86,3°	+15°	101,3°	78°
105°	105°	-0,25882	-0,01928	-0,03856	1,01928	1,04411	1,02182	1,02182	0,52726	0,9975	0,2097	4,2°	77,9°	82,1°	+30°	112,1°	93°
120°	120°	-0,50000	-0,03725	-0,07450	1,03725	1,08005	1,03925	1,03925	0,53625	0,9980	0,2732	3,6°	74,1°	77,7°	45°	122,7°	108°
135°	135°	-0,70711	-0,05267	-0,10535	1,05267	1,11090	1,05399	1,05399	0,54386	0,9987	0,3262	2,9°	70,9°	73,8°	60°	133,8°	123°
150°	150°	-0,86603	-0,06451	-0,12903	1,06451	1,13458	1,06516	1,06516	0,54962	0,9994	0,3658	2,0°	68,5°	70,5°	75°	145,5°	135°
165°	165°	-0,96593	-0,07196	-0,14392	1,07196	1,14947	1,07213	1,07213	0,55322	0,9998	0,3904	1,0°	67,0°	68,0°	90°	158,0°	147°
180°	180°	-1,00000	-0,07450	-0,14900	1,07450	1,15465	1,07450	1,07450	0,55444	1,00000	0,3987	0,0°	66,5°	66,5°	105°	171,5°	156°
195°	195°	-0,96593	-0,07196	-0,14392	1,07196	1,14947	1,07213	1,07213	0,55322	0,9998	0,3904	1,0°	67,0°	66,0°	120°	186,0°	167°
210°	210°	-0,86603	-0,06451	-0,12903	1,06451	1,13458	1,06516	1,06516	0,54962	0,9994	0,3658	2,0°	68,5°	66,5°	135°	201,5°	178°
225°	225°	-0,70711	-0,05267	-0,10535	1,05267	1,11090	1,05399	1,05399	0,54386	0,9987	0,3262	2,9°	70,9°	68,0°	150°	218,0°	193°
240°	240°	-0,50000	-0,03725	-0,07450	1,03725	1,08005	1,03925	1,03925	0,53625	0,9980	0,2732	3,6°	74,1°	70,5°	165°	235,5°	208°
255°	255°	-0,25882	-0,01928	-0,03856	1,01928	1,04411	1,02182	1,02182	0,52726	0,9975	0,2097	4,2°	77,9°	73,7°	180°	253,7°	223°
270°	270°	0,00000	0,0	0,0	1,00000	1,00555	1,00277	1,00277	0,51743	0,9972	0,1392	4,3°	82,0°	77,7°	195°	272,7°	238°

I

Rechnung für Exzenterlage 0,00 über und 0,1340 vor Mitte Welle

$$e = 0,1340 \quad e^2 = 0,01796$$

$$R_z = R_e = 1,000$$

$$l = 0,258$$

$$l^2 = 0,06656$$

$$\psi = 0 \quad \varphi' = \varphi$$

$$\beta = \varphi - 75^\circ + \arccos \left(\frac{1,0000 - 0,1340 \cos \varphi}{\sqrt{1,01796 - 0,2680 \cos \varphi}} \right) + \arccos \left(\frac{0,08452 - 0,2680 \cos \varphi}{0,516 \sqrt{1,01796 - 0,2680 \cos \varphi}} \right)$$

②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱
φ	$\cos \varphi$	$0,1340 \cdot \textcircled{3}$	$0,2680 \cdot \textcircled{3}$	$1,0000 - \textcircled{4}$	$0,08452 - \textcircled{5}$	$1,01796 - \textcircled{5}$	$\sqrt{\textcircled{8}}$	$0,516 \cdot \textcircled{9}$	$\frac{\textcircled{6}}{\textcircled{10}}$	$\frac{\textcircled{7}}{\textcircled{10}}$	$(\textcircled{13}) \gamma$	$(\textcircled{12}) \delta$	$(\textcircled{13} + \textcircled{14})$	$\varphi - 75^\circ$	$(\textcircled{15} + \textcircled{16}) \beta$	φ
0°	1,00000	0,13400	0,26800	0,86600	-0,18348	0,74496	0,86600	0,44685	1,00000	-0,44085	0,0°	116,5°	116,5°	-75,0°	44,5°	0°
15°	0,96593	0,12943	0,25886	0,87057	-0,17435	0,75909	0,87226	0,44957	0,99920	-0,38284	2,3°	112,8°	115,1°	-60°	55,1°	15°
30°	0,86603	0,11605	0,23210	0,88395	-0,17458	0,78586	0,88649	0,45742	0,99713	-0,32263	4,4°	108,8°	113,2°	-45°	68,2°	30°
45°	0,70711	0,09475	0,18951	0,90525	-0,10499	0,82845	0,91019	0,46965	0,99457	-0,22354	6,0°	102,9°	108,9°	-30°	78,9°	45°
60°	0,50000	0,06700	0,13400	0,93300	-0,04948	0,88396	0,94029	0,48518	0,99224	-0,10198	7,2°	95,8°	103,0°	-15°	88,0°	60°
75°	0,25882	0,03468	0,06736	0,96532	+0,01516	0,94860	0,97396	0,50256	0,99412	+0,03016	7,7°	88,3°	96,0°	0°	96,0°	75°
90°	0,0	0,0	0,0	1,00000	+0,08452	1,01796	1,00894	0,52061	0,99413	+0,16234	7,7°	80,7°	88,4°	+15°	103,4°	90°
105°	-0,25886	-0,03468	-0,06936	1,03468	+0,15388	1,08732	1,04275	0,53805	0,99226	0,28599	7,2°	73,4°	80,6°	+30°	110,6°	105°
120°	-0,50000	-0,06700	-0,13400	1,06700	0,21852	1,15196	1,07329	0,55384	0,99413	0,39457	6,3°	66,8°	73,1°	+45°	118,1°	120°
135°	-0,70711	-0,09475	-0,18951	1,09475	0,27403	1,20747	1,09880	0,56698	0,99631	0,48331	4,9°	61,1°	66,0°	60°	126,0°	135°
150°	-0,86603	-0,11605	-0,23210	1,1605	0,31662	1,25006	1,11806	0,57691	0,99820	0,57691	3,4°	54,7°	58,1°	75°	133,1°	150°
165°	-0,96593	-0,12943	-0,25886	1,17943	0,34339	1,27683	1,12997	0,58306	0,99952	0,58894	1,9°	53,9°	55,8°	90°	145,8°	165°
180°	-1,00000	-0,13400	-0,26800	1,13400	0,35252	1,28596	1,13400	0,58514	1,00000	0,60245	0,0°	52,9°	52,9°	105°	157,9°	180°

①

Rechnung für Exzenterlage 0,00 über und 0,1865 vor Mittelelle

$$e^2 = (0,1865)^2 = 0,03478$$

$$R_z = R_e = 1,000$$

$$l = 0,258$$

$$l^2 = 0,06656$$

$$\psi = 0 \quad \varphi = \varphi'$$

$$\beta = \varphi - 75^\circ + \arccos\left(\frac{1,000 - 0,1865 \cos \varphi}{\sqrt{1,03478 - 0,3730 \cos \varphi}}\right) + \arccos\left(\frac{0,10178 - 0,3730 \cos \varphi}{0,516 \sqrt{1,03478 - 0,3730 \cos \varphi}}\right)$$

②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱
φ	$\cos \varphi$	$0,1865 \cdot \textcircled{3}$	$0,373 \cdot \textcircled{3}$	$1,000 - \textcircled{4}$	$0,10178 - \textcircled{5}$	$1,03478 - \textcircled{5}$	$\sqrt{\textcircled{8}}$	$0,516 \cdot \textcircled{9}$	$\frac{\textcircled{6}}{\textcircled{9}}$	$\frac{\textcircled{7}}{\textcircled{10}}$	$(\textcircled{11}) \delta'$	$(\textcircled{12}) \delta$	$(\textcircled{12}) + (\textcircled{14})$	$\varphi - 75^\circ$	$(\textcircled{15}) + (\textcircled{16}) \beta$	⑱
0°	1,0000	0,1865	0,373	1,000	-0,27122	0,66178	0,81347	0,41975	1,00003	-0,64614	0,0°	130,2°	130,2°	-75°	55,2°	0°
15°	0,96593	0,18014	0,36029	0,82986	-0,25851	0,67449	0,82127	0,42377	1,01046	-0,61002	2,4°	127,6°	130,0°	-60°	70,0°	15°
30°	0,86603	0,16151	0,32302	0,83849	-0,22124	0,71176	0,84366	0,43532	0,99387	-0,50822	6,4°	120,6°	127,0°	-45°	82,0°	30°
45°	0,70711	0,13187	0,26375	0,86813	-0,16977	0,77103	0,87809	0,45309	0,98865	-0,35747	8,7°	110,9°	119,6°	-30°	89,6°	45°
60°	0,50000	0,09325	0,18650	0,90675	-0,08472	0,84828	0,92102	0,47524	0,98450	-0,17826	10,1°	100,3°	110,4°	-15°	95,4°	60°
75°	0,25882	0,04826	0,09653	0,95174	+0,00525	0,93825	0,96862	0,49980	0,98257	+0,01050	10,7°	89,4°	100,1°	0°	100,1°	75°
90°	0,0	0,0	0,0	1,00000	+0,10178	1,03478	1,01725	0,52490	0,98304	0,19390	10,6°	78,7°	89,3°	+15°	104,3°	90°
105°	-0,25882	-0,04826	-0,09653	1,04826	+0,19831	1,13131	1,06363	0,54883	0,98555	0,36133	9,8°	68,8°	78,6°	+30°	108,6°	105°
120°	-0,50000	-0,09325	-0,18650	1,09325	0,28828	1,22128	1,10512	0,57024	0,98926	0,50554	8,4°	59,6°	68,0°	+45°	113,0°	120°
135°	-0,70711	-0,13187	-0,26375	1,13187	0,36553	1,29853	1,13955	0,58800	0,99326	0,62164	6,7°	51,6°	58,3°	60°	117,3°	135°
150°	-0,86603	-0,16151	-0,32302	1,16151	0,42480	1,35780	1,16524	0,60126	0,99679	0,70651	4,7°	45,1°	49,8°	75°	124,8°	150°
165°	-0,96593	-0,18014	-0,36029	1,18014	0,46207	1,39507	1,18113	0,60946	0,99916	0,75816	2,4°	39,8°	42,2°	90°	132,2°	165°
180°	-1,00000	-0,18650	-0,37300	1,18650	0,47478	1,40778	1,18650	0,61223	1,00000	0,77549	0,0°	39,2°	39,2°	105°	144,2°	180°

Tabelle 3

A, B, C, D
E, F, N, P
Q, R, S, T

Rechnung für Exzenterlage 0,0745 ü. und 0,1340 vor Mitte Welle

$$e' = \sqrt{(0,0745)^2 + (0,1340)^2} = \sqrt{0,005550 + 0,017956} = 0,1533 \quad (e')^2 = 0,0235$$

$$\tan \psi = \frac{0,0745}{0,1340} = 0,5556 \quad \psi = 29,1^\circ \quad \varphi = \varphi' - \psi$$

$$R_z = R_e = 1,000$$

$$\ell = 0,258$$

$$\ell^2 = 0,06656$$

$$B = \varphi' - 75^\circ - 29,1^\circ + \arccos \left(\frac{1,000 - 0,1533 \cdot \cos \varphi'}{\sqrt{1,0235 - 0,3066 \cos \varphi'}} \right) + \arccos \left(\frac{0,0900 - 0,3066 \cos \varphi'}{0,516 \sqrt{1,0235 - 0,3066 \cos \varphi'}} \right)$$

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱
φ'	φ	$\cos \varphi'$	$0,1533$ · ③	$0,3066$ · ③	$1,0000$ - ④	$0,09000$ - ⑤	$1,0235$ - ⑤	$\sqrt{\text{⑧}}$	$0,516 \cdot \text{⑩}$	$\frac{\text{⑥}}{\text{⑦}}$	$\frac{\text{⑦}}{\text{⑩}}$	(⑪) δ	(⑫) δ	⑬ + ⑭	⑯ - 104,1°	⑰ + ⑱	φ
30°	+0,9°	0,86603	0,13276	0,26552	0,86724	-0,17552	0,75798	0,87065	0,44926	0,99608	-0,39069	5,05°	113,00°	118,05°	-74,1°	43,9°	0,9°
45°	15,9°	0,70711	0,10840	0,21680	0,89160	-0,12680	0,80670	0,89816	0,46345	0,99270	-0,27360	6,93°	105,88°	112,81°	-59,1°	53,1°	15,9°
60°	30,9°	0,50000	0,07665	0,15330	0,92335	-0,06330	0,87020	0,93284	0,48735	0,98982	-0,13150	8,16°	97,56°	105,72°	-44,1°	61,6°	30,9°
75°	45,9°	0,25982	0,03968	0,07936	0,96032	+0,01064	0,94414	0,97167	0,50138	0,98832	+0,02122	8,78°	88,78°	97,56°	-29,1°	68,5°	45,9°
90°	60,9°	0,0	0,0	0,0	1,00000	+0,09000	1,02350	1,01168	0,52203	0,98845	+0,17240	8,72°	80,07°	88,79°	-14,1°	74,7°	60,9°
105°	75,9°	-0,25982	-0,03968	-0,07936	1,03968	0,16936	1,10286	1,05017	0,54189	0,99001	0,31254	8,10°	71,79°	79,89°	+0,9°	80,8°	75,9°
120°	90,9°	-0,50000	-0,07665	-0,15330	1,07665	0,24330	1,17680	1,08480	0,55976	0,99249	0,43465	7,00°	64,24°	79,24°	+15,9°	87,1°	90,9°
135°	105,9°	-0,70711	-0,10840	-0,21680	1,10840	0,30680	1,24030	1,11369	0,57466	0,99525	0,53388	5,57°	57,74°	63,34°	+30,9°	94,2°	105,9°
150°	120,9°	-0,86603	-0,13276	-0,26552	1,13276	0,35552	1,28902	1,13530	0,58581	0,99776	0,60689	3,86°	52,63°	56,49°	+45,9°	102,4°	120,9°
165°	135,9°	-0,96593	-0,14808	-0,29616	1,14808	0,38616	1,31966	1,14876	0,59276	0,99944	0,65146	2,00°	49,35°	57,35°	+60,9°	112,3°	135,9°
180°	150,9°	-1,00000	-0,15330	-0,30660	1,15330	0,39660	1,33010	1,15330	0,59510	1,00000	0,66644	0,0°	48,21°	48,21°	+75,9°	124,1°	150,9°
195°	165,9°	-0,96593	-0,14808	-0,29616	1,14808	0,38616	1,31966	1,14876	0,59276	0,99944	0,65146	2,00°	49,35°	51,35°	+90,9°	142,3°	165,9°
210°	180,9°	-0,86603	-0,13276	-0,26552	1,13276	0,35552	1,28902	1,13530	0,58581	0,99776	0,60689	3,86°	52,63°	56,49°	+105,9°	162,4°	180,9°

Rechnung für Exzenterlage 0,0745 ü. und 0,0745 vor Mitte Welle

(L)

$$\frac{T_2}{R_2} = 0,487$$

$$\frac{T_3}{R_2} = 0,275$$

$$e' = \sqrt{0,0745^2 + 0,0745^2} = \sqrt{0,0110} = 0,1055 \quad (e')^2 = 0,0110$$

$$\text{tg } \psi = 1,0 \quad \psi = 45^\circ \quad \varphi = \varphi' - \psi$$

$$\beta = \varphi' - 75^\circ - 45^\circ + \arccos \left(\frac{1 - 0,1055 \cos \varphi'}{\sqrt{1,0111 - 0,211 \cos \varphi'}} \right) + \arccos \left(\frac{0,074766 - 0,211 \cos \varphi'}{0,516 \sqrt{1,0111 - 0,211 \cos \varphi'}} \right)$$

$$R_2 = 1,000 = R_e$$

$$l = 0,258$$

$$l' = 0,06656$$

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱
φ'	φ	$\cos \varphi'$	$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	$\sin \varphi'$	$\cos \varphi'$	$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	$\sin \varphi'$	$\cos \varphi'$	$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	$\sin \varphi'$	$\cos \varphi'$	$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	$\sin \varphi'$
0°	-45°	1,00000	0,70711	0,70711	0,70711	0,70711	0,70711	0,70711	0,70711	0,70711	0,70711	0,70711	0,70711	0,70711	0,70711	0,70711	0,70711
15°	-30°	0,96593	0,51961	0,51961	0,51961	0,51961	0,51961	0,51961	0,51961	0,51961	0,51961	0,51961	0,51961	0,51961	0,51961	0,51961	0,51961
30°	-15°	0,86603	0,46178	0,46178	0,46178	0,46178	0,46178	0,46178	0,46178	0,46178	0,46178	0,46178	0,46178	0,46178	0,46178	0,46178	0,46178
45°	0°	0,70711	0,00000	0,00000	0,70711	0,70711	0,00000	0,00000	0,70711	0,70711	0,00000	0,00000	0,70711	0,70711	0,00000	0,00000	0,70711
60°	+15°	0,50000	0,25982	0,25982	0,50000	0,50000	0,25982	0,25982	0,50000	0,50000	0,25982	0,25982	0,50000	0,50000	0,25982	0,25982	0,50000
75°	+30°	0,25982	0,02730	0,02730	0,25982	0,25982	0,02730	0,02730	0,25982	0,25982	0,02730	0,02730	0,25982	0,25982	0,02730	0,02730	0,25982
90°	+45°	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
105°	+60°	-0,25982	-0,02730	-0,02730	-0,25982	-0,25982	-0,02730	-0,02730	-0,25982	-0,25982	-0,02730	-0,02730	-0,25982	-0,25982	-0,02730	-0,02730	-0,25982
120°	+75°	-0,50000	-0,05275	-0,05275	-0,50000	-0,50000	-0,05275	-0,05275	-0,50000	-0,50000	-0,05275	-0,05275	-0,50000	-0,50000	-0,05275	-0,05275	-0,50000
135°	+90°	-0,70711	-0,07460	-0,07460	-0,70711	-0,70711	-0,07460	-0,07460	-0,70711	-0,70711	-0,07460	-0,07460	-0,70711	-0,70711	-0,07460	-0,07460	-0,70711
150°	+105°	-0,86603	-0,09436	-0,09436	-0,86603	-0,86603	-0,09436	-0,09436	-0,86603	-0,86603	-0,09436	-0,09436	-0,86603	-0,86603	-0,09436	-0,09436	-0,86603
165°	+120°	-0,96593	-0,10790	-0,10790	-0,96593	-0,96593	-0,10790	-0,10790	-0,96593	-0,96593	-0,10790	-0,10790	-0,96593	-0,96593	-0,10790	-0,10790	-0,96593
180°	+135°	-1,00000	-0,10550	-0,10550	-1,00000	-1,00000	-0,10550	-0,10550	-1,00000	-1,00000	-0,10550	-0,10550	-1,00000	-1,00000	-0,10550	-0,10550	-1,00000
195°	+150°	-0,96593	-0,10190	-0,10190	-0,96593	-0,96593	-0,10190	-0,10190	-0,96593	-0,96593	-0,10190	-0,10190	-0,96593	-0,96593	-0,10190	-0,10190	-0,96593
210°	+165°	-0,86603	-0,09436	-0,09436	-0,86603	-0,86603	-0,09436	-0,09436	-0,86603	-0,86603	-0,09436	-0,09436	-0,86603	-0,86603	-0,09436	-0,09436	-0,86603
225°	+180°	-0,70711	-0,07460	-0,07460	-0,70711	-0,70711	-0,07460	-0,07460	-0,70711	-0,70711	-0,07460	-0,07460	-0,70711	-0,70711	-0,07460	-0,07460	-0,70711

Rechnung für Exzenterlage 0,0745 ü. und 0,1865 v. Mitte Welle

(M)

$$e' = \sqrt{(0,0745)^2 + (0,1865)^2} = \sqrt{0,04033} = 0,2008$$

$$\tan \psi = \frac{0,0745}{0,1865} = 0,399 \quad \psi = 21,8^\circ \quad \varphi = \varphi' - \psi$$

$$R_z = R_e = 1,000$$

$$l = 0,258$$

$$l^2 = 0,06656$$

$$\beta = \varphi' - 75 - 21,8^\circ + \arccos \left(\frac{1,000 - 0,2008 \cos \varphi'}{\sqrt{1,04033 - 0,4016 \cos \varphi'}} \right) + \arccos \left(\frac{0,10689 - 0,4016 \cos \varphi'}{0,516 \sqrt{1,04033 - 0,4016 \cos \varphi'}} \right)$$

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱
φ'	φ	$\cos \varphi'$	$\cdot \textcircled{3}$	$\cdot \textcircled{3}$	$1,000$	$0,10689$	$1,04033$	$\sqrt{\textcircled{8}}$	$0,516 \cdot \textcircled{9}$	$\frac{\textcircled{6}}{\textcircled{9}}$	$\frac{\textcircled{7}}{\textcircled{10}}$	$(\textcircled{13}) \gamma$	$(\textcircled{12}) \delta$	$\textcircled{13} + \textcircled{14}$	$\varphi' - \textcircled{16}$	$\textcircled{17} \beta$	φ
15°	-6,8°	0,96593	0,19395	0,38791	0,80605	-0,28402	0,65242	0,80775	0,42195	0,99389	-0,66600	3,7	131,8	135,5	-81,8°	53,7°	-6,8°
30°	+8,2°	0,86603	0,17389	0,34779	0,82611	-0,24090	0,69254	0,8322	0,42941	0,99268	-0,56100	6,9	124,1	131,0	-66,8°	65,2°	+8,2°
45°	23,2°	0,70711	0,14198	0,28397	0,85802	-0,17708	0,75636	0,8697	0,44876	0,98657	-0,39459	9,4	113,2	122,6	-51,8°	70,8°	+23,2°
60°	38,2°	0,50000	0,10040	0,20080	0,89960	-0,07391	0,83953	0,9163	0,47281	0,98177	-0,19862	11,0	101,5	112,5	-36,8°	75,7°	+38,2°
75°	53,2°	0,25882	0,05197	0,10394	0,94803	+0,00295	0,93639	0,9677	0,49933	0,97967	+0,05900	11,6	86,4	98,0	-21,8°	76,2°	+53,2°
90°	68,2°	0,0	0,0	0,0	1,00000	+0,10689	1,04033	1,02000	0,52632	0,98039	+0,20308	11,4	78,3	89,7	-6,8°	82,9°	+68,2°
105°	83,2°	-0,25882	-0,05197	-0,10394	1,05197	0,21083	1,14427	1,06971	0,55197	0,98341	0,38195	10,5	67,5	78,0	+8,2°	86,2°	+83,2°
120°	98,2°	-0,50000	-0,10040	-0,20080	1,10040	0,30789	1,24113	1,1143	0,57497	0,98752	0,53514	9,2	57,7	66,9	+23,2°	90,1°	+98,2°
135°	113,2°	-0,70711	-0,14198	-0,28397	1,14198	0,39086	1,32430	1,1507	0,59376	0,99242	0,65827	7,1	48,8	55,9	+38,2°	94,1°	+113,2°
150°	128,2°	-0,86603	-0,17389	-0,34779	1,17389	0,45468	1,38812	1,1784	0,60805	0,99617	0,74776	5,1	41,6	46,7	53,2°	99,9°	128,2°
165°	143,2°	-0,96593	-0,19395	-0,38791	1,19395	0,49480	1,42824	1,1951	0,61667	0,99903	0,80237	2,4	36,6	39,0	68,2°	107,2°	143,2°
180°	158,2°	-1,00000	-0,20080	-0,40160	1,20080	0,50849	1,44193	1,2008	0,61961	1,00000	0,82066	0,0	34,9	34,9	83,2°	118,1°	158,2°
195°	173,2°	-0,96593	-0,19395	-0,38791	1,19395	0,49480	1,42824	1,1951	0,61667	0,99903	0,80237	2,4	36,6	39,0	98,2°	137,2°	173,2°
210°	188,2°	-0,86603	-0,17389	-0,34779	1,17389	0,45468	1,38812	1,1784	0,60805	0,99617	0,74776	5,1	41,6	46,7	113,2°	159,9°	188,2°

Für U.K. Schaufel $\sin \varphi = 1 - \frac{T_2}{R_2} - \frac{h_a}{R_2} \cdot \sin \beta$ $\frac{T_2}{R_2} = 0,365$ $\frac{h_a}{R_2} = 0,212$ $\frac{T_2}{R_2} = 0,153$

Für Mitte Schaufel $\sin \varphi = 1 - \frac{T_2}{R_2}$ $\frac{h_a}{R_2} = 0,212$ $\frac{T_2}{R_2} = 0,275$

Für O.K. Schaufel $\sin \varphi = 1 - \frac{T_2}{R_2} + \frac{h_i}{R_2} \cdot \sin \beta$ $\frac{h_i}{R_2} = 0,266$ $\frac{T_2}{R_2} = 0,397$

$\frac{T_2}{R_2} = 0,519$

		①	②	③	A		B		C		D	
φ	β	$\sin \varphi$	①	②	③	$\frac{T_2}{R_2}$	$\frac{h_a}{R_2}$	$\frac{T_2}{R_2}$	$\frac{h_a}{R_2}$	$\frac{T_2}{R_2}$	$\frac{h_a}{R_2}$	$\frac{T_2}{R_2}$
0°	43,0°	0,000	0,6820	0,1446	0,1814	0,847	0,847	0,725	0,725	0,603	0,481	0,481
15°	53,0°	0,259	0,7986	0,1693	0,2124	0,7024	1,0284	0,5804	0,9064	0,4584	0,3364	0,6624
30°	61,0°	0,500	0,8746	0,1854	0,2326	0,6616	1,0594	0,5557	0,9374	0,4337	0,3117	0,6934
45°	68,0°	0,707	0,9272	0,1966	0,2466	0,6504	1,0796	0,5396	0,9576	0,4176	0,2956	0,7136
60°	74,1°	0,866	0,9617	0,2039	0,2558	0,6431	1,0936	0,5284	0,9716	0,4064	0,2844	0,7276
75°	80,3°	0,966	0,9857	0,2090	0,2622	0,6380	1,1028	0,5160	0,9808	0,3991	0,2771	0,7368
90°	87,0°	1,000	0,9986	0,2117	0,2656	0,6353	1,1092	0,5133	0,9906	0,3940	0,2720	0,7432
105°	94,1°	0,966	0,9974	0,2144	0,2653	0,6356	1,1123	0,5136	0,9903	0,3916	0,2696	0,7463
120°	102,2°	0,866	0,9374	0,2072	0,2600	0,6398	1,1070	0,5178	0,9850	0,3958	0,2738	0,7410
135°	111,7°	0,707	0,9294	0,1970	0,2471	0,6500	1,0941	0,5280	0,9721	0,4060	0,2840	0,7281
150°	123,5°	0,500	0,8339	0,1768	0,2218	0,6702	1,0688	0,5482	0,9468	0,4262	0,3042	0,7028
165°	140,2°	0,259	0,6401	0,1357	0,1703	0,7113	1,0173	0,5893	0,8953	0,4673	0,3453	0,6513
180°	161,4°	0,000	0,3190	0,0676	0,0848	0,7794	0,9318	0,6574	0,8098	0,5354	0,4134	0,5658

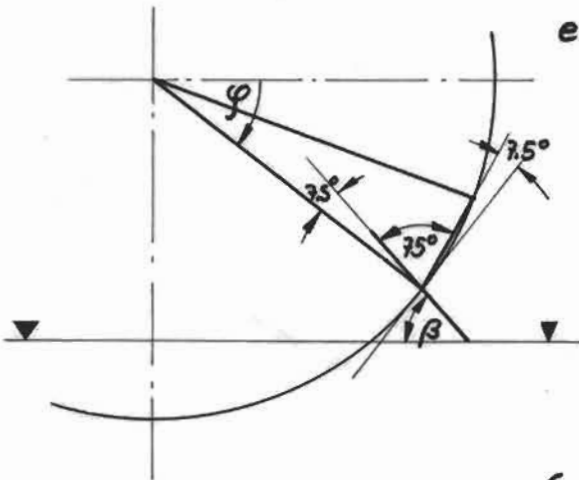
Schaufelstellung	A		B		C		D	
	φ	β	φ	β	φ	β	φ	β
1. Eintritt U.K.	41,0°	66,0°	32,8°	62,2°	25,0°	58,5°	18,1°	55,0°
2. Eintritt Mitte	58,0°	73,3°	46,5°	68,5°	37,1°	64,6°	29,0°	60,5°
3. Eintritt O.K.	—	—	82,0°	83,3°	59,2°	74,0°	47,0°	68,8°
4. Austritt O.K.	—	—	97,7°	90,7°	120,2°	102,3°	133,2°	110,2°
5. Austritt Mitte	122,1°	103,5°	133,5°	110,5°	142,9°	117,0°	151,0°	124,1°
6. Austritt U.K.	139,1°	114,3°	147,1°	120,8°	154,2°	127,5°	160,6°	135,0°

aus Bild 19

aus Bild 17

⑥

Für das Rad ⑥ (Exzenterlage 0,0 vor, 0,0 über M.W., also mit festen Schaufeln) wird auf die relativ umständliche Rechnung verzichtet, da sich $\beta = f(\varphi)$ einfacher ableiten läßt:



$$\beta = \varphi + 7,5^\circ$$

Die Rechnung für die 6 markanten Schaufelstellungen ändert sich nicht:

φ	$\sin \varphi$	β	$\sin \beta$	② 0,212 · ④	③ 0,266 · ④	U.K. 0,725 - ②	O.K. 0,725 + ③
0°	0,000	7,5°	0,1305	0,0277	0,0347	0,697	0,760
15°	0,259	22,5°	0,3827	0,0811	0,1088	0,644	0,827
30°	0,500	37,5°	0,6088	0,1291	0,1619	0,596	0,887
45°	0,707	52,5°	0,7934	0,1682	0,2110	0,557	0,936
60°	0,866	67,5°	0,9239	0,1959	0,2458	0,529	0,971
75°	0,966	82,5°	0,9914	0,2102	0,2617	0,515	0,987
90°	1,000	97,5°	0,9914	0,2102	0,2617	0,515	0,987
105°	0,966	112,5°	0,9239	0,1959	0,2458	0,529	0,971
120°	0,866	127,5°	0,7934	0,1682	0,2110	0,557	0,936
135°	0,707	142,5°	0,6088	0,1291	0,1619	0,596	0,887
150°	0,500	157,5°	0,3827	0,0811	0,1018	0,644	0,827
165°	0,259	172,5°	0,1305	0,0277	0,0347	0,697	0,760
180°	0,000	187,5°	-0,1305	-0,0277	-0,0347	0,753	0,690

φ aus Bild 20

β aus Bild 15

Schaufelstellung		φ	β
1. Eintritt	U.K.	35,3°	42,8°
2. Eintritt	Mitte	46,5°	54,0°
3. Eintritt	O.K.	82,2°	89,7°
4. Austritt	O.K.	102,5°	110,0°
5. Austritt	Mitte	133,5°	141,0°
6. Austritt	U.K.	141,8°	149,3°

(H)

			①	②	③	U.K.	O.K.
φ	$\sin \varphi$	β	$\sin \beta$	$\frac{0.212}{\cdot ①}$	$\frac{0.266}{\cdot ①}$	$\frac{0.725}{- ②}$	$\frac{0.725}{+ ③}$
0°	0.000	24.3°	0.4115	0.0872	0.1094	0.6378	0.834
15°	0.259	39.9°	0.6414	0.1359	0.1706	0.589	0.895
30°	0.500	54.0°	0.8090	0.1715	0.2152	0.553	0.940
45°	0.707	67.0°	0.9205	0.1951	0.2448	0.529	0.969
60°	0.866	79.2°	0.9823	0.2082	0.2613	0.516	0.986
75°	0.966	91.0°	0.9998	0.2119	0.2659	0.513	0.990
90°	1.000	101.3°	0.9806	0.2078	0.2608	0.517	0.985
105°	0.966	112.1°	0.9265	0.1964	0.2464	0.528	0.971
120°	0.866	122.7°	0.8415	0.1784	0.2238	0.546	0.948
135°	0.707	133.8°	0.7218	0.1530	0.1920	0.572	0.917
150°	0.500	145.5°	0.5664	0.1200	0.1506	0.605	0.875
165°	0.259	158.0°	0.3746	0.0794	0.0996	0.645	0.824
180°	0.000	171.5°	0.1478	0.0313	0.0393	0.693	0.764
			Schaufelstellung			φ	β
φ aus Bild 20			1. Eintritt U.K.			33.2°	57.2°
			2. Eintritt Mitte			46.5°	68.1°
β aus Bild 15			3. Eintritt O.K.			82.2°	95.9°
			4. Austritt O.K.			103.7°	111.6°
			5. Austritt Mitte			133.5°	133.1°
			6. Austritt U.K.			143.6°	140.6°

(I)

			①	②	③	U.K.	O.K.
φ	$\sin \varphi$	β	$\sin \beta$	$\frac{0.212}{\cdot ①}$	$\frac{0.266}{\cdot ①}$	$\frac{0.725}{- ②}$	$\frac{0.725}{+ ③}$
0°	0.000	41.5°	0.6626	0.1404	0.1762	0.5846	0.9012
15°	0.259	55.1°	0.7782	0.1649	0.2070	0.560	0.932
30°	0.500	68.2°	0.9285	0.1968	0.2469	0.528	0.972
45°	0.707	78.9°	0.9813	0.2080	0.2610	0.517	0.986
60°	0.866	88.0°	0.9994	0.2118	0.2658	0.513	0.991
75°	0.966	96.0°	0.9945	0.2108	0.2645	0.514	0.990
90°	1.000	103.4°	0.9728	0.2062	0.2587	0.519	0.984
105°	0.966	110.6°	0.9361	0.1984	0.2490	0.527	0.974
120°	0.866	118.1°	0.8780	0.1861	0.2335	0.540	0.959
135°	0.707	126.0°	0.8090	0.1715	0.2151	0.554	0.940
150°	0.500	135.0°	0.7071	0.1499	0.1880	0.575	0.913
165°	0.259	145.8°	0.5621	0.1191	0.1495	0.606	0.875
180°	0.000	157.9°	0.3762	0.0797	0.1000	0.645	0.825
			Schaufelstellung			φ	β
φ aus Bild 20			1. Eintritt U.K.			31.6°	70.0°
			2. Eintritt Mitte			46.5°	80.0°
β aus Bild 15			3. Eintritt O.K.			81.5°	99.5°
			4. Austritt O.K.			101.0°	108.0°
			5. Austritt Mitte			133.5°	125.2°
			6. Austritt U.K.			145.7°	132.0°

J

			①	②	③	U.K.	O.K.
φ	$\sin \varphi$	β	$\sin \beta$	$0,212 \cdot ①$	$0,266 \cdot ①$	$0,725 - ②$	$0,725 + ③$
0°	0,000	55,2°	0,8211	0,174	0,218	0,551	0,943
15°	0,259	67,6°	0,9245	0,196	0,246	0,529	0,971
30°	0,500	82,0°	0,9903	0,210	0,263	0,515	0,988
45°	0,707	89,6°	1,0000	0,212	0,266	0,513	0,991
60°	0,866	95,4°	0,9956	0,211	0,265	0,514	0,990
75°	0,966	100,1°	0,9845	0,209	0,262	0,516	0,987
90°	1,000	104,3°	0,9690	0,205	0,258	0,520	0,983
105°	0,966	108,6°	0,9478	0,201	0,252	0,524	0,977
120°	0,866	113,0°	0,9205	0,195	0,245	0,530	0,970
135°	0,707	117,3°	0,8886	0,188	0,236	0,537	0,961
150°	0,500	124,8°	0,8211	0,174	0,218	0,551	0,943
165°	0,259	132,2°	0,7408	0,157	0,197	0,568	0,922
180°	0,000	144,2	0,5850	0,124	0,156	0,601	0,881
φ aus Bild 20 β aus Bild 15			Schaufelstellung			φ	β
			1. Eintritt U.K.			37,0°	82,1°
			2. Eintritt Mitte			46,5°	90,5°
			3. Eintritt O.K.			80,0°	101,9°
			4. Austritt O.K.			101,5°	107,5°
			5. Austritt Mitte			133,5°	117,5°
			6. Austritt U.K.			146,8°	123,0°

K

			①	②	③	U.K.	O.K.
φ	$\sin \varphi$	β	$\sin \beta$	$0,212 \cdot ①$	$0,266 \cdot ①$	$0,725 - ②$	$0,725 + ③$
0°	0,000	11,3°	0,1959	0,0415	0,0521	0,684	0,777
15°	0,259	22,1°	0,3762	0,0797	0,1000	0,645	0,825
30°	0,500	32,7°	0,5402	0,1145	0,1436	0,610	0,868
45°	0,707	43,8°	0,6921	0,1467	0,1840	0,578	0,909
60°	0,866	55,5°	0,8241	0,1747	0,2192	0,550	0,944
75°	0,966	68,0°	0,9272	0,1966	0,2466	0,528	0,971
90°	1,000	81,0°	0,9877	0,2094	0,2627	0,515	0,987
105°	0,966	96,0°	0,9945	0,2108	0,2645	0,514	0,989
120°	0,866	111,5°	0,9304	0,1972	0,2474	0,528	0,972
135°	0,707	128,0°	0,7880	0,1670	0,2096	0,558	0,935
150°	0,500	145,5°	0,5664	0,1200	0,1506	0,605	0,876
165°	0,259	163,7°	0,2807	0,0595	0,0746	0,666	0,799
180°	0,000	182,7°	-0,0471	-0,0099	-0,0125	0,735	0,713
φ aus Bild 21 β aus Bild 17			Schaufelstellung			φ	β
			1. Eintritt U.K.			36,7°	37,4°
			2. Eintritt Mitte			46,5°	45,0°
			3. Eintritt O.K.			77,8°	70,1°
			4. Austritt O.K.			99,0°	90,5°
			5. Austritt Mitte			133,5°	126,4°
			6. Austritt U.K.			144,0°	138,5°

L

			①	②	③	U.K.	O.K.
φ	$\sin \varphi$	β	$\sin \beta$	$\frac{0,212}{\cdot ①}$	$\frac{0,266}{\cdot ①}$	$\frac{0,725}{- ②}$	$\frac{0,725}{+ ③}$
0°	0,000	28,3°	0,4741	0,1005	0,1261	0,625	0,851
15°	0,259	38,3°	0,6198	0,1313	0,1648	0,594	0,890
30°	0,500	48,8°	0,7524	0,1595	0,2001	0,566	0,925
45°	0,707	57,4°	0,8425	0,1786	0,2241	0,546	0,949
60°	0,866	66,8°	0,9191	0,1948	0,2444	0,530	0,969
75°	0,966	75,4°	0,9677	0,2051	0,2574	0,520	0,982
90°	1,000	84,9°	0,9960	0,2111	0,2649	0,514	0,990
105°	0,966	94,9°	0,9962	0,2111	0,2649	0,514	0,990
120°	0,866	104,8°	0,9573	0,2029	0,2546	0,522	0,975
135°	0,707	119,6°	0,8695	0,1843	0,2312	0,541	0,956
150°	0,500	136,7°	0,6858	0,1453	0,1824	0,580	0,907
165°	0,259	154,0°	0,4384	0,0929	0,1166	0,632	0,842
180°	0,000	174,9°	0,0889	0,0188	0,0236	0,706	0,749

 φ aus Bild 21 β aus Bild 17

Schaufelstellung

	φ	β
1. Eintritt U.K.	34,5°	51,7°
2. Eintritt Mitte	46,5°	58,5°
3. Eintritt O.K.	82,1°	77,7°
4. Austritt O.K.	97,4°	89,7°
5. Austritt Mitte	133,5°	117,6°
6. Austr. U.K.	145,5°	131,0°

M

			①	②	③	U.K.	O.K.
φ	$\sin \varphi$	β	$\sin \beta$	$\frac{0,212}{\cdot ①}$	$\frac{0,266}{\cdot ①}$	$\frac{0,725}{- ②}$	$\frac{0,725}{+ ③}$
0°	0,000	59,0°	0,8572	0,1817	0,2280	0,543	0,953
15°	0,259	67,6°	0,9245	0,1959	0,2459	0,529	0,971
30°	0,500	73,1°	0,9568	0,2028	0,2545	0,522	0,980
45°	0,707	77,2°	0,9751	0,2067	0,2593	0,518	0,984
60°	0,866	81,0°	0,9877	0,2093	0,2627	0,516	0,988
75°	0,966	84,2°	0,9949	0,2109	0,2646	0,514	0,990
90°	1,000	88,0°	0,9994	0,2118	0,2658	0,513	0,991
105°	0,966	92,0°	0,9994	0,2118	0,2658	0,513	0,991
120°	0,866	96,7°	0,9932	0,2105	0,2641	0,515	0,989
135°	0,707	103,5°	0,9721	0,2060	0,2585	0,519	0,984
150°	0,500	111,4°	0,9311	0,1973	0,2476	0,528	0,973
165°	0,259	125,1°	0,8181	0,1734	0,2176	0,552	0,943
180°	0,000	146,5°	0,5519	0,1170	0,1468	0,608	0,872

 φ aus Bild 21 β aus Bild 17

Schaufelstellung

	φ	β
1. Eintritt U.K.	31,3°	73,6°
2. Eintritt Mitte	46,5°	77,7°
3. Eintritt O.K.	80,5°	85,1°
4. Austritt O.K.	98,4°	90,0°
5. Austritt Mitte	133,5°	102,0°
6. Austritt U.K.	148,5°	110,2°

$$\frac{T_a}{R_z} = 0,487 \quad \lambda = \frac{\sqrt{T_a/R_z}}{2\pi} \cdot \frac{F_T}{r_n} \quad \frac{\sqrt{T_a/R_z}}{2\pi} = 0,1111$$

	F_T	$G = 0,25$			$G = 0,5$			$G = 1,5$			$G = 3,5$		
		r_n	λ	η	r_n	λ	η	r_n	λ	η	r_n	λ	η
G	0,75	—	—	—	—	—	—	0,114	0,731	0,57	0,159	0,524	0,39
	1,25	0,140	0,994	0,59	0,156	0,891	0,61	0,232	0,599	0,45	—	—	—
	1,75	0,194	1,002	0,59	0,223	0,873	0,61	—	—	—	—	—	—
	2,25	0,252	0,995	0,60	0,301	0,831	0,545	—	—	—	—	—	—
H	0,75	—	—	—	—	—	—	0,116	0,719	0,64	0,160	0,521	0,46
	1,25	0,143	0,971	0,67	0,159	0,874	0,705	0,219	0,635	0,54	—	—	—
	1,75	0,198	0,983	0,70	0,223	0,873	0,705	—	—	—	—	—	—
	2,25	0,255	0,981	0,71	0,293	0,854	0,705	—	—	—	—	—	—
I	0,75	—	—	—	0,100	0,834	0,68	0,123	0,678	0,65	0,158	0,528	0,50
	1,25	0,154	0,902	0,70	0,168	0,827	0,71	0,225	0,649	0,60	—	—	—
	1,75	0,209	0,931	0,70	0,233	0,835	0,71	—	—	—	—	—	—
	2,25	0,268	0,934	0,69	0,301	0,831	0,71	—	—	—	—	—	—
J	0,75	—	—	—	0,100	0,834	0,695	0,129	0,646	0,64	0,163	0,511	0,51
	1,25	0,157	0,886	0,70	0,175	0,794	0,73	0,229	0,607	0,605	—	—	—
	1,75	0,217	0,896	0,70	0,239	0,814	0,75	—	—	—	—	—	—
	2,25	0,283	0,885	0,695	0,315	0,795	0,74	—	—	—	—	—	—
K	0,75	—	—	—	—	—	—	0,115	0,725	0,52	0,165	0,505	0,39
	1,25	0,141	0,986	0,61	0,159	0,874	0,64	0,300	0,464	0,30	—	—	—
	1,75	0,198	0,984	0,61	0,227	0,857	0,64	—	—	—	—	—	—
	2,25	0,259	0,966	0,60	0,302	0,829	0,53	—	—	—	—	—	—
L	0,75	—	—	—	—	—	—	0,116	0,719	0,66	0,158	0,527	0,475
	1,25	0,143	0,972	0,70	0,161	0,863	0,71	0,231	0,601	0,525	—	—	—
	1,75	0,205	0,950	0,70	0,231	0,842	0,705	—	—	—	—	—	—
	2,25	0,266	0,941	0,71	0,310	0,807	0,605	—	—	—	—	—	—
M	0,75	—	—	—	0,103	0,810	0,71	0,126	0,662	0,72	0,167	0,499	0,55
	1,25	0,160	0,869	0,77	0,177	0,785	0,79	0,238	0,584	0,61	—	—	—
	1,75	0,225	0,865	0,805	0,248	0,785	0,80	—	—	—	—	—	—
	2,25	0,290	0,864	0,81	0,326	0,767	0,79	—	—	—	—	—	—

Winkel α_n mit zugehörigen η vergleichen

	Schaufel- Stellung	$G = 0,25$				$G = 0,5$				$G = 1,5$				$G = 3,5$	
		$\beta_T = 12,5^\circ$	$1,75^\circ$	$2,25^\circ$	$\beta_T = 0,75^\circ$	$1,25^\circ$	$1,75^\circ$	$2,25^\circ$	$\beta_T = 0,75^\circ$	$1,25^\circ$	$1,75^\circ$	$\beta_T = 0,75^\circ$	$1,75^\circ$	$\beta_T = 0,75^\circ$	$1,25^\circ$
(A)	1.	$11,5^\circ$	$11,5^\circ$	$11,5^\circ$	—	$17,9^\circ$	$19,0^\circ$	$20,2^\circ$	$26,0^\circ$	$33,8^\circ$	$38,3^\circ$	$38,8^\circ$	$38,3^\circ$	$38,8^\circ$	$49,6^\circ$
	2.	$9,2^\circ$	$9,2^\circ$	$9,5^\circ$	—	$18,9^\circ$	$21,0^\circ$	$22,5^\circ$	$30,8^\circ$	$40,8^\circ$	$46,9^\circ$	$47,2^\circ$	$46,9^\circ$	$47,2^\circ$	$58,5^\circ$
	3.	} Oberkante taucht nicht ein				—				—				—	
	4.														
	5.	$5,5^\circ$	$5,5^\circ$	$5,5^\circ$	—	$14,9^\circ$	$17,0^\circ$	$18,3^\circ$	$26,8^\circ$	$37,0^\circ$	$43,1^\circ$	$43,5^\circ$	$43,1^\circ$	$43,5^\circ$	$55,5^\circ$
	6.	$16,0^\circ$	$16,0^\circ$	$16,0^\circ$	—	$22,0^\circ$	$23,5^\circ$	$24,5^\circ$	$30,1^\circ$	$37,5^\circ$	$42,0^\circ$	$42,4^\circ$	$42,0^\circ$	$42,4^\circ$	$52,5^\circ$
	η	$0,80$	$0,83$	$0,845$	—	$0,77$	$0,77$	$0,76$	$0,66$	$0,62$	$0,47$	$0,51$	$0,47$	$0,51$	$0,33$
(B)	1.	$+9,3^\circ$	$+9,3^\circ$	$+9,3^\circ$	$14,0^\circ$	$14,9^\circ$	$15,5^\circ$	$16,9^\circ$	$23,1^\circ$	$29,6^\circ$	—	$35,0^\circ$	—	$35,0^\circ$	—
	2.	$+6,0^\circ$	$+6,0^\circ$	$+6,0^\circ$	$11,9^\circ$	$13,0^\circ$	$14,0^\circ$	$15,5^\circ$	$23,8^\circ$	$31,5^\circ$	—	$38,2^\circ$	—	$38,2^\circ$	—
	3.	$-6,0^\circ$	$-6,0^\circ$	$-6,0^\circ$	$25,9^\circ$	$31,5^\circ$	$35,6^\circ$	$42,5^\circ$	$63,5^\circ$	$73,8^\circ$	—	$78,3^\circ$	—	$78,3^\circ$	—
	4.	$-15,0^\circ$	$-15,0^\circ$	$-15,0^\circ$	$14,0^\circ$	$18,5^\circ$	$23,0^\circ$	$30,0^\circ$	$52,7^\circ$	$63,4^\circ$	—	$69,2^\circ$	—	$69,2^\circ$	—
	5.	$+4,9^\circ$	$+4,9^\circ$	$+4,9^\circ$	$11,0^\circ$	$12,0^\circ$	$13,0^\circ$	$14,5^\circ$	$23,0^\circ$	$30,5^\circ$	—	$37,1^\circ$	—	$37,1^\circ$	—
	6.	$+16,7^\circ$	$+16,7^\circ$	$+16,7^\circ$	$21,2^\circ$	$22,0^\circ$	$22,9^\circ$	$24,0^\circ$	$30,1^\circ$	$36,0^\circ$	—	$41,0^\circ$	—	$41,0^\circ$	—
	η	$0,75$	$0,79$	$0,80$	$0,70$	$0,745$	$0,74$	$0,71$	$0,67$	$0,55$	—	$0,48$	—	$0,48$	—
(C)	1.	$+9,1^\circ$	$+9,1^\circ$	$+9,6^\circ$	$+12,2^\circ$	$+14,0^\circ$	$14,3^\circ$	—	$22,1^\circ$	—	—	$31,4^\circ$	—	$31,4^\circ$	—
	2.	$+4,5^\circ$	$+4,5^\circ$	$+5,0^\circ$	$+8,1^\circ$	$+10,2^\circ$	$10,9^\circ$	—	$20,4^\circ$	—	—	$32,0^\circ$	—	$32,0^\circ$	—
	3.	$-1,2^\circ$	$-1,2^\circ$	$-0,2^\circ$	$+5,1^\circ$	$+9,0^\circ$	$9,8^\circ$	—	$26,1^\circ$	—	—	$43,2^\circ$	—	$43,2^\circ$	—
	4.	$-9,8^\circ$	$-9,8^\circ$	$-9,0^\circ$	$-3,7^\circ$	$0,0^\circ$	$0,8^\circ$	—	$17,5^\circ$	—	—	$35,8^\circ$	—	$35,8^\circ$	—
	5.	$+7,0^\circ$	$+7,0^\circ$	$+7,4^\circ$	$+10,6^\circ$	$+12,7^\circ$	$12,2^\circ$	—	$22,9^\circ$	—	—	$34,7^\circ$	—	$34,7^\circ$	—
	6.	$+20,0^\circ$	$+20,0^\circ$	$+20,3^\circ$	$+23,0^\circ$	$+24,5^\circ$	$25,0^\circ$	—	$32,6^\circ$	—	—	$41,6^\circ$	—	$41,6^\circ$	—
	η	$0,70$	$0,71$	$0,73$	$0,66$	$0,715$	$0,725$	—	$0,63$	—	—	$0,46$	—	$0,46$	—
(D)	1.	$+13,1^\circ$	$+12,9^\circ$	$+13,3^\circ$	$+16,1^\circ$	$16,4^\circ$	—	—	$23,8^\circ$	—	—	—	—	—	—
	2.	$+4,0^\circ$	$+3,9^\circ$	$+4,2^\circ$	$+7,9^\circ$	$8,1^\circ$	—	—	$16,8^\circ$	—	—	—	—	—	—
	3.	$-1,1^\circ$	$-1,6^\circ$	$-0,8^\circ$	$+4,0^\circ$	$+4,5^\circ$	—	—	$16,4^\circ$	—	—	—	—	—	—
	4.	$-8,5^\circ$	$-8,9^\circ$	$-8,1^\circ$	$-3,6^\circ$	$-3,0^\circ$	—	—	$8,6^\circ$	—	—	—	—	—	—
	5.	$+9,0^\circ$	$+8,7^\circ$	$+9,1^\circ$	$+12,7^\circ$	$+13,0^\circ$	—	—	$21,3^\circ$	—	—	—	—	—	—
	6.	$+25,0^\circ$	$+24,8^\circ$	$+25,1^\circ$	$+28,1^\circ$	$+28,2^\circ$	—	—	$35,0^\circ$	—	—	—	—	—	—
	η	$0,57$	$0,58$	$0,64$	$0,58$	$0,62$	—	—	$0,58$	—	—	—	—	—	—

Winkel α_n mit zugehörigen η vergleichen

	Schaufel- Stellung	$G = 0,25$				$G = 0,5$				$G = 1,5$		$G = 3,5$
		$\sigma_T = 1,25$	1,75	2,25	$\sigma_T = 0,75$	1,25	1,75	2,25	$\sigma_T = 0,75$	1,25	$\sigma_T = 0,75$	$\sigma_T = 0,75$
G	1.	+31,2°	+30,7°	+31,2°	—	+37,0°	+38,1°	+40,5°	+46,2°	+53,9°	58,1°	
	2.	+14,7°	+14,0°	+14,7°	—	+22,8°	+24,0°	+23,4°	+35,2°	+45,9°	51,9°	
	3.	-63,8°	-64,6°	-63,8°	—	-52,0°	-49,0°	-39,8°	-4,3°	+43,1°	56,5°	
	4.	-44,6°	-45,1°	-44,6°	—	-32,5°	-29,5°	-20,2°	+16,0°	+64,4°	73,5°	
	5.	+29,5°	+29,0°	+29,5°	—	+37,9°	+39,2°	+42,7°	+50,7°	+61,1°	67,2°	
	6.	+42,9°	+42,3°	+42,9°	—	+49,0°	+50,1°	+52,7°	+58,6°	+66,3°	71,0°	
	η	0,59	0,59	0,60	—	0,61	0,61	0,545	0,57	0,45	0,39	
H	1.	+17,1°	+16,3°	+16,7°	—	+23,1°	+23,2°	+24,2°	+32,3°	37,3°	44,1°	
	2.	+2,2°	+1,1°	+1,3°	—	+9,9°	+10,0°	+11,5°	+22,2°	28,8°	37,9°	
	3.	-54,8°	-56,0°	-55,5°	—	-30,8°	-30,6°	-24,0°	+22,1°	41,0°	55,0°	
	4.	-22,6°	-24,5°	-24,0°	—	-2,0°	-1,8°	+3,5°	+45,0°	63,0°	78,6°	
	5.	+23,0°	+22,1°	+22,3°	—	+30,7°	+30,8°	+32,1°	+43,1°	50,0°	59,0°	
	6.	+34,0°	+33,2°	+33,5°	—	+39,8°	+39,9°	+40,9°	+48,2°	54,3°	61,1°	
	η	0,67	0,70	0,71	—	0,705	0,705	0,705	0,64	0,54	0,46	
I	1.	+6,7°	+4,9°	+4,8°	+10,7°	+11,1°	+10,6°	+10,9°	+20,2°	24,0°	29,5°	
	2.	-4,4°	-6,6°	-6,9°	+1,0°	+1,7°	+0,9°	+1,4°	+13,3°	18,2°	25,5°	
	3.	-30,0°	-38,0°	-38,5°	-8,0°	-5,1°	-8,5°	-6,6°	+35,1°	44,0°	63,0°	
	4.	+1,0°	-9,0°	-10,0°	+27,6°	+31,2°	+27,5°	+29,4°	+72,0°	79,5°	87,0°	
	5.	+20,9°	+18,5°	+18,2°	+26,1°	+26,9°	+26,0°	+26,5°	+38,6°	43,2°	50,6°	
	6.	+27,0°	+25,3°	+25,2°	+31,2°	+31,6°	+31,1°	+31,4°	+41,0°	44,8°	50,1°	
	η	0,70	0,70	0,69	0,68	0,71	0,71	0,71	0,65	0,60	0,50	
J	1.	-8,7°	-9,3°	-8,6°	-5,3°	-2,8°	-4,0°	-3,0°	+6,5°	+9,0°	15,0°	
	2.	-13,2°	-14,0°	-13,1°	-9,0°	-6,8°	-7,2°	-6,0°	+6,1°	+9,2°	16,9°	
	3.	-2,7°	-6,0°	-2,5°	+12,0°	+21,5°	+17,1°	+21,4°	+43,8°	+47,2°	53,9°	
	4.	+24,9°	+21,2°	+25,0°	+39,5°	+49,3°	+44,9°	+49,2°	+73,1°	+76,9°	83,2°	
	5.	+14,8°	+14,0°	+14,9°	+18,9°	+22,0°	+20,5°	+19,9°	+34,0°	+37,1°	44,8°	
	6.	+17,0°	+16,2°	+17,0°	+20,0°	+22,6°	+21,3°	+22,5°	+31,7°	+34,0°	40,0°	
	η	0,70	0,70	0,695	0,695	0,73	0,75	0,74	0,64	0,605	0,51	

Winkel α_λ mit zugehörigen η verglichen

	Scheitel- Stellung	$\Theta = 0,25$						$\Theta = 0,5$				$\Theta = 1,5$		$\Theta = 3,5$
		$\varphi_T = 1,25$	1,75	2,25	$\varphi_T = 0,75$	1,25	1,75	2,25	2,75	3,25	3,75	4,25	4,75	$\varphi_T = 0,75$
(K)	1.	+35,3°	+35,5°	+36,7°	—	+42,0°	+43,0°	+44,9°	+50,9°	64,0°	64,0°	64,0°	64,0°	64,0°
	2.	+24,2°	+24,4°	+26,0°	—	+33,0°	+34,2°	+36,8°	+45,0°	63,0°	63,0°	63,0°	63,0°	63,0°
	3.	-40,0°	-39,9°	-37,2°	—	-20,5°	-15,8°	-7,0°	+34,0°	86,0°	82,8°	82,8°	82,8°	82,8°
	4.	-56,9°	-56,7°	-54,4°	—	-40,0°	-36,0°	-29,0°	+4,8°	60,0°	56,0°	56,0°	56,0°	56,0°
	5.	+15,2°	+15,3°	+16,7°	—	+23,7°	+25,0°	+27,1°	+35,7°	56,9°	53,8°	53,8°	53,8°	53,8°
	6.	+34,8°	+34,9°	+35,9°	—	+40,9°	+41,9°	+43,2°	+49,1°	63,9°	61,7°	61,7°	61,7°	61,7°
	η	0,61	0,61	0,60	—	0,64	0,64	0,53	0,52	0,30	0,39	0,39	0,39	0,39
(L)	1.	+49,0°	+20,3°	+20,9°	—	+25,5°	+26,9°	+29,1°	+34,5°	41,9°	46,3°	46,3°	46,3°	46,3°
	2.	+41,9°	+43,8°	+44,2°	—	+20,4°	+22,1°	+25,3°	+32,6°	42,2°	48,2°	48,2°	48,2°	48,2°
	3.	-46,0°	-42,0°	-40,1°	—	-15,0°	-5,5°	+15,0°	+15,3,1°	73,8°	80,0°	80,0°	80,0°	80,0°
	4.	-50,6°	-46,4°	-44,7°	—	-23,4°	-16,0°	-1,5°	+32,0°	56,0°	64,0°	64,0°	64,0°	64,0°
	5.	+8,2°	+10,0°	+10,6°	—	+16,7°	+18,1°	+21,1°	+28,0°	38,0°	44,2°	44,2°	44,2°	44,2°
	6.	+25,2°	+26,3°	+26,9°	—	+31,2°	+32,5°	+34,7°	+39,8°	46,9°	51,1°	51,1°	51,1°	51,1°
	η	0,70	0,70	0,71	—	0,71	0,705	0,605	0,66	0,525	0,475	0,475	0,475	0,475
(M)	1.	-14°	-1,1°	-1,0°	+2,1°	+3,9°	+3,9°	+5,0°	+11,5°	16,5°	22,0°	22,0°	22,0°	22,0°
	2.	0,0°	+0,4°	+0,5°	+5,0°	+7,0°	+7,0°	+8,7°	+17,2°	23,7°	30,3°	30,3°	30,3°	30,3°
	3.	+24,1°	+25,5°	+25,7°	+40,2°	+46,0°	+46,0°	+49,8°	+63,3°	69,7°	74,0°	74,0°	74,0°	74,0°
	4.	+18,3°	+20,0°	+20,3°	+36,2°	+42,0°	+42,0°	+46,0°	+59,9°	66,0°	70,3°	70,3°	70,3°	70,3°
	5.	+1,0°	+1,2°	+1,3°	+5,9°	+7,9°	+7,9°	+9,5°	+18,0°	24,3°	31,0°	31,0°	31,0°	31,0°
	6.	+7,8°	+8,0°	+8,1°	+11,2°	+12,9°	+12,9°	+14,0°	+20,4°	25,5°	29,9°	29,9°	29,9°	29,9°
	η	0,77	0,805	0,81	0,71	0,79	0,80	0,79	0,72	0,61	0,55	0,55	0,55	0,55

$\Sigma|\alpha_\lambda|$ und η

		$G = 0,25$				$G = 0,5$				$G = 1,5$				$G = 3,5$	
		$\Sigma \alpha_\lambda $	η	$\Sigma \alpha_\lambda $	η	$\Sigma \alpha_\lambda $	η	$\Sigma \alpha_\lambda $	η	$\Sigma \alpha_\lambda $	η	$\Sigma \alpha_\lambda $	η	$\Sigma \alpha_\lambda $	η
A	$\Sigma \alpha_\lambda $	42°	42°	2,25	42°	—	74°	80,5°	2,25	114°	149°	175°	172°	1,25	1,25
	η	0,80	0,83	0,845	—	—	0,77	0,77	0,76	0,66	0,62	0,47	0,51	0,33	—
B	$\Sigma \alpha_\lambda $	58°	58°	58°	97°	97°	112°	124°	143°	216°	265°	—	299°	—	—
	η	0,75	0,79	0,80	0,70	0,70	0,745	0,74	0,71	0,67	0,55	—	0,48	—	—
C	$\Sigma \alpha_\lambda $	52°	52°	51,5	63°	63°	70°	73°	—	142°	—	—	219°	—	—
	η	0,70	0,71	0,73	0,66	0,66	0,715	0,725	—	0,63	—	—	0,46	—	—
D	$\Sigma \alpha_\lambda $	61°	61°	61°	72°	72°	73°	—	—	122°	—	—	—	—	—
	η	0,57	0,58	0,64	0,58	0,58	0,62	—	—	0,58	—	—	—	—	—
E	$\Sigma \alpha_\lambda $	227°	226°	227°	—	—	231°	230°	223°	241°	335°	—	382°	—	—
	η	0,59	0,59	0,60	—	—	0,61	0,61	0,545	0,57	0,45	—	0,39	—	—
H	$\Sigma \alpha_\lambda $	154°	153°	153°	—	—	136°	136°	136°	214°	274°	—	336°	—	—
	η	0,67	0,70	0,71	—	—	0,705	0,705	0,705	0,64	0,54	—	0,46	—	—
I	$\Sigma \alpha_\lambda $	90°	102°	104°	105°	105°	108°	105°	106°	220°	254°	—	296°	—	—
	η	0,70	0,70	0,69	0,68	0,68	0,71	0,71	0,71	0,65	0,60	—	0,50	—	—
J	$\Sigma \alpha_\lambda $	81°	81°	81°	105°	105°	124°	115°	122°	196°	213°	—	254°	—	—
	η	0,70	0,70	0,695	0,695	0,695	0,73	0,75	0,74	0,64	0,605	—	0,51	—	—
K	$\Sigma \alpha_\lambda $	206°	207°	207°	—	—	200°	196°	188°	219,5°	399°	—	381°	—	—
	η	0,61	0,61	0,60	—	—	0,64	0,64	0,53	0,52	0,30	—	0,39	—	—
L	$\Sigma \alpha_\lambda $	161°	159°	157°	—	—	132°	121°	127°	220°	299°	—	334°	—	—
	η	0,70	0,70	0,71	—	—	0,71	0,705	0,605	0,66	0,525	—	0,475	—	—
M	$\Sigma \alpha_\lambda $	53°	56°	57°	101°	101°	120°	120°	133°	190°	226°	—	257,5°	—	—
	η	0,77	0,805	0,81	0,71	0,71	0,79	0,80	0,79	0,72	0,61	—	0,55	—	—