

IV. Die experimentellen Arbeiten zur Erforschung der energetischen Verhältnisse und zur Bestätigung der Modellgesetze.

1) Allgemeines über die Versuchseinrichtungen.

Die Aufgabe, für die verschiedenartigsten Verwendungszwecke geeignete Rührerformen vorzuschlagen und die für die Grossausführung zum Antrieb erforderlichen Leistungen voranzuberechnen, ergab die Notwendigkeit, Versuchseinrichtungen zu schaffen, mit deren Hilfe Untersuchungen im kleinen Maßstab schnellstens durchgeführt werden können. Da auf diese Apparate im experimentellen Teil des Berichtes immer wieder Bezug genommen wird, sei ihre Beschreibung vorangestellt.

Mit Rücksicht auf eine Möglichkeit zur Beobachtung der sich ausbildenden Strömungsformen werden die Versuche, wenn es sich irgendwie durchführen lässt, in Glasgefäßen vorgenommen. Die für die Untersuchungen im Kleinen am meisten benützten Gefäße besitzen einen Durchmesser von 335 mm. Für diese Abmessung sind die praktisch überhaupt in Frage kommenden Rührer aus den gebräuchlichen Werkstoffen vorrätig, ebenso Strombrecher, **Schlangen**, Tauchrohre und sonstige Einbauten verschiedener Art. Da sehr oft die Notwendigkeit besteht, Reaktionen unmittelbar im Modell durchzuführen, sind auch druckbeständige emaillierte Gefäße mit Dampfmantel oder Ölheizung vorhanden, in denen mit den verschiedenen Rührerformen gearbeitet werden kann.

Zum Vergleich des Aussehens der Strömungsformen bei verschiedenen Arten der Rühreranordnung dienen nebeneinandergestellte Glasgefäße (Abb.54). Die von einem Regelmotor angetriebene Tischtransmission ermöglicht die Verwendung von Drehzahlen bis 1500 U/min.

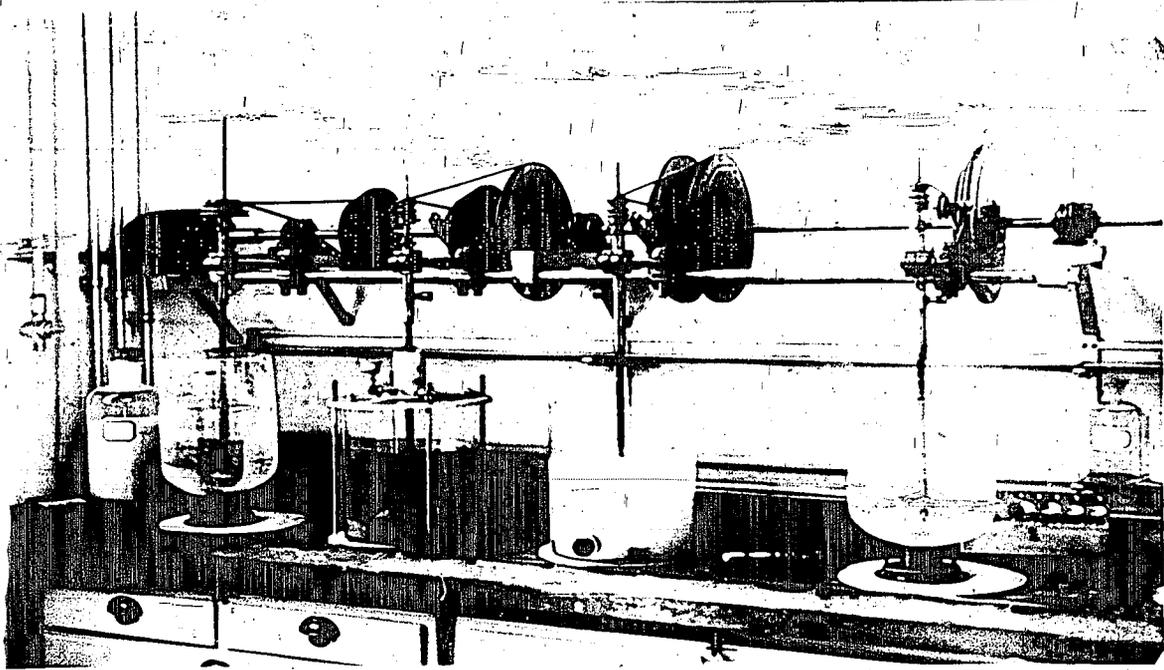


Abb. 54.

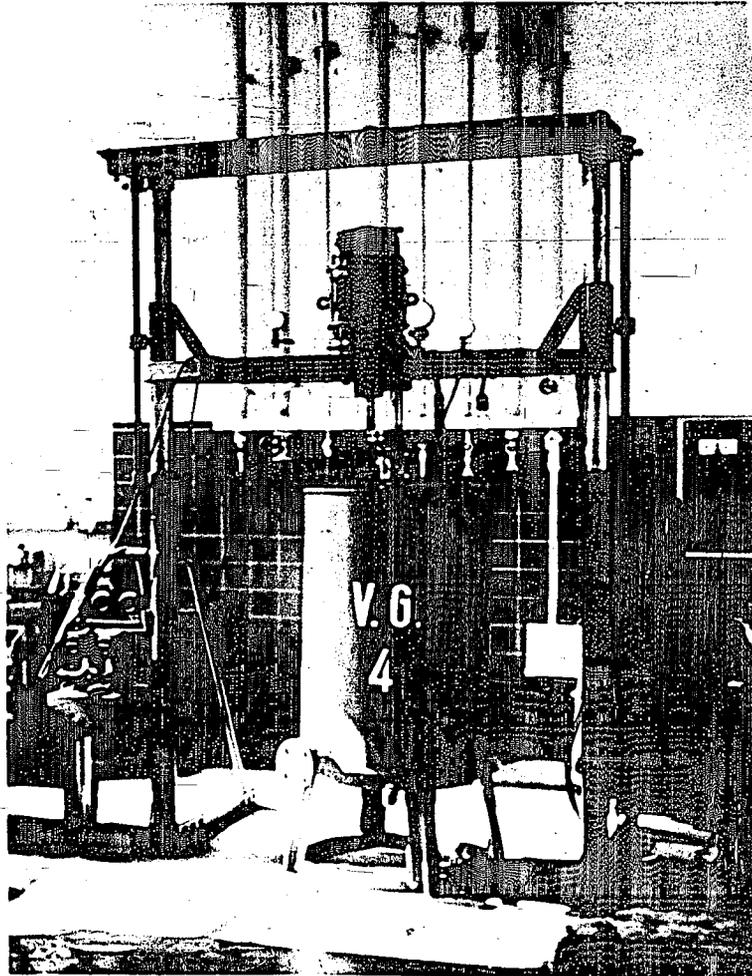


Abb. 55.

Für die Durchführung von Drehmomentenmessungen bei Rührvorgängen wird der in Abb. 55 dargestellte Versuchstand benützt. Der mittels B a r k h a u s e n-Schaltung geregelte, auf der Traverse verschiebbar befestigte Getriebemotor besitzt zwei nach unten gerichtete Wellenenden (Untersetzungsverhältnis 1:1 und 1:4,5) in deren Morsekonus die Dynamometer wahlweise eingesteckt werden können ^{*)}. Bei Drehzahlen unter

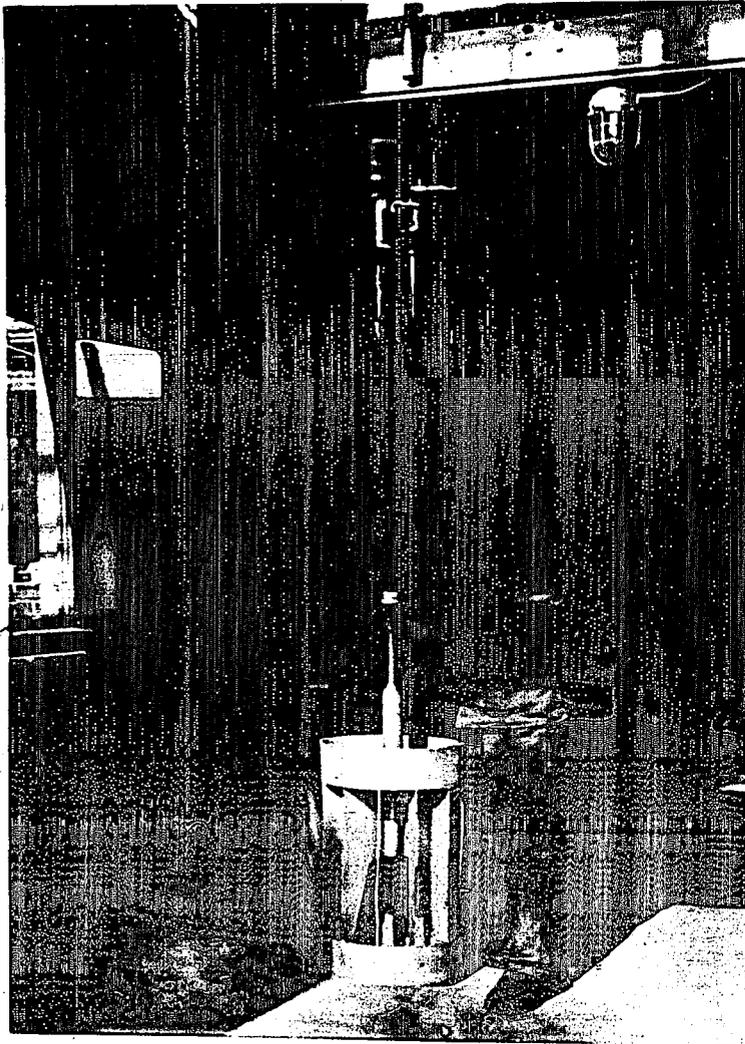


Abb. 56.

200 U/min. wird die langsamerlaufende Welle benützt, um die durch die Feldunregelmässigkeiten des Motors bedingten Drehzahlschwankungen klein zu halten. Die höchstmögliche Drehzahl beträgt 1500 U/min., die Maximalleistung 1,2 KW. Bei den Versuchen können Gefässe bis 1200 mm \varnothing und 1500 mm Höhe benützt werden. Für Messungen in Gefässen bis 2500 mm \varnothing dient ein in der

Decke befestigtes Bohrwerk mit schwenkbarem Arm (Abb.56),

^{*)} Auf die Leistungsmessung wird weiter unten eingegangen.

die Drehzahlregelung erfolgt durch ein Leonard-Aggregat.

Zur Beobachtung der Vorgänge bei der Verwendung ausgesprochener Schnellrührer stehen zwei Einrichtungen nach Abb. 28 zur Verfügung, die auch zur messtechnischen Verfolgung von



Abb. 57.

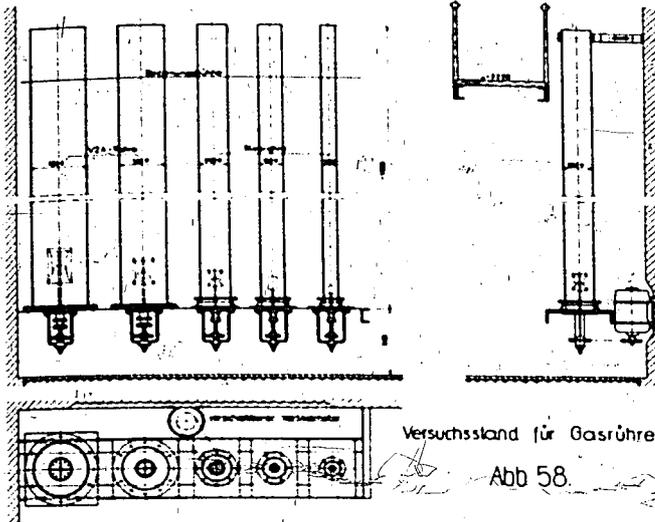
Reaktionsgeschwindigkeiten dienen. Für das Arbeiten bei höheren Temperaturen wird das Glasgefäss durch ein Metallgefäss mit elektrisch beheiztem Bad ersetzt. Eine besonders gestaltete Verschraubung an der Welle gestattet das rasche Auswechseln der Rührer und gewährleistet ein gutes schwingungsfreies Rundlaufen. Für die Messung der Drehmomente raschlaufender Rührer dient eine ebenfalls mit Barkhausen-Schaltung geregelte Vorrichtung (Abb. 57).

Durch seine besondere Anordnung können auch mit ihr Versuche in Gefässen von verhält-

nismässig grossem Durchmesser ausgeführt werden.

Für die Verfolgung der Gas- und Flüssigkeitsreaktionen in Gefässen mit sehr grosser Füllhöhe wird der in Abb. 58 dargestellte Versuchstand benützt. Die von unten durch Stopfbüchse eingeführten Rührerwellen werden durch den verschiebbar angeordneten Vertikal-Regelmotor angetrieben.

Die Gefässe von 100, 150 und 200 mm \varnothing bestehen aus Glas, die



grösseren (300 und 400 mm \varnothing) aus Metall. Die Bodenplatten sind mit V2A-Blech überzogen; durch Wahl von Rohren aus geeigneten Werkstoffen können somit Reaktionen verschiedenster Art ohne Gefahr einer Korrosion bzw. einer Beeinflussung durch gelöste Fremd-

stoffe durchgeführt werden. Die Raumhöhe erlaubt die Benützung von Röhren bis 5 m Länge.

2) Die Dynamometer.

Für die Bestätigung der theoretisch gefundenen Modellgesetze, wie auch zur Bemessung der laufend auf Grund der Ergebnisse von Kleinversuchen zu entwerfenden Rührwerksantrieben besteht die Notwendigkeit, unter den verschiedensten Bedingungen rasch und hinreichend genau die zur Aufrechterhaltung der Bewegung erforderlichen Drehmomente feststellen zu können.

Die Wichtigkeit einer wenig Zeit erfordernden Drehmomentmessung geht daraus hervor, dass zur Ermittlung der in dem vorliegenden Bericht wiedergegebenen Zusammenhänge etwa 80 000 Einzelwerte festgestellt werden mussten.

In der Hauptsache gelangte hierfür, nachdem es noch einige Abänderungen erfahren hatte, das von

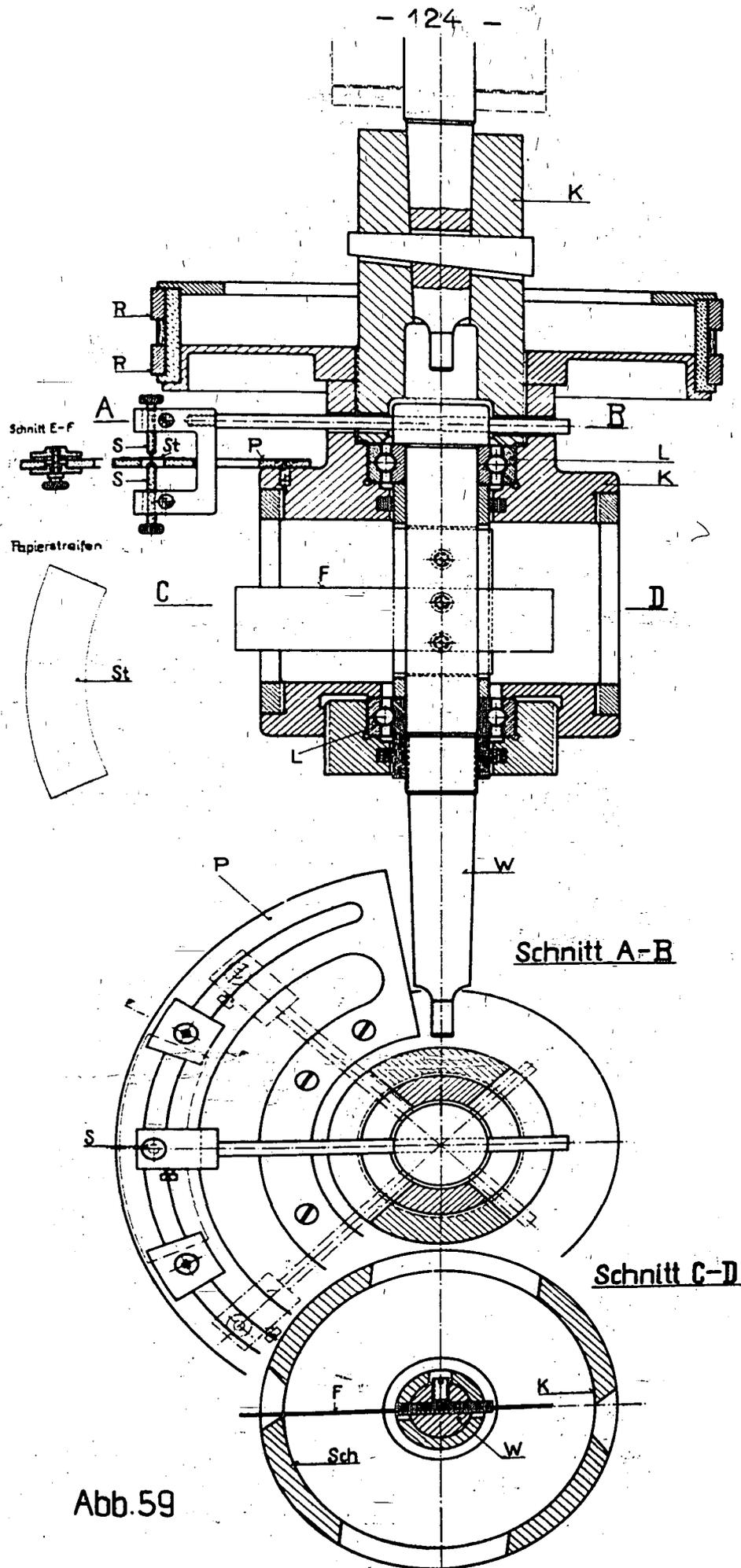


Abb.59

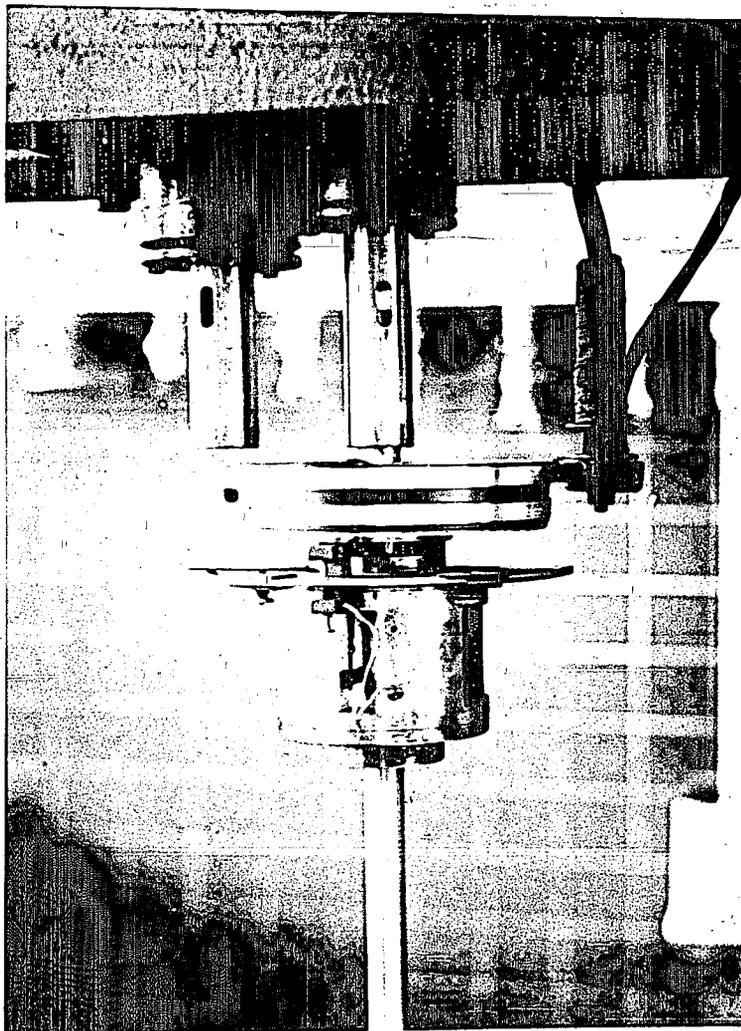


Abb. 59.

S c h i n d l e r angegebene von H a i l e r verbesserte Federdynamometer (Abb. 59) zur Verwendung. Dieses besteht aus mit einem Morsekonus zum Einstecken in die Abtriebswelle versehenen zylindrischen Kopf K, in dem die eigentliche Rührerwelle W in den Lagern LL drehbar befestigt ist. Das untere Ende der Welle läuft in einen Konus aus, an dem die Rührer befestigt werden können. Das Moment wird durch die Schneide Sch des Kopfes über eine der Grösse des in Frage kommenden Messbereiches entsprechend ausgewählte Blattfeder F auf die Welle übertragen; je nach der Stärke der auftretenden Kräfte tritt eine mehr oder minder grosse Relativverdrehung zwischen Kopf und Welle auf. Zur Registrierung des Drehmomentes wird beim Stillstand der Welle auf der am Kopf befestigten geschlitzten Pertinaxplatte P ein Papierstreifen glatt eingespannt und auf diesem der Nullpunkt mittels eines zwischen den Spitzen S-S überspringenden Funkens markiert (Stromzuführung über Schleifringe R-R). Beim Rühren entfernen sich die mit ihrer Halterung an der Welle befestigten Spitzen um ein der Federbiegung entsprechendes Mass von der Nullstellung. Da die neue Lage während der Drehung markiert werden kann, ist das Drehmoment aus dem Abstand der beiden Funkenlöcher feststellbar. Durch eine geeignete Form der Spitzen, wie auch durch einen engen Abstand ist ein seitliches Ueberschlagen der Funken vermieden. Die Ablesegenauigkeit beträgt 0,2 mm; durch eine geeignete Auswahl der Federn ist zu erreichen, dass der gesamte Ausschlag zwischen 10 und 20 mm liegt ¹⁾. Bei dem Einsetzen der Feder wird durch eine Lehre der Befestigungskeil B so eingestellt, dass die freie Bieglungslänge immer die gleiche ist. Ein Anschlag im Dynamometer verhindert eine Beanspruchung der

1) Die schwächste Feder besitzt einen Messbereich von 0 bis 2 cmkg, die stärkste von 0 bis 50 cmkg.

Messfedern über die Proportionalitätsgrenze hinaus. Die Vorrichtung zum Eichen der Federn ist in Abb.60 wiedergegeben. Ein

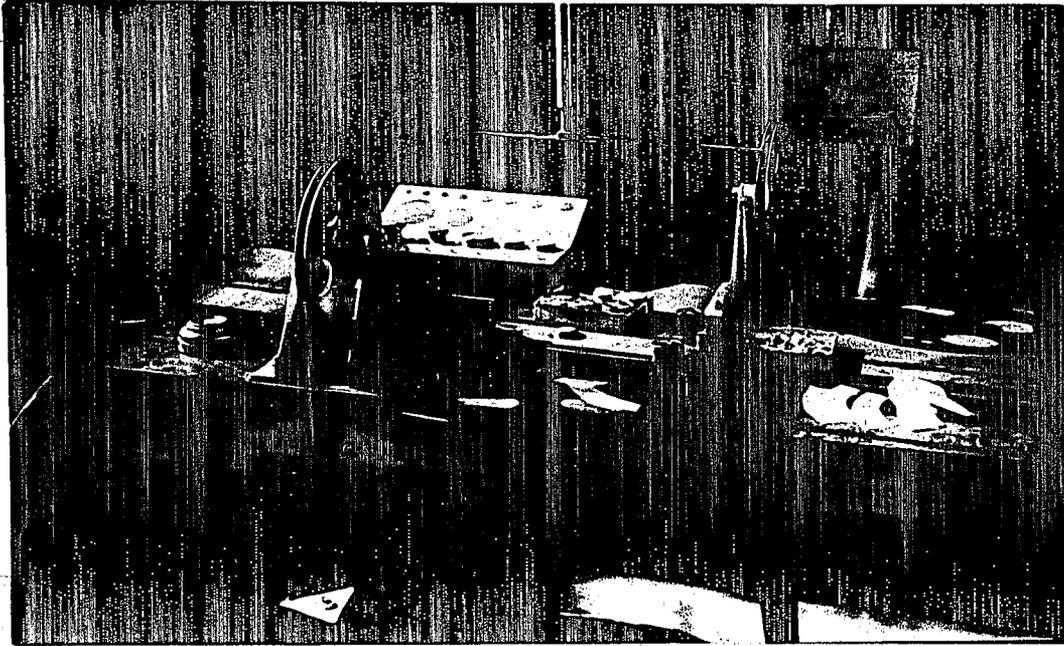


Abb.60.

an der Welle des Dynamometers befestigter, gleicharmiger Doppelhebel wird durch die auf die beiden Gewichtsschalen aufgelegten jeweils gleich grossen Belastungen solange verdreht, bis die Federspannung den Kräften das Gleichgewicht hält. Durch leichtes Beklopfen des Dynamometers kann der Einfluss der Reibung ausgeschaltet werden. Die Anordnung mit dem Doppelhebel hat den Zweck, die Eichung mit reinen Drehmomenten so durchführen zu können, dass eine Biegebungsbeanspruchung der Welle vermieden wird. Nach der Federverformung durch die Belastung wird der Dynamometerkopf jeweils soviel zurückgedreht, dass die Zugschnüre wieder wie zuvor mit dem Hebel einen rechten Winkel einschliessen und dann erst die Messung des Ausschlags vorgenommen.

Die Eichung aller verwendeten Federn wurde bei steigender und fallender Belastung durchgeführt. Jede Feder wurde während der Eichung mehrmals aus- und eingebaut. Nur

solche Federn dienen später für die Messung, bei denen die Eichpunkte eine hinreichend kleine Streuung aufwiesen und bei denen die Eichkurve

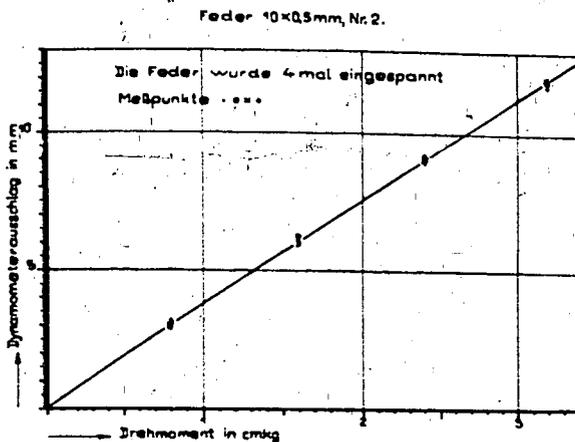


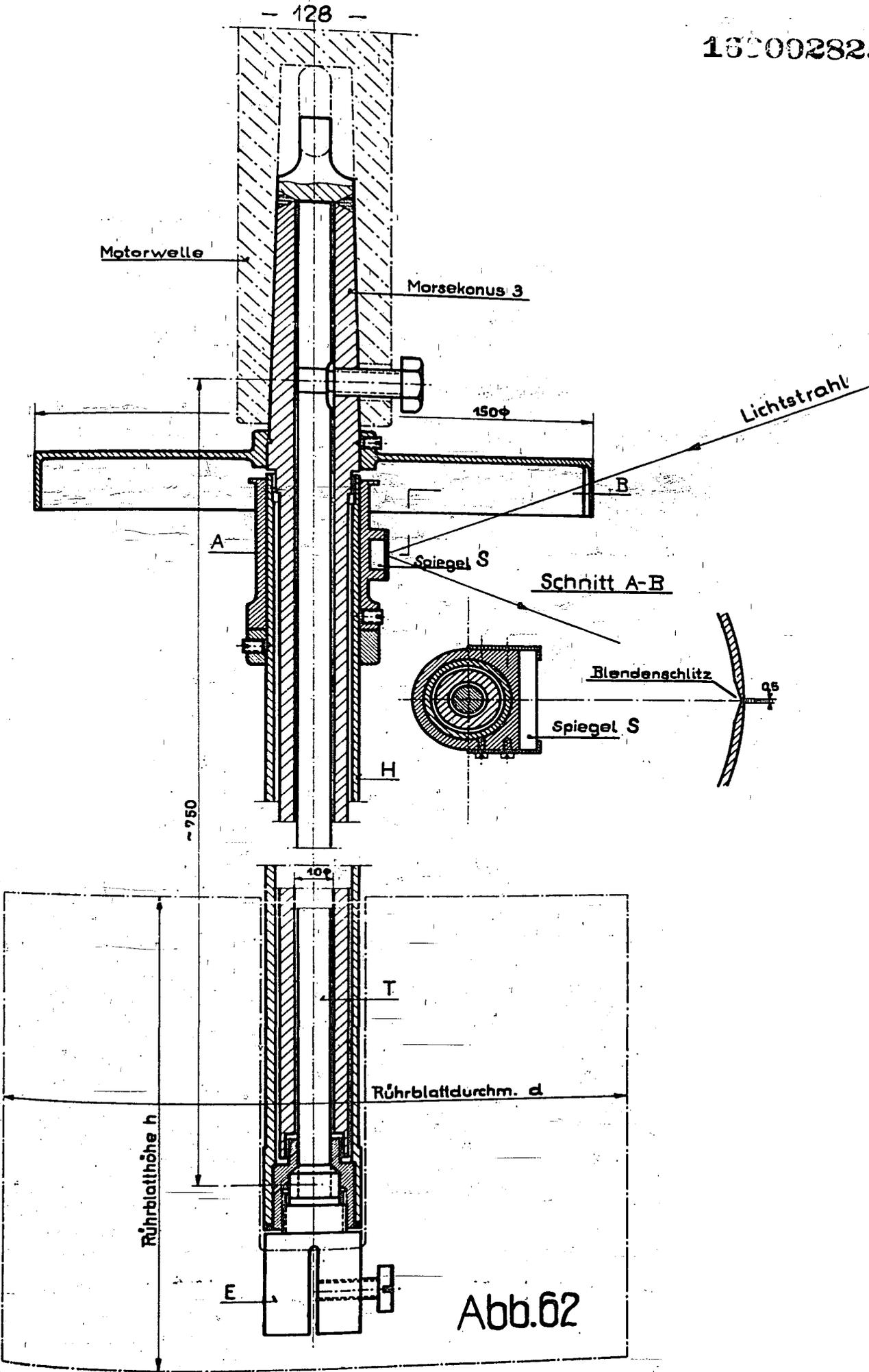
Abb. 61.

denen die Eichkurve zwanglos durch den Nullpunkt gelegt werden konnte. Ein Beispiel für eine gute Feder zeigt Abb. 61.

Die erfolgversprechenden Versuche mit raschlaufenden Rührern machten die Entwicklung eines neu-

en Dynamometers notwendig, das die Messung der Momente bei hohen Drehzahlen gestattet, da das oben beschriebene Gerät nur bis etwa 500 U/min. brauchbar ist. Diese in Abb. 57 dargestellte Einrichtung besteht aus einer doppelt gelagerten Welle mit unten angeordnetem Kupplungskopf, in den die eigentlichen Rührerwellen eingeschraubt werden. Der zum Antrieb dienende Motor von 0.5 KW wurde an einer in der Kupplung befestigten, wassergekühlten Trommel abgebremst und so der Wirkungsgrad der gesamten Vorrichtung als Funktion der Belastung und der Drehzahl bestimmt. Die Genauigkeit der Leistungsmessung reicht für den gedachten Zweck aus.

Ein drittes Torsionsdynamometer mit optischer Ablesung des Momentes befindet sich in der Entwicklung. Es besteht aus einer Hohlwelle H (Abb.62), an deren unterem Ende sich die Einspannvorrichtung E für die Rührer befindet. Das Drehmoment wird durch den auswechselbaren Torsionsstab T übertragen. Gibt dieser eine Leistung an den Rührer ab, dann



169002826

verdreht sich der an der Hohlwelle oben befestigte Spiegel S relativ zu dem am Konus befestigten Kranz. Die Verdrehung gegen die Nullage kann gemessen werden, indem man einen in dem Kranz angebrachten Schlitz, der bei jeder Umdrehung mittels einer Bogenlampe durch einen feststehenden Spalt kurzzeitig belichtet wird, über einen in der Halterung befestigten Zylinderspiegel auf einer Skala abbildet. Ebenso ist es möglich, über einen in der Halterung befestigten Planspiegel mittels eines mit Fadenkreuz versehenen Fernrohrs die Verdrehung über den feststehenden und umlaufenden Spalt an einer Skala abzulesen.

3) Der experimentelle Nachweis der Gültigkeit der Modellgesetze für rein viskose Flüssigkeiten.

Nachstehend sollen Ergebnisse der systematischen Versuche für die Aufstellung von Rechentafeln zum Teil vorweggenommen werden, um anhand ihres Verlaufs die Notwendigkeit der später zu beschreibenden Untersuchungen darlegen zu können.

Zum Nachweis einer eindeutigen Abhängigkeit des Beiwertes c der Rührerformel (Gl. 20)

$$N = c \cdot 7,17 \cdot n^3 \cdot d^4 \cdot h \cdot \gamma \cdot 10^{-5}$$

von der Reynolds'schen und Froude'schen Kennzahl war es notwendig, die Zusammenhänge für einen möglichst weiten Bereich dieser Veränderlichen zu ermitteln.

Der Froude'schen Kennzahl $\frac{v^2}{g l}$, deren Grösse im wesentlichen durch die Umlaufgeschwindigkeit des Rührers gegeben ist, waren für die Versuche mit Rücksicht auf die Messgenauigkeit verhältnismässig enge Grenzen gesetzt: bei sehr kleinen Drehzahlen wird durch die beschränkte Ablesegenauig-

Spez. Gewicht, dynamische und kinematische Zähigkeit der verwendeten Modellflüssigkeiten

Temp. t	Wasser		Zuckerlösung		Tetrachlorstoff		Gasmasch.oe!		Heißdampfne!			
	γ	$\eta \cdot 10^4$	$\nu \cdot 10^6$	γ	$\eta \cdot 10^4$	$\nu \cdot 10^6$	γ	$\eta \cdot 10^4$	$\nu \cdot 10^6$	γ	$\eta \cdot 10^4$	$\nu \cdot 10^6$
°C	kg/m ³	kgsek/m ²	m ² /sek	kg/m ³	kgsek/m ²	m ² /sek	kg/m ³	kgsek/m ²	m ² /sek	kg/m ³	kgsek/m ²	m ² /sek
10	999,73	1,3360	1,3150	1226,2	2,181	17,46	1613	1152	0,699	919,80	1135,0	1200
20	998,26	1,0260	1,0090	1221,3	1,340	10,52	1594	979	0,602	913,45	447,0	480
30	995,55	0,8170	0,8020	1261,4	8,95	7,23	1575	860	0,536	907,00	200,5	225
40	992,22	0,6690	0,6620	1211,3	6,76	5,47	1555	754	0,476	900,65	104,5	118
50	988,06	0,5600	0,5610	1206,5	5,20	4,23	1536	666	0,426	894,32	59,6	67
60	983,18	0,4800	0,4815	1201,4	4,12	3,36	1516	595	0,3855	887,97	36,8	41,3
70	977,83	0,4144	0,4190				1497	536	0,351	881,63	24,1	27,0
80	971,92	0,3632	0,3687				1476,5			875,22	16,6	18,5
90	965,30	0,3210	0,3280							868,85	12,0	13,4
										860,08	12,60	14,2,5
										861,84	8,12	9,3,2
										855,95	5,58	6,4,3

Abb. 63.

169002827

keit der relative Fehler sehr gross, bei hohen Umlaufgeschwindigkeiten besteht die Gefahr einer Beeinflussung der Momentmessung durch Eigenschwingungen des Dynamometers. Immerhin konnte in jenem Bereich gearbeitet werden, der die Modelldrehzahlen für die Grossausführungen von langsam laufenden Rührern völlig umfasst (30 - 250 U/min.). Der Bereich der Reynolds'schen Zahlen, für den die Abhängigkeit der Beiwerte zu ermitteln war, ist weit grösser. Die sich durch Aenderung der Drehzahlen in den genannten Grenzen ergebenden Unterschiede dieser Kennziffern sind zwar noch kleiner als die der Frode'schen. Durch Wahl von Flüssigkeiten geeigneter Viskosität kann jedoch der Wert $\frac{vd}{\nu}$ in weitgehendem Masse geändert werden.

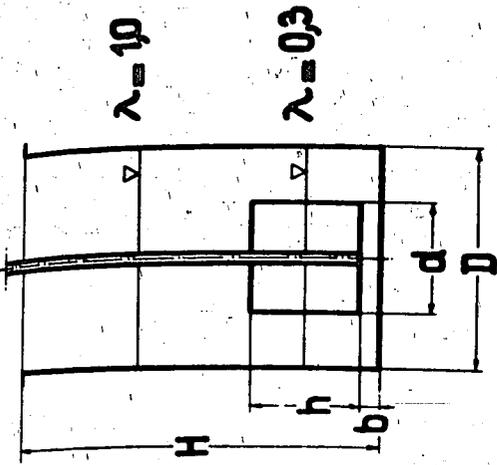
Zur Durchführung der bisherigen Versuche für die Aufstellung von Rechentafeln dienen folgende Flüssigkeiten:

- | | |
|---------------------------|----------------|
| 1.) Wasser | (~ 20 - 60°) |
| 2.) Tetrachlorkohlenstoff | (~ 20°) |
| 3.) Rohrzuckerlösungen | (~ 20°) |
| 4.) Gasmaschinenöl | (~ 20 - 80°) |
| 5.) Zylinderöl | (~ 15 - 70°) |

Für die in Frage kommenden Temperaturbereiche sind die zu den Berechnungen notwendigen Stoffbeiwerte in der Abb. 63 zusammengefasst. Mit Ausnahme der Werte für Tetrachlorkohlenstoff und Wasser wurden die spezifischen Gewichte und Zähigkeiten von der Physikalischen Abteilung Lu ermittelt. Von Zeit zu Zeit wurden die Stoffbeiwerte dieser dauernd verwendeten Flüssigkeiten nachgeprüft. Wie aus der Tabelle zu ersehen ist, bestehen zwischen den kinematischen Zähigkeiten von Wasser und Tetrachlorkohlenstoff im Vergleich zu denen der anderen verwendeten Stoffe keine sehr grossen Unterschiede. Die Verwendung

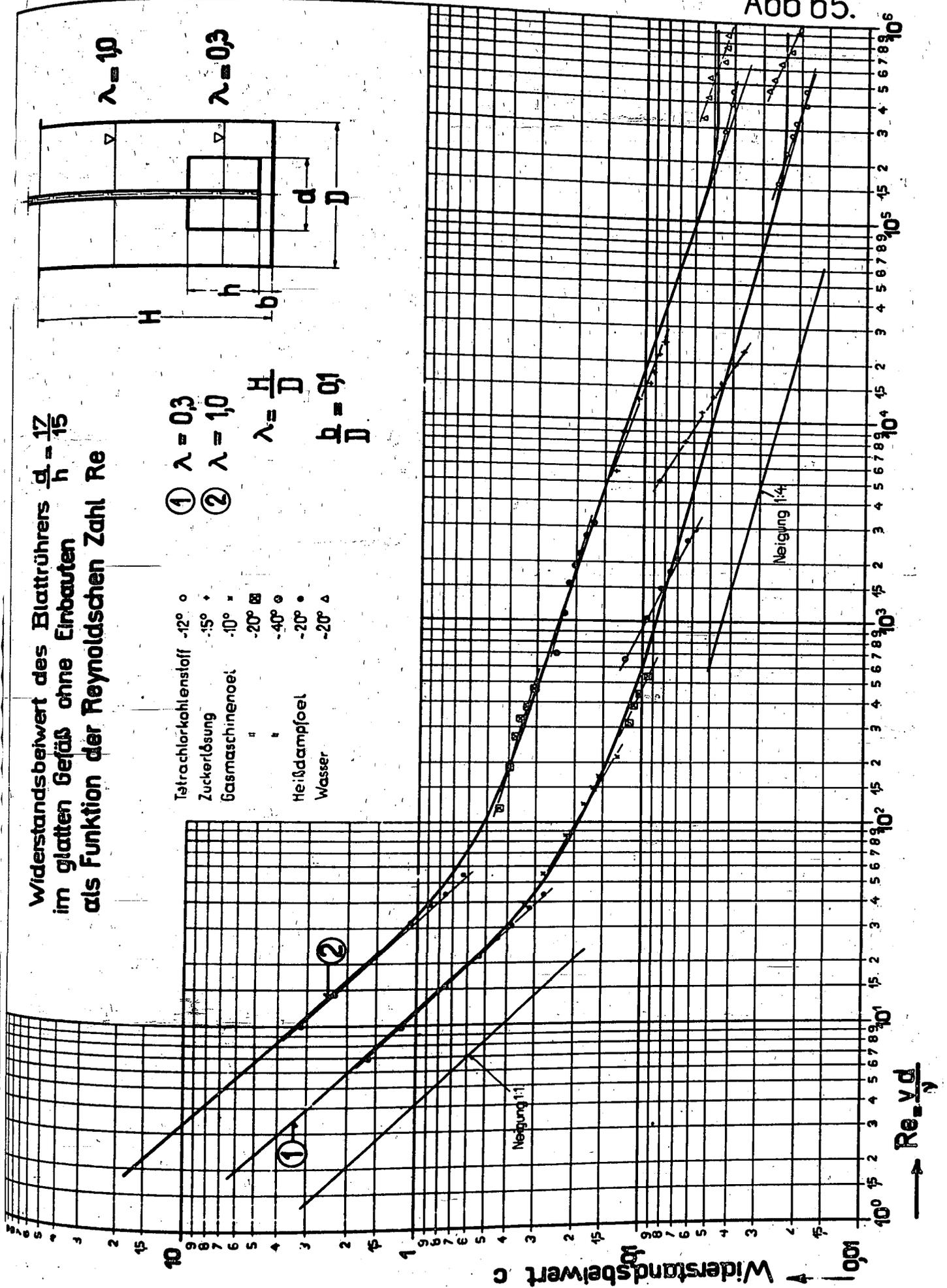
Abb 65.

Widerstandsbeiwert des Blattührers $\frac{d}{h} = \frac{17}{15}$
 im glatten Gefäß ohne Einbauten
 als Funktion der Reynoldsschen Zahl Re



- ① $\lambda = 0.3$
- ② $\lambda = 10$
- $\lambda = \frac{H}{D}$
- $\frac{b}{D} = 0.1$

Tetrachlorkohlenstoff	-12°	○
Zuckerlösung	-15°	◇
Gasmashinenoel	-10°	□
"	-20°	⊠
"	-40°	○
Heißdampföel	-20°	•
Wasser	-20°	△



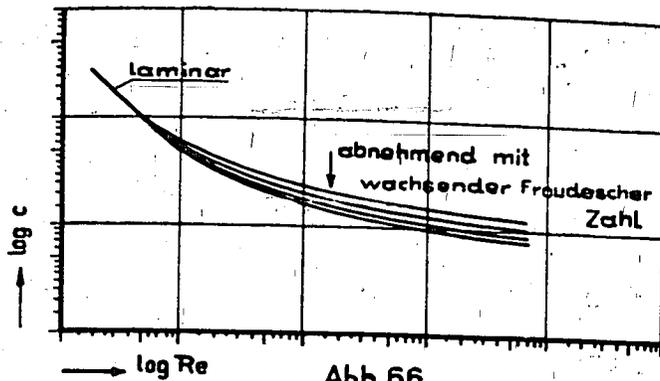
169002831

des letzteren ergibt jedoch infolge seines höheren spezifischen Gewichtes bei gleichen Drehzahlen höhere Momente und damit eine grössere Messgenauigkeit.

Um die Rechenarbeit bei der Auswertung möglichst zu verringern, wurden für die Modellgefässe von 335 mm \emptyset besondere Formblätter benützt. In Abb. 64 ist für den Blattrührer eine Versuchsfolge mit dem Auswertungsschema wiedergegeben, aus der auch der Rechnungsgang zu ersehen ist. Die Form der Abhängigkeit des Widerstandsbeiwertes eines Blattrührers von der R e y n o l d s'schen und F r o u d e'schen Kennzahl kann aus Abb. 65a für zwei verschiedene Füllungsverhältnisse ersehen werden. Dem weiten Zahlenbereich entsprechend erfolgte die Darstellung in doppelt-logarithmischem Maßstab. Die Abb. 65b gibt die geometrischen Verhältnisse der Anordnung und des Flüssigkeitsstandes in dem Versuchsgefäss wieder. Man kann aus der in der Abbildung eingetragenen, ausgleichenden Linie erkennen, dass der Beiwert praktisch nur eine Funktion der R e y n o l d s'schen Kennzahl ist. Der Einfluss der F r o u d e'schen Zahl tritt im Gebiet kleiner R e y n o l d s'scher Zahlen überhaupt nicht in Erscheinung. Dies ist auch verständlich, denn dort sind die durch die Flüssigkeitsreibung bedingten Kräfte so gross, dass die Auswirkung der Erdschwere relativ dazu gering ist. Bei grösseren Werten der R e y n o l d s'schen Zahl lassen sich die Versuchspunkte streng genommen nicht mehr zu einem glatten Linienzug vereinigen: die den kleineren F r o u d e'schen Zahlen entsprechenden Punkte liegen über der ausgleichend eingezeichneten Kurve. Auch dieses ist erklärlich: die F r o u d e'sche Zahl entspricht dem Verhältnis der Trägheitskräfte zu den

169002832

Schwerkraften: bei kleinen Umlaufgeschwindigkeiten treten die



letzteren, stärker in Erscheinung. Streng genommen müsste man also den Beiwert mit der Froude'schen Zahl als Parameter auftragen. Es würden sich dann eine Schar von Kurven ergeben (Abb.66), die sich im Gebiet sehr kleiner Reynolds'scher

Zahlen zu einem einzigen Linienzug vereinigen. Die Abhängigkeit des Widerstandsbeiwertes von der Froude'schen Zahl wird um so geringer, je grösser diese ist, weil mit wachsendem $\frac{v^2}{gl}$ der Einfluss der Schwerkraft immer mehr gegen jene der Trägheitskräfte zurücktritt. Da nun aber eine grössere Abweichung nur bei derartig niedrigen Drehzahlen zu beobachten ist, die als Betriebsdrehzahlen praktisch ohne Bedeutung sind, erscheint die für die weiteren Rechnungen getroffene Annahme, dass der Widerstandsbeiwert nur eine Funktion der Reynolds'schen Zahl ist, berechtigt zu sein. Es gilt dies um so mehr, als bei der praktischen Bemessung von Rührwerksantrieben eine ganze Reihe von Faktoren mitsprechen, durch deren Unsicherheit die Fehlergrenze so verbreitert wird, dass die durch die Nichtberücksichtigung des Einflusses der Erdschwere begangene Vernachlässigung garnicht ins Gewicht fällt. Hierauf soll weiter unten noch eingegangen werden.

Ein Vergleich der beiden Beiwertskurven für $\lambda = 0,3$ und $\lambda = 1,0$ (Abb.65) zeigt übrigens, dass bei geringer Füllhöhe der Einfluss der Erdschwere stärker hervortritt. Dies

ist folgendermassen zu erklären: die Stärke der Verformung der Oberfläche ist erfahrungsgemäss im Bereich zwischen $\lambda = 0,2$ und $\lambda = 1,0$ von der Füllhöhe wenig abhängig. Da die Trägheitskräfte und Reibungskräfte mit sinkender Füllung wesentlich kleiner werden, müssen die ersteren bei niedrigem Stand verhältnismässig stärker in Erscheinung treten.

Eine Betrachtung des Kurvenverlaufes $c = f(Re)$ zeigt, dass in dem betrachteten Fall des Blattrührers für $Re < 60$ laminare Strömung besteht, denn in diesem Bereich ist $\frac{\log c}{\log Re} = -1$, d.h. es gilt

$$c = \frac{c_1}{Re} \quad (Re < 60) \quad (c_1 = \text{Konstante}) \quad \dots\dots \text{Gl. 32}$$

Dies besagt, dass die Widerstandskraft der Geschwindigkeit unmittelbar verhältnismässig ist.

Die durch Gl. 32 wiedergegebene Beziehung besitzt jedoch keine praktische Bedeutung, da nach dem auf Seite 32 Erwähnten der Blattrührer für die Verarbeitung von Produkten mit hoher Viskosität oder Konsistenz wenig geeignet ist. Man wird sogar $Re \sim 60$ in doppeltem Sinn als "kritische Reynolds'sche Zahl" bezeichnen können. Sie stellt zunächst die Grenze zwischen laminarem und turbulentem Gebiet dar und da offenbar der Blattrührer nur dann eine günstige Wirkungsweise bietet, wenn Turbulenz besteht, gibt also die genannte Zahl zudem noch einen Grenzwert für den Verwendungsbereich an ⁺⁾ Bemerkenswert ist, dass die Höhe der "kritischen Reynolds'schen Zahl" offenbar nicht oder nur sehr wenig von dem Füllungsverhältnis abhängt.

⁺⁾ Es kann also der Blattrührer in grossen Gefässen noch zur Verarbeitung einer viskosen Flüssigkeit geeignet sein und in einem kleinen versagen, wenn in einem Fall ein turbulenter, im anderen ein laminarer Strömungszustand besteht.

Für $Re > 60$ geht die Kurve in eine über, die ungefähr die Neigung 1:4 besitzt. In dem Bereich $30 < Re < 100$ scheint die Strömung instabil zu sein, denn es wurden darin sowohl Momente, die einer laminaren, wie auch solche, die einer turbulenten Strömung entsprechen, gemessen. Der Beiwert ist also wenigstens angenähert wie bei vielen Problemen der Strömung reibender Flüssigkeiten eine Funktion der vierten Wurzel aus der R e y n o l d s'schen Zahl

$$= \frac{c_1}{\sqrt[4]{Re}} \quad Re > 60 \quad (c_1 = \text{Konstante}) \quad \dots \text{Gl. 33}$$

Bei sehr grossen Werten der R e y n o l d s'schen Zahlen muss $c = \text{const.}$ werden, da in diesem Fall der Einfluss der Trägheitskräfte weit grösser als ~~der~~ der Reibungskräfte wird. Aus der Tatsache, dass die durch die Schwerkkräfte bedingten Abweichungen von der ausgleichenden Kurve (Abb.65) im Gebiet um $Re \sim 10^5$ geringer sind als bei den etwas kleineren Werten dieser Kenngrösse, kann zunächst geschlossen werden, dass die Umkehrung in $c = \text{const.}$ bereits ihren Beginn hat. Zur Feststellung des Beiwertsverlaufes im Bereich noch höherer R e y n o l d s'scher Zahlen wurden in einem Gefäss von 600 mm Durchmesser Messungen mit Wasser ausgeführt, da im Gefäss von 335 mm Durchmesser eine Verwendung von Flüssigkeiten mit noch geringerer Viskosität (z.B. Diäthyläther) wegen der durch das kleine spezifische Gewicht bedingt^{en} Messungenauigkeit ausschieden. Wie aus Abb. 65a hervorgeht, scheint der Beiwert im Bereich von $Re = 10^6$ tatsächlich waagrecht zu verlaufen. Dies müsste allerdings durch Versuche in noch grösseren Gefässen genau erhärtet werden, obwohl vereinzelt Messungen in emaillierten Betriebsgefässen dies bestätigen. Jedenfalls ist es vorerst zweckmässig,

für $Re > 2 \times 10^5$ mit konstanten Beiwerten zu rechnen und die geneigten Kurven nicht über diese Grenze zu extrapolieren.

Aus den geschilderten Zusammenhängen geht auch hervor, wie die bei Versuchen als Funktion der Drehzahl gemessenen einzelnen Momente am besten auszugleichen sind. Je nach den Eigenschaften der untersuchten Stoffe zeigt sich folgender Verlauf der Momente (Abb.67). Die Kurve I gibt den Zusammenhang zwischen Moment und Drehzahl für niederviskose Flüssigkeiten +), Kurve II u. III

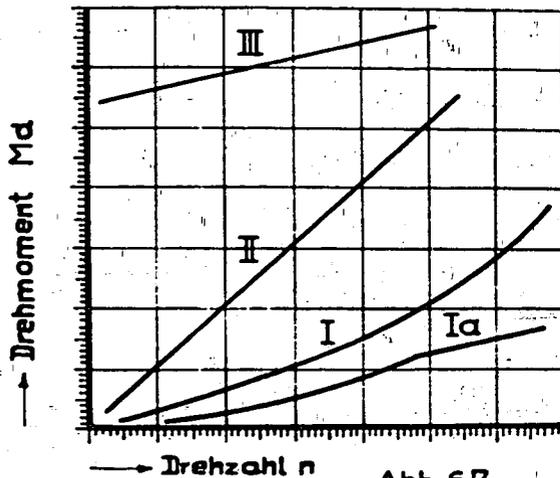


Abb.67.

für hochviskose und für Pasten wieder. Während die Punkte von II und III sehr leicht durch gerade bzw. flach gekrümmte Linien auszugleichen sind, ist dies bei der Kurve I nicht der Fall. Hierbei

ist es zweckmässiger, für die einzelnen Punkte zunächst den Wert $\frac{M_d}{n^2}$ zu bilden, diese nochmals über n aufzutragen und durch eine Gerade auszugleichen. Die Momentenkurve ergibt sich dann, indem man rückwärts wieder die Gerade durch Vervielfachen mit n^2 punktweise in das Ausgangsschaubild überträgt.

Nachdem es feststeht, dass der Widerstandsbeiwert praktisch nur eine Funktion der Reynolds'schen Zahl ist,

+) Bei sehr geringen Füllhöhen wird die Momentenkurve unstetig; sie steigt zunächst parabolisch an und verläuft dann von einer höheren Drehzahl an geradlinig (Kurve Ia). Der Unterschied gegenüber Gefässen mit grösserer Füllung ist darauf zurückzuführen, dass bei niedrigem Flüssigkeitsstand der untere Teil des abgesenkten Spiegels bereits schon innerhalb des betrachteten Drehzahlbereiches den Boden erreicht und somit eine plötzliche Änderung der Strömungsform bewirkt wird.

muss die von H a i l e r ^{*)} mitgeteilte Umrechnungsmethode eine Berichtigung erfahren. H a i l e r fand auf Grund seiner Versuche mit dünnen Flüssigkeiten, dass für eine Umrechnung der am Modell gefundenen Leistung auf jene der Grossausführung das F r o u d e'sche Modellgesetz Verwendung finden darf und schloss daraus, dass der Energiebedarf beim Rühren hauptsächlich für die Ueberwindung der Schwerekräfte dient. Aus diesem Grund nahm er an, dass zwei Prozesse dann ähnlich sind, wenn die entsprechenden F r o u d e'schen Zahlen denselben Wert besitzen

$$\frac{v_m^2}{g l_m} = \frac{v_h^2}{g l_h}$$

Daraus folgt, dass die Drehzahl der Hauptausführung gleich der des Modelles, geteilt durch die Wurzel des Maßstabes sein muss. In diesem Fall gilt dann (siehe Gl. 18)

$$L_h = L_m \cdot m^{3,5} \quad \dots \text{Gl. 34}$$

wenn in beiden Fällen gleiche Flüssigkeiten vorausgesetzt werden.

Diese Folgerung trifft jedoch nur im Bereich sehr grosser R e y n o l d s'scher Zahlen zu, bei denen der Beiwert c praktisch konstant ist, bzw. bei sehr niedrigen Drehzahlen nur noch etwas von der F r o u d e'schen Zahl abhängt. Sie hat jedoch für das Gebiet zwischen $Re = 10^2$ und $Re = 10^5$ keine Gültigkeit mehr. Setzt man $n_h = \frac{n_m}{\sqrt{m}}$, so wird mit $Re = \frac{v l}{\nu} \sim \frac{n l^2}{\nu}$

$$L_h = \frac{c_2}{\sqrt{\frac{n_h l_h^2}{\nu_h}}} \quad n_h^3 \quad l_h^5 \quad \gamma_h$$

$$L_m = \frac{c_2}{\sqrt{\frac{n_m l_m^2}{\nu_m}}} \quad n_m^3 \quad l_m^5 \quad \gamma_m$$

*) Hailer, Rührervers.Gr.1, Ber.No.83a der Versuchsgruppe Lu.

oder unter Voraussetzung gleicher Flüssigkeiten

$$\frac{L_h}{L_m} = \sqrt[4]{\frac{n_m^3 l_m^2}{n_h^3 l_h^2}} \frac{n_h^3}{n_m^3} m^5$$

$$\frac{L_h}{L_m} = \sqrt[4]{\frac{\nu_m}{m^2}} \frac{1}{m^{3/2}} m^5$$

$$L_h = L_m m^{3,125}$$

.....Gl.35.

Eine Gegenüberstellung der Gl. 34 und 35 gibt den Beweis für die bereits von H a i l e r gemachte Beobachtung, dass beim Umrechnen der im Modell mit zäheren Flüssigkeiten als Wasser gemessenen Werte auf die bei der Grossausführung zu erwartenden, zu hohe Leistungen erhalten werden. Man erhält z.B. für $m \sim 6,3$ bei einer Berechnung nach dem F r o u d e'schen Gesetz eine Leistung, die doppelt so gross ist als die tatsächlich erforderliche. Im Gebiet der laminaren Strömung wirkt sich der Fehler bei einer Umrechnung nach dem F r o u d e'schen Gesetz naturgemäss noch viel stärker aus +).

Die Richtigkeit der gefundenen Kurve und ihre Eignung für die Umrechnung des Leistungsbedarfes auf andere Gefässgrössen wurde auch noch durch Drehmomentmessungen in Gefässen mit grösserem Durchmesser bestätigt.

Die Frage, ob die Oberflächenspannung der

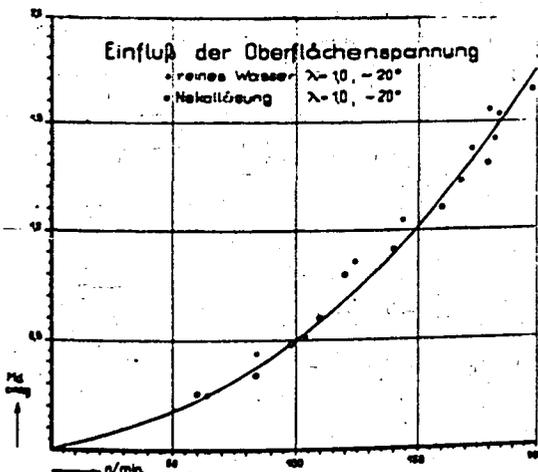


Abb.68.

+) Wie weiter unten noch zu zeigen ist, bewirken Einbauten oder Rauigkeiten eine geringere Neigung des rechten Teiles der Kurve. Der Fehler bei der Verwendung des F r o u d e'schen Gesetzes wird in diesen Fällen also geringer,

169002838

Flüssigkeit auf die Grösse der zum Rühren erforderlichen Leistung von Einfluss ist, wurde durch Vergleichsversuche mit Wasser ($\alpha = 72 \text{ dyn/cm}$) und Nekallösung ($\alpha = 33 \text{ dyn/cm}$) geprüft. Wie aus Abb. 68 hervorgeht, liegen die Abweichungen innerhalb des durch die Messgenauigkeit gegebenen Bereiches.

4) Die Gesichtspunkte für die Aufstellung von Rechentafeln.

a) Allgemeines.

Wie aus Kapitel IV, 3 zu entnehmen ist, kann der Widerstandsbeiwert eines Blattrührers innerhalb des für ihn in Frage kommenden Verwendungsbereiches mit genügender Genauigkeit als eine Funktion der Reynolds'schen Zahl aufgefasst werden, wenn dieser Rührer zur Durchmischung rein viskoser Flüssigkeiten dient⁺⁾ . Dies trifft nach den Ergebnissen der bisherigen Untersuchungen auch für die anderen gebräuchlichen Rührerformen zu. Aus diesem Grund gelten die nachstehenden Ausführungen, die sich zunächst auf den am eingehendsten untersuchten Blattrührer beziehen, zum grössten Teil in sinnvoller Weise auch für die sonstigen Formen.

Nach den Ausführungen über die Theorie der Modellgesetze dürfen die für die Widerstandsbeiwerte ermittelten Zusammenhänge immer nur für geometrisch ähnliche Systeme Verwendung finden. Wollte man die rechnerische Bestimmung der Leistung aller praktisch in Frage kommenden Rühreranordnungen ermöglichen, so wäre für alle Arten der Verlauf der Beiwerte festzustellen. Dies ist jedoch wegen des allzugrossen Zeitaufwandes nicht möglich. Bei der Aufstellung von Rechentafeln kommt es

+) Auf die Verhältnisse beim Verarbeiten plastischer Stoffe wird im Kapitel IV, 6 näher eingegangen.

169002839

daher nur in Frage, für die gebräuchlichsten Rührertypen die Abhängigkeit von jenen geometrischen Grössen zu bestimmen, die auf die erforderliche Leistung von sehr erheblichem Einfluss sind und diejenigen von geringerer Bedeutung in Form von Korrekturfaktoren zu berücksichtigen bzw. ganz zu vernachlässigen. Diese Erleichterung für die Arbeiten zur Entwicklung von Rechentafeln ist dann immer berechtigt, wenn die hierdurch gegebenen Fehler kleiner sind, als dem Leistungsunterschied der für den Antrieb in engere Wahl zu ziehenden beiden Motorgrössen entspricht.

Bei Sonderkonstruktionen von Rührwerken, die nur sehr selten Verwendung finden, lohnt es sich nicht, den genauen Verlauf der Widerstandsbeiwerte zu ermitteln. In diesem Fall stellt man zweckmässigerweise ein Modell her und rechnet die mit dem Dynamometer gemessene Leistung auf die Grossausführung um. Die Umrechnung bereitet keine Schwierigkeiten, wenn man mit demselben Produkt arbeitet, das auch später verarbeitet wird. Man nimmt die Leistung im Modell als Funktion der Drehzahl auf und ermittelt daraus für einen kleinen Bereich die Art der Abhängigkeit des Beiwertes von der R e y n o l d s'schen Zahl. Nach den bisherigen Untersuchungen treten hinsichtlich des Verlaufes des Beiwertes folgende Beziehungen zur R e y n o l d s'schen Zahl in Erscheinung

$$1.) \quad c = \frac{C_1}{Re} \quad 2.) \quad c = \frac{C_2}{\sqrt[4]{Re}} \quad 3.) \quad c = C_3 \quad \dots \text{Gl. 36}$$

($C_1, C_2, C_3 = \text{Konstante}$)

Die Gruppe, zu der die Beiwertsabhängigkeit zu rechnen ist, bzw. die Grenzen, zwischen denen sie verläuft, lässt sich leicht erkennen. Bezeichnet man wiederum mit L_n und L_m die

Leistungen der Grossausführung und des Modelles, sowie mit n_h und n_m die entsprechenden Drehzahlen, so gelten mit dem Maßstab $m = \frac{l_h}{l_m}$ die nachstehenden Umrechnungsformeln

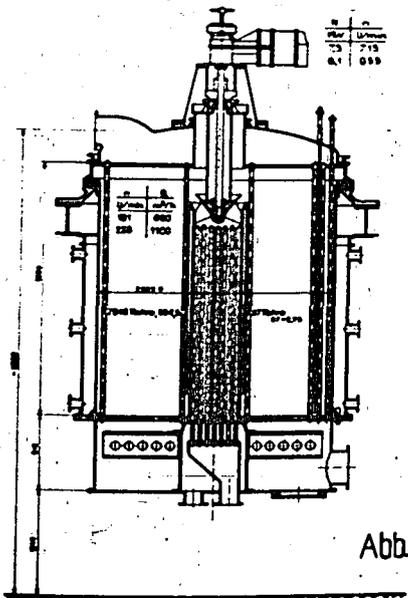
$$\begin{array}{l}
 1.) \quad L_h = L_m \left(\frac{n_h}{n_m} \right)^2 m^3 \\
 2.) \quad L_h = L_m \left(\frac{n_h}{n_m} \right)^{11/4} m^{9/2} \\
 3.) \quad L_h = L_m \left(\frac{n_h}{n_m} \right)^3 m^5
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} 1.) \\ 2.) \\ 3.) \end{array}} \right\} \dots\dots \text{Gl. 37}$$

Liegt es fest, welcher Abhängigkeit der Beiwert gehorcht, so können die Modellversuche auch mit einer beliebigen Flüssigkeit ausgeführt werden. In die Umrechnung ist dann allerdings die Viskosität und das spezifische Gewicht beider Produkte einzubeziehen. Eine Voraussetzung für die Zulässigkeit der Umrechnung ist natürlich, dass die Reynolds'schen Zahlen für Hauptausführung und Modell im Gültigkeits-

bereich ein und derselben Beziehung nach Gl. 36 liegt.

Nachstehend sei ein Beispiel für einen Fall angeführt, bei dem nur eine Leistungsbestimmung nach dem Modellversuch lohnend ist.

Bei den Kontaktöfen, die zur Herstellung von Phthalsäureanhydrid dienen, wird die Reak-



tionswärme über ein Salpeterbad an Kühlluft abgegeben (Abb. 69).

169002841

Der zum Umwälzen des Kühlmittels dienende Rührer wirkte nur ungenügend, so dass die Temperatur nicht überall gleichmässig war. Es wurde ein Modell hergestellt, und eine Rührerform (Kaplanpropeller) entwickelt, die eine einwandfreie Strömungsform gewährleistete. Die mit Wasser gemessene Leistung konnte auf die bei der Grossausführung erforderliche umgerechnet werden.

Bei einer derartigen Anordnung hätte es keinen Zweck, den genauen Verlauf des Beiwertes über einen grossen Bereich der Reynolds'schen Zahl aufzunehmen, denn eine allgemeine Verwendung dieser Anordnung mit Kühlmitteln verschiedenster Beschaffenheit kommt nie in Frage.

Die beschriebene Art der Ermittlung von Rührerleistungen aus Modellversuchen setzt naturgemäss das Vorhandensein eines geeigneten Dynamometers voraus.

b) Die Modellversuche an Blattrührern als Beispiel für die zur Aufstellung von Rechentafeln notwendigen experimentellen Vorarbeiten.

Die Betrachtung einer Blattrühreranordnung ohne jeg-

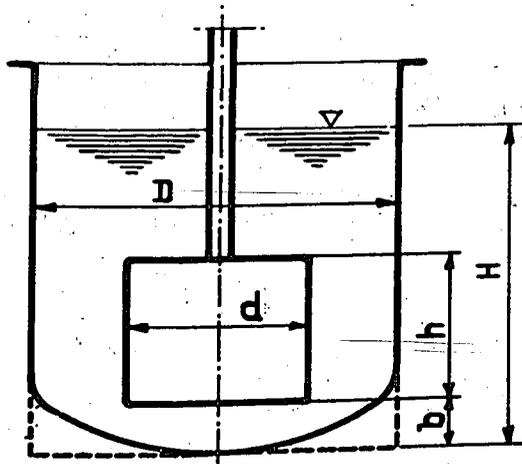


Abb.70.

lichen Gefässeinbau zeigt (Abb.70), dass die Zahl der Veränderlichen, die die geometrische Form des Vorganges beeinflussen können, schon recht gross ist.

Zunächst sei festgestellt, dass

169002842

von einer Variation der Blattbreite abgesehen werden kann. H a i l e r fand bei Salzlöseversuchen, dass ein Verhältnis $\frac{d}{D} = \frac{1}{2}$ den günstigsten Wert darstellt. Dieses Ergebnis

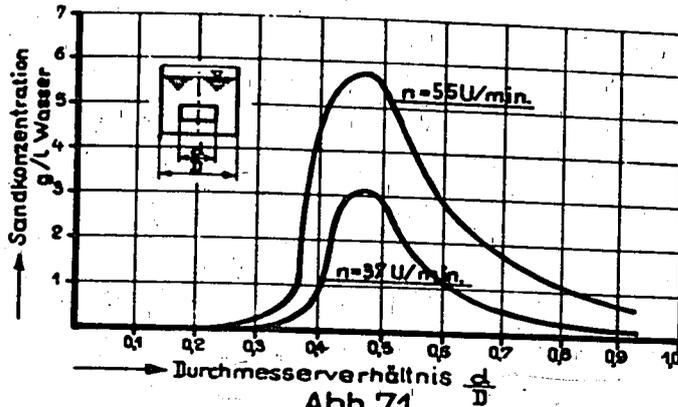


Abb. 71.

wird durch neuere Arbeiten von Mac Laren White und Sumnerford¹⁾ bestätigt. Als Kennzahlen der Rührwirkung benützten die Forscher die Konzentration von feinem Sand in Wasser,

der von Blättern verschiedener Breite aufgerührt wurde. Die Abb. 71 gibt die Sandmenge in g/l als Funktion des Durchmesserverhältnisses d/D für zwei Drehzahlen (37 und 55 U/min., $D = 1,3$ m) an. Man erkennt daraus das Maximum des Sandgehaltes in der Nähe von $\frac{d}{D} = 0,5$.

Sieht man also von dem Einfluss der Blattbreite ab, dann können noch folgende Größen von Einfluss sein

- a) die Form des Bodens (eben oder kugelig),
- b) die relative Füllungshöhe $\lambda = H/D$,
- c) der relative Bodenabstand b/D ,
- d) die relative Blatthöhe h/d ,
- e) die Kantenform des Rührers und die Dicke des Blattes,
- f) die Rauigkeit von Gefäss, Wand und Rührer.

Um vereinfachende Annahmen treffen zu können, war es also

1) A. White and S. Sumnerford, New Data on Design of Simple Paddle Agitators, Chem. & Metall. Engg. 1936, 371.

notwendig, die Grösse des Einflusses der 6 Veränderlichen auf die Höhe des Widerstandsbeiwertes zu ermitteln.

Bei diesen Untersuchungen wurden jeweils ausser der zu betrachtenden Veränderlichen die anderen nur dann geändert, wenn dies eine merkliche Einwirkung auf die Grösse des Beiwertes zur Folge hatte. Hierauf wird in der anschliessenden Beschreibung der messtechnischen Verfolgung dieser einzelnen Formfaktoren näher eingegangen.

α) Die Bodenform.

Vergleichsmessungen des Drehmomentes in Gefässen

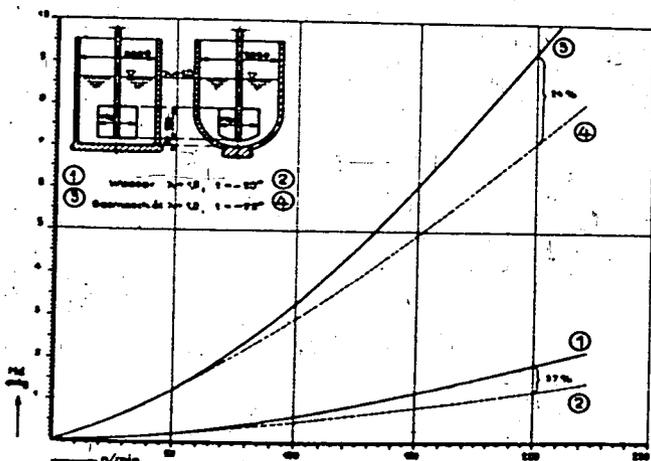


Abb.72.

mit ebenem und kugelförmigem Boden zeigen,

dass sowohl bei Wasser ($\eta = 0,0001$ kgsec/m²) (Abb.72),

wie auch in Öl

($\eta = 450 \cdot 10^{-4}$ kgsec/m²)

und einem relativen

Füllungsverhältnis

$\lambda = \frac{H}{D} = 1,0$ merkliche

Unterschiede vor-

handen sind +).

Es ist leicht einzusehen, dass bei noch grösserem

Füllungsverhältnis der durch die Bodenform bedingte Unterschied noch mehr zurücktreten muss, da hierbei die Bodenreibung im Verhältnis zur Wandreibung kleiner ist. Bei sehr

grösserem Füllungsverhältnis der durch die Bodenform bedingte Unterschied noch mehr zurücktreten muss, da hierbei die Bodenreibung im Verhältnis zur Wandreibung kleiner ist. Bei sehr

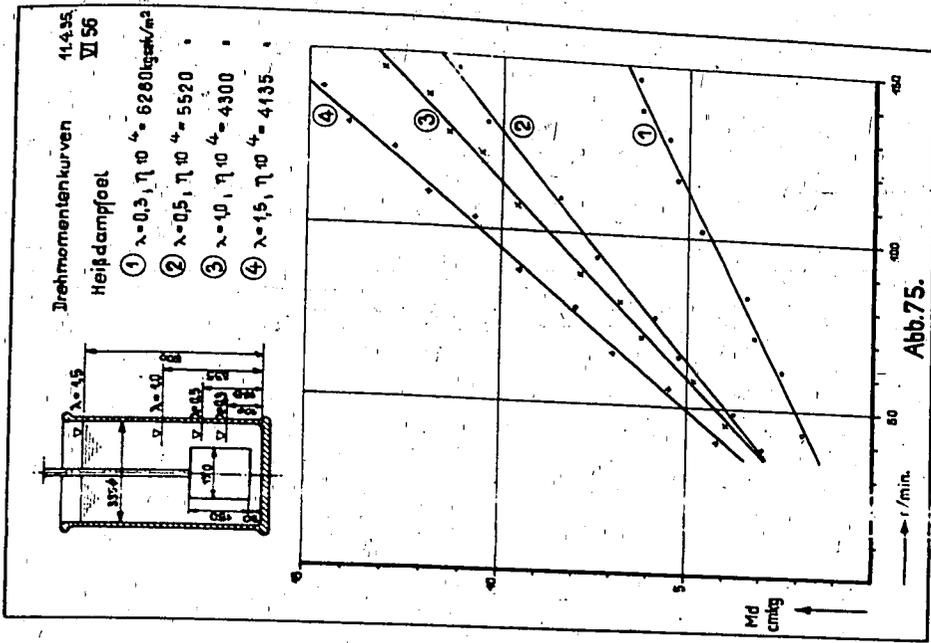
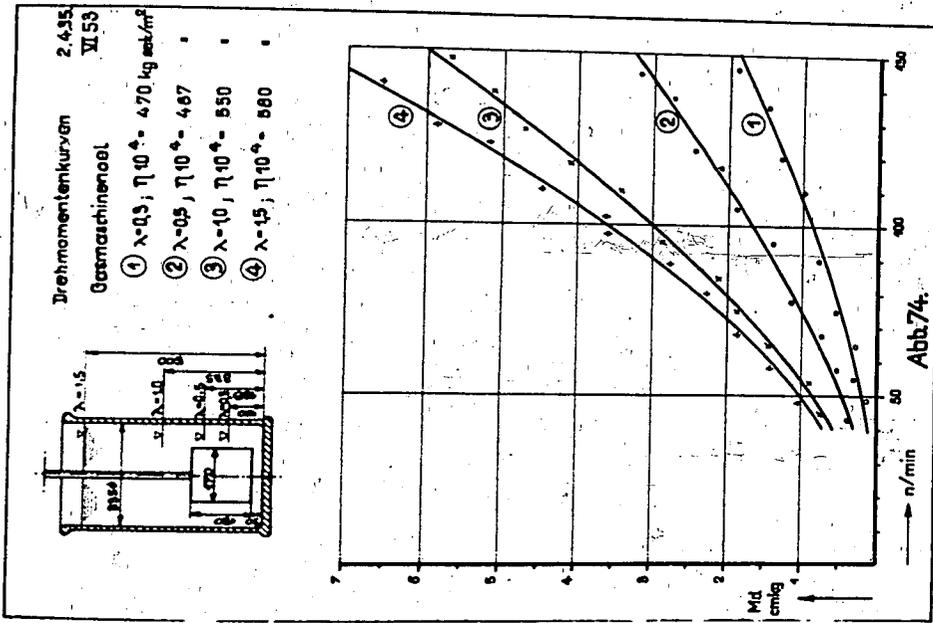
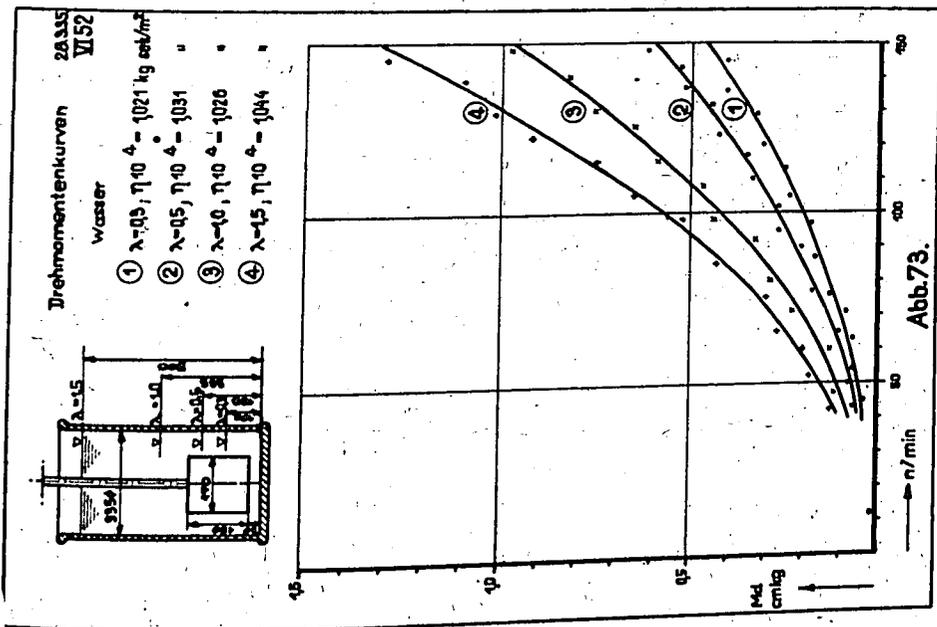
+ Der Unterschied im spezifischen Arbeitsaufwand, wie er nach Abb. 5 beim Lösen auftritt, ist also offenbar grösstenteils auf die beim Kugelboden verminderte Leistungsaufnahme zurückzuführen.

geringer Füllhöhe ($\lambda < 0,5$) wirkt sich die Art der Bodenform noch stärker aus. Dies braucht jedoch nicht berücksichtigt zu werden, da der Motor eines Rührwerkes immer für die grösste Füllung zu bemessen ist. Trotzdem die sich aus Abb. 72 ergebenden Unterschiede nicht gering sind, sollen sie bei den Rechentafeln keine Berücksichtigung finden. Gefässe mit ausgesprochenem Kugelboden (Bodenradius gleich Gefässhalbmesser) sind nicht allzuhäufig, Kessel mit flacher gewölbtem Boden haben jedoch bereits einen höheren Leistungsbedarf. Ausserdem werden die Unterschiede bei höherer Viskosität geringer. Bütten mit Schrägboden besitzen denselben Leistungsbedarf wie Gefässe mit ebenem.

β) Einfluss der Füllhöhe.

Die vorhandenen Einrichtungen gestatteten es nicht, Messungen bei grösseren Füllungsverhältnissen als $\lambda = 1,5$ ausführen zu können, da das verwendete Dynamometer beim Einsetzen längerer Wellen unerwünschte Pendelerscheinungen zeigt. Dies ist jedoch ohne besondere Bedeutung, weil in den gebräuchlichen Rührgefässen ein Arbeiten bei wesentlich höheren Füllungen überhaupt nicht möglich ist.

Wie aus den Abb. 73 - 75 hervorgeht, in denen die in einem Gefäss von 335 mm \varnothing mit Flüssigkeiten verschiedener Viskosität gemessenen Drehmomente als Funktion der Drehzahl dargestellt sind, nimmt der Leistungsbedarf mit wachsender Füllung stark zu. Trotzdem die Viskosität der verwendeten Flüssigkeiten sich um viele Zehnerpotenzen unterscheidet, zeigt sich zwischen ihnen hinsichtlich der Abhängigkeit vom Füllungsverhältnis $\lambda = \frac{H}{D}$ kein wesentlicher Unterschied. Die Art der Zunahme des Widerstandsbeiwertes



169002845

mit wachsender Standhöhe ist aus Abb. 76, Kurve I, zu ersehen. Dieser ist zunächst gleich Null, solange der Flüssigkeitsspiegel noch nicht die

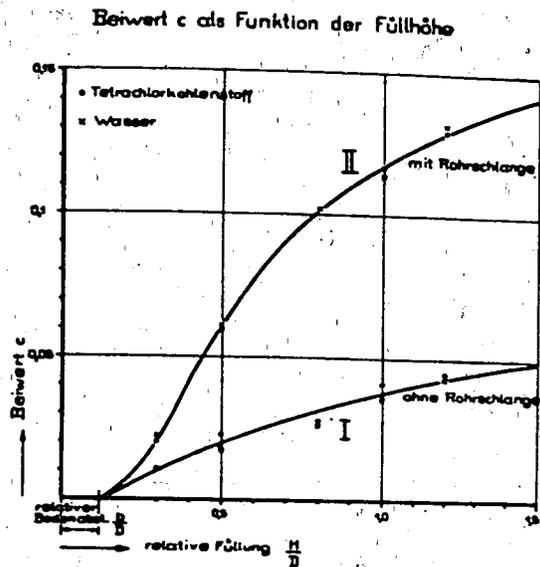


Abb.76.

Unterseite des Blattes erreicht hat und steigt dann mit wachsendem λ erst steil, dann flacher an. Für $\lambda \rightarrow \infty$ muss sich (von der Wellenreibung abgesehen) der Beiwert c einem endlichen Grenzwert nähern, solange die Blatthöhe selbst nicht unendlich gross wird.

Die Kurve II der Abb. 76 zeigt den Verlauf des Beiwertes für ein Gefäss mit Schlange und zwei Zuflussrohren. Auch bei einer derartigen Anordnung besteht eine starke Abhängigkeit des Beiwertes von der Füllhöhe. Die Form der Kurve ist jedoch derjenigen des Gefässes ohne Einbauten (I) ähnlich.

Man kann aus diesen Ergebnissen entnehmen, dass der Einfluss der Füllhöhe bei der Aufstellung von Rechentafeln für Blattrührer nicht vernachlässigt werden darf.

γ) Der Einfluss des Bodenabstandes.

Bei gleichbleibender Füllhöhe wird, wie leicht verständlich ist, im allgemeinen der Leistungsbedarf um so geringer sein, je grösser der Abstand des Blattes vom Boden ist^{†)}. Er wird zu Null, wenn es austaucht. Nun haben

^{†)} An sich ist es denkbar, dass bei sehr grossen Füllhöhen ein im Verhältnis dazu niedriges Blatt beim Rühren in Bodennähe weniger Leistung erfordert als bei einer Anordnung in der Mitte, da eine grössere Flüssigkeitsmenge von der Bewegung erfasst wird. Für normale Rührgefässe ist dies jedoch nicht von Bedeutung.

Jedoch die Ergebnisse vieler Versuche gezeigt, dass es am zweckmässigsten ist, den relativen Bodenabstand $\frac{b}{D}$ im Bereich zwischen 0,1 und 0,2 zu wählen. Die Untersuchung, ob der Einfluss des Bodenabstandes bei der Leistungsberechnung Berücksichtigung finden muss, kann demnach zunächst auf diese Grösse beschränkt werden.

Da sowohl die Füllhöhe, wie auch die Viskosität von Einfluss auf die Abhängigkeit des Widerstandsbeiwertes von dem relativen Bodenabstand sein können, mussten diese Veränderlichen mitberücksichtigt werden.

Die wesentlichsten Ergebnisse der ausgedehnten Versuche sind in Abb. 77 zusammengefasst. Abb. 78 gibt die

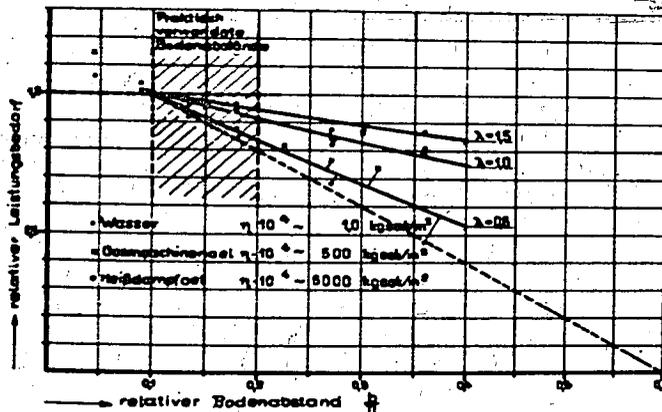


Abb.77.

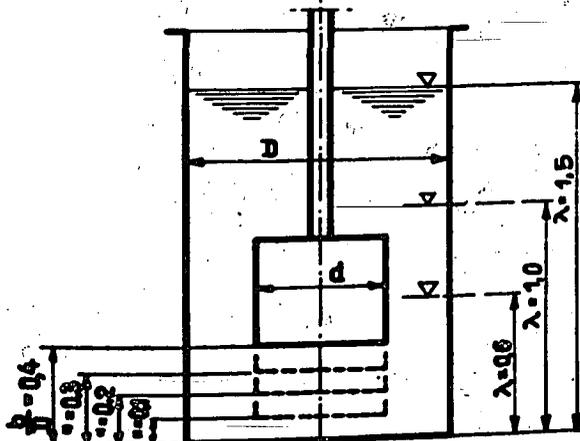


Abb.78.

zugehörigen geometrischen Verhältnisse wieder. In der ersten Abbildung ist die Abhängigkeit des Leistungsbedarfes von dem relativen Bodenabstand für 3 verschiedene Standhöhen ($\lambda = \frac{H}{D} = 0,6, 1,0, 1,5$) und verschiedene Zähigkeiten ($\eta = 0,0001 \text{ kgsec/m}^2$ für Wasser von $\sim 20^\circ$, $\eta = 0,0580 \text{ kgsec/m}^2$ für Gasmaschinenöl von 17° und $\eta = 0,5110$

kgsec/m² für Heissdampföl von 20°) wiedergegeben. Dabei ist zwecks eines leichteren Vergleichs bei allen Flüssigkeiten und Füllhöhen die Leistungsaufnahme bei dem relativen Bodenabstand $\frac{b}{D} = 0,1$ gleich 1 gesetzt und die bei anderen Bodenabständen als Verhältniszahl hierzu dargestellt. Die Werte sind mit den bei $n = 100$ U/min. gemessenen Momenten berechnet. Sie gelten jedoch auch für andere Rührergeschwindigkeiten, da in dem Bereich von 40 - 200 U/min. keine merkliche Beeinflussung der in der Darstellung verwendeten Leistungsquotienten durch die Höhe der betrachteten Drehzahl besteht.

Man kann aus Abb. 77 ersehen, dass für den Bereich von $0,1 < \frac{b}{D} < 0,7$ nur bei der kleinsten Füllung ($\lambda = 0,6$) eine ins Gewicht fallende Abhängigkeit des Widerstandsbeiwertes vom Bodenabstand auftritt. Bei dieser Füllhöhe sind auch die durch die Viskosität gegebenen Unterschiede am grössten. Da nun aber der Leistungsbedarf immer für die grösstmögliche Füllung zu bemessen ist (gewöhnlich $\lambda > 0,8$), sind die durch die von Fall zu Fall zwischen 0,1 und 0,2 schwankenden Bodenabstände gegebenen Unterschiede nicht so erheblich, als dass sich die Mehrarbeit für die Berücksichtigung des Einflusses des Bodenabstandes lohnen würde. Für die Hauptversuche zur Ermittlung von Beiwertstafeln war die Verwendung eines Bodenabstandes von $\frac{b}{D} = 0,1$ rätlich, da hierbei der praktische Höchstwert der Leistung zu erwarten ist. Noch geringere Bodenabstände kommen nicht in Frage, da bei einer derartigen Anordnung des Rührers die Bodenrückströmung (Abb.6) zu sehr behindert wird. Dieses wirkt sich meistens

132002849

sehr deutlich in der Erhöhung des zur Durchführung von Um-

setzungen erforderlichen spezifischen Arbeitsaufwandes aus: die Abb. 79 zeigt als Beispiel hierzu den Energieverbrauch beim Lösen von Kochsalz ($n = 100, \lambda = 1,0$) in Wattminuten als Funktion des rela-

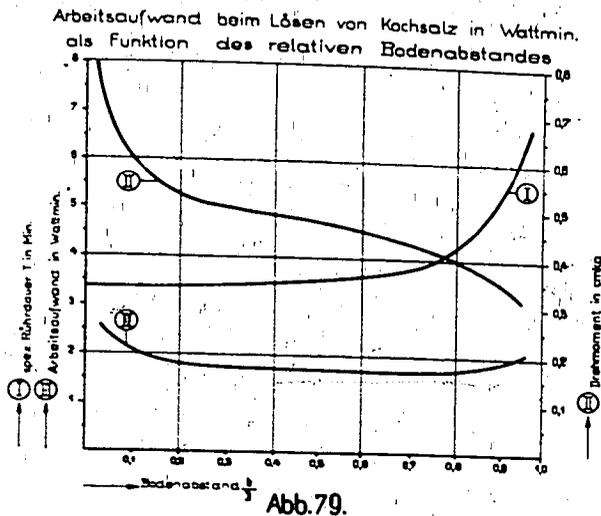


Abb.79.

tiven Bodenabstandes. Es ist daraus zu erkennen, dass der Arbeitsaufwand bei zu niedrigen oder zu hohen Rührerstellungen ungünstig wird.

Von mehr theoretischem Interesse dürfte sein, dass, wie die in Abb. 77 gestrichelt eingezeichnete Linie zeigt, bei niedriger Füllhöhe und grosser Viskosität ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Bodenabstand und Leistungsaufwand besteht. Bei den anderen Kurven ($\lambda < 0,6$) ist in dem untersuchten Bereich eine geringere Abnahme, als der Proportionalität entspricht, zu bemerken.

§ Der Einfluss der Blatthöhe.

Bei der Beschreibung der Wirkungsweise des Blattrührers wurde bereits erwähnt, dass seine günstigen Eigenschaften auf die durch ihn erzeugte Strömungsform zurückzuführen ist. Die in den Abb. 6 und 7 dargestellte Bewegung tritt jedoch nur auf, wenn die Blattoberkante hinreichend tief unter dem Flüssig-

keitsspiegel liegt, da sonst eine Behinderung der Spiegelrückströmung besteht. Für Rührgefäße der üblichen Form wird man daher meistens **Blätter** von angenähert quadratischer Form verwenden.

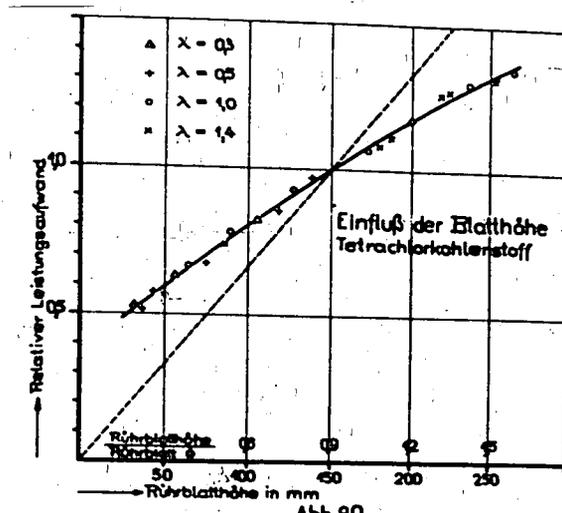
Gelegentlich ist es aber auch zweckmässiger, die Höhe so zu wählen, dass das Blatt oben austaucht, so z.B. wenn spezifisch leichte feste Stoffe, die schwer benetzbar sind, mit schwereren Flüssigkeiten zur Umsetzung gebracht werden müssen (z.B. Sulfierungen und Nitrierungen organischer Stoffe). Will man in einem solchen Fall keine so hohe Drehzahl verwenden, dass ein starker Sog entsteht, dann empfiehlt es sich, das Benetzen durch die Schlagwirkung des herausragenden Blattoberteiles zu unterstützen. Aus diesem Grund ist eine genauere Verfolgung des Einflusses der Blatthöhe erforderlich.

Die Abb. 80 - 82 geben für Tetrachlorkohlenstoff, Gasmaschinenöl und Zylinderöl in der gleichen Weise, wie die Abhängigkeit vom Bodenabstand darstellt, den Quotienten der Leistung in Abhängigkeit von der relativen Rührerhöhe $\frac{h}{d}$ für verschiedene Füllungsverhältnisse an. In diesem Fall wurde die Leistungsaufnahme des "normalen" Rührblattes mit $\frac{h}{d} = 0,9$ gleich 1 gesetzt ⁺). Man kann daraus ersehen, dass die Blatthöhe von merklichem Einfluss auf die Grösse der Leistung ist. Die Abhängigkeit ist sehr stark, solange die Blattoberkante noch ganz oder wenigstens zum Teil eintaucht. Wie leicht zu verstehen ist, verschwindet der Einfluss der Blatthöhe bei allen Rührern, deren oberer Teil nicht mehr an der Vermischung

+) Bei $\lambda = 0,3$ war dies nicht möglich. Die Berechnung der Verhältniszahlen erfolgte über die Werte von Rührern derselben Höhe, die bei $\lambda = 1,0$ gemessen wurden.

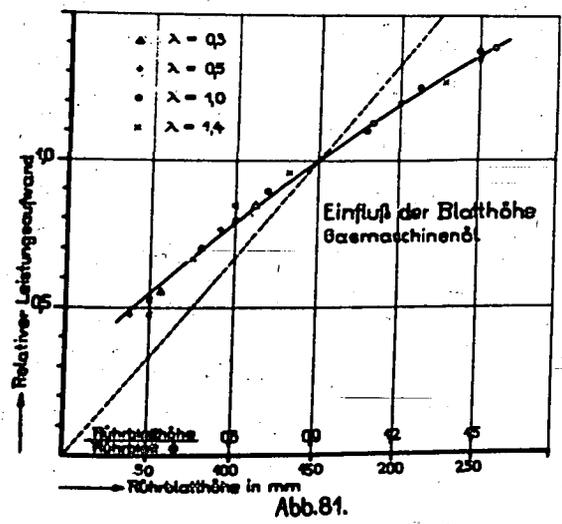
der Flüssigkeit teilnimmt.

In den Abb. 80 - 82 wurden in dem Punkt, der dem Normalblatt entspricht, die Gerade eingezeichnet, die die



Proportionalität zwischen relativem Leistungsaufwand und relativer Blatthöhe darstellt. Man kann daraus erkennen, dass für nicht zu grosse Abweichungen die Leistungsaufnahme des Rührers der Blatthöhe ungefähr verhältnismäßig ist. Dies gibt eine weitere Vereinfachung hinsichtlich der Abhängigkeit des Energiebedarfes von der geometrischen Form, weil man, ohne einen erheblichen Fehler zu begehen, innerhalb gewisser Grenzen tatsächlich berechtigt

Proportionalität zwischen relativem Leistungsaufwand und relativer Blatthöhe darstellt. Man kann daraus erkennen, dass für nicht zu grosse Abweichungen die Leistungsaufnahme des Rührers der Blatthöhe ungefähr verhältnismäßig ist. Dies gibt eine weitere Vereinfachung hinsichtlich der Abhängigkeit des Energiebedarfes von der geometrischen Form, weil man, ohne einen erheblichen Fehler zu begehen, innerhalb gewisser Grenzen tatsächlich berechtigt



169002852

ist, die Gleichung für die Leistung

$$L = 7,17 \cdot 10^{-5} c \cdot d^4 h n^3 \gamma \quad \text{in Watt}$$

mit dem zunächst nur für die geometrische Form des Normalblattes

($\frac{h}{d} \sim 0,9$) gelten-

den Beiwert c auch auf Anordnungen mit anderem Höhenverhältnis anzuwenden.

Dies ist der Grund, warum in der Modellformel anstelle einer

(an sich beliebigen) Länge zur

fünften Potenz das Produkt aus dem Durchmesser zur vierten Potenz und der Höhe eingeführt wurde. Wie die Abb. 80 - 82 zeigen, werden die mit dem Beiwert für das normale Blatt für einen höheren Rührer berechneten Leistungen etwas zu gross.

Ist man gezwungen, aus bestimmten Gründen das Blatt herausragen zu lassen, dann darf in der Berechnungsgleichung naturgemäss für h kein grösserer wert eingesetzt werden, als etwa dem Mass von Blattunterkante bis zum ruhenden Spiegel entspricht. Noch genauere Werte erhält man, wenn die Abb.80-82 zur Umrechnung herangezogen werden: Man ermittelt für die

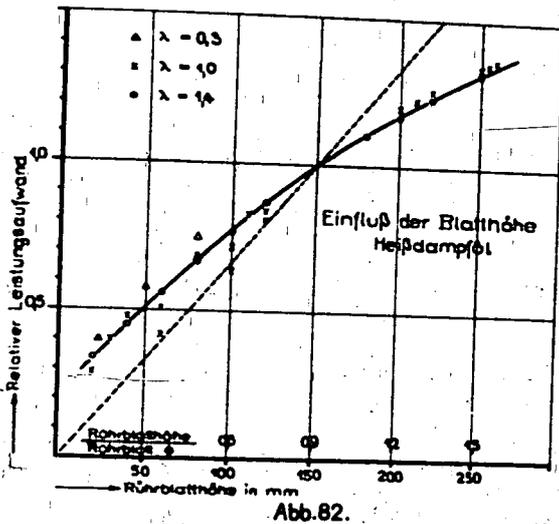


Abb.82.

in Frage kommende Füllung den Leistungsbedarf des Normalblattes und greift aus dem der in Frage kommenden Viskosität entsprechenden Schaubild den Umrechnungsfaktor ab.

Abschliessend sei bemerkt, dass auch in diesem Fall grösstenteils keine merkliche Abhängigkeit des relativen Leistungsverhältnisses von der Höhe der Drehzahl besteht. Lediglich im Gebiet der Kennzahlen $Re < 50$ ergaben sich einige Unterschiede.

§ Der Einfluss der Kantenform und der Blattdicke.

Bei Versuchen in kleinem Maßstab zeigte es sich, dass Blattrührer, die aus 2 mm starkem Blech hergestellt waren, hinsichtlich der Leistungsaufnahme keinen Unterschied aufwiesen, wenn ihre Kanten scharf oder stark abgerundet waren. Eine grössere Blattdicke kann sich nur im Sinne einer Leistungsverminderung geltend machen, denn im Grenzfall, der durch einen Blattrührer von der Form eines quadratischen Quaders mit der Höhe des ursprünglichen Blattes dargestellt wird, ist die Energieaufnahme viel geringer. Die Kantenform, wie auch die Blattdicke braucht daher weiter nicht berücksichtigt zu werden.

§ Der Einfluss der Rauigkeit.

Aus den im Schrifttum bekannt gewordenen Untersuchungen über den Druckabfall in Rohrleitungen und dem Fahrwiderstand von Schiffen geht der starke Einfluss der Rauigkeit der benetzten Flächen auf die sich ausbildenden Strömungsformen hervor. Es musste daher dieser Erscheinung auch bei den Rührerversuchen ein besonderes Augenmerk geschenkt werden. Im Gegensatz zu den bisher betrachteten, durch die Art

169002854

der Anordnung gegebenen Veränderlichen lässt sich die geometrische Aehnlichkeit hinsichtlich der Rauigkeit nur dann verwirklichen, wenn die in der Hauptausführung vorhandenen benetzten Flächen im hydrodynamischen Sinne als "glatt" zu bezeichnen sind +). Unter diesen Begriff fallen die Oberflächen von Glas und verglasten, sowie blankgezogenen oder polierten Metallen, nicht aber jene von Holz, Guss- oder Flusseisen, unebenen Emaillierungen und Ausmauerungen.

Eine Modellähnlichkeit hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit der benetzten Flächen würde voraussetzen, dass ausser der allgemeinen Gestalt bei beiden betrachteten Ausführungsformen auch die (an sich meist geringen) Unebenheiten der Wandungen geometrisch ähnlich sind. Bezeichnet man mit e eine "mittlere" Höhe der erhabenen Stellen, so müsste also beim Modellversuch die Bedingung einer gleichen "relativen" Rauigkeit

$$\frac{e_h}{l_h} = \frac{e_m}{l_m}$$

verwirklicht werden. Dies ist jedoch unmöglich, da bis jetzt ein einfaches Messverfahren fehlt, durch das die mittlere Rauigkeit von Baustoffen exakt festgelegt werden kann. Lediglich "glatte" Gefässe, deren Flächen also hinsichtlich der Rauigkeit immer ähnlich sind, bilden hierin eine Ausnahme.

Für die Aufstellung von Rechentafeln war daher zunächst zu prüfen, ob die Rauigkeit von Gefässwand und Rührer überhaupt von merklichem Einfluss ist. Im zutreffenden Fall musste dann für die praktisch in Frage kommenden Baustoffe die Grösse des Zuschlages ermittelt werden, der zu der aus +) Vgl. hierzu den Unterschied des Druckabfalles in "glatten" und "rauen" Rohren.

Modellversuchen in glatten Gefässen errechneten Leistung zu geben ist, um den Einfluss der Rauigkeit zu berücksichtigen.

Zur Klärung der grundsätzlichen Fragen wurden Vergleichsversuche in Gefässen mit glatten und mit rauhen Flächen durchgeführt. Die Rauigkeit wurde durch Bekleben der benetzten Flächen mit einer gleichmässigen Sandschicht (Körnung $k \approx 1$ mm, relative Rauigkeit $\left(\frac{k}{D} = 1:335 = 0,003\right)$ unter Verwendung eines in Wasser und Oel unlöslichen Lackes als Bindemittel vorgenommen. Die gewählte Körnung gab mit Sicherheit eine wesentlich grössere relative Rauigkeit als jene der für Rührgefässe gebräuchlichen Baustoffe.

Die Untersuchungen wurden wiederum in Glasgefässen von 335 mm \varnothing unter Verwendung von Wasser, Gasmachinesöl und

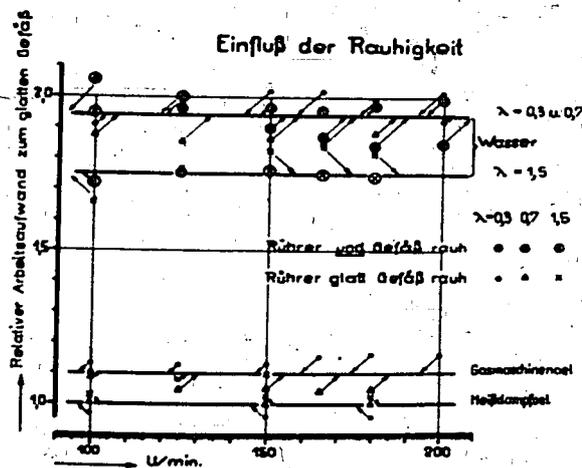


Abb.83.

Zylinderöl in einem Drehzahlbereich von 50-200 U/min bei verschiedenen Füllhöhen durchgeführt. Die wesentlichsten Ergebnisse der sehr ausführlichen Versuche sind in Abb.83 zusammengefasst. Der

besseren Uebersichtlichkeit wegen sind wiederum nur die Verhältniszahlen der Rührerleistung im rauhen Gefäss zu denen im glatten Gefäss für Wasser, Gasmachinesöl und Zylinderöl wiedergegeben.

Man kann zunächst aus Abb. 83 erkennen, dass, wie leicht zu verstehen ist, bei einer Flüssigkeit von grosser Viskosität (Zylinderöl) die Rauigkeit praktisch ohne Einfluss ist, denn der Quotient aus der Leistung im rauhen Ge-

fäss und dem im glatten ist (abgesehen von der durch Messungenauigkeiten bedingten Streuung) gleich Eins. Es lässt sich auch keinerlei Abhängigkeit von Drehzahl und Füllungsverhältnis feststellen +)

Bei dem niederviskosen Wasser liegen jedoch die Verhältnisse anders. Für die Füllungen $\lambda = 0,3$ und $\lambda = 0,7$ beträgt der Mittelwert des Quotienten etwa 1,94, d.h. der Leistungsbedarf im rauhen Gefäss ist in diesem Fall rund doppelt so gross, wie im glatten. Trotz der durch die Verhältnissbildung bedingten grösseren Streuung der Punkte lässt sich deutlich erkennen, dass der Einfluss der Rauigkeit bei der grössten Füllhöhe ($\lambda = 1,5$) geringer ist. Der arithmetische Mittelwert beträgt hierbei etwa 1,75; d.h. die Rauigkeit erhöht den Leistungsbedarf nur um etwa 75%. Dies ist wahrscheinlich auf den bei grossen Füllungen im Verhältnis zur Wandreibung zurücktretenden Einfluss der Bodenreibung zurückzuführen. Bei Gasmaschinenöl zeigt sich eine zwar nur geringfügige, aber doch deutlich in Erscheinung tretende Abhängigkeit von der Rauigkeit; offenbar ist bei ihm die Grenzschichtstärke ungefähr gleich der Höhe der Wandunebenheiten.

Die Versuche mit Wasser wurden sowohl mit sandbeklebten wie auch mit durch Lacküberzug oberflächlich geglätteten Blättern durchgeführt. Wie Abb. 85 zeigt, hat die Oberflächenbeschaffenheit des Rührers innerhalb der durch die Streuung gegebenen Grenzen keinen merklichen Einfluss auf den Leistungsbedarf.

+) Im laminaren Gebiet ist auch der Druckabfall in Rohrleitungen von der Wandrauigkeit unabhängig. Grund: Die Dicke der Grenzschicht ist grösser als die Erhebungen der rauhen Wände. Vgl. hierzu auch: Sörensen, Wandrauigkeitseinfluss bei Strömungsmaschinen, Forschung 8 (1937). 25.

Die Vergrößerung der Leistungsaufnahme bei dünnen Flüssigkeiten ist offenbar durch die verstärkte Wirbelablösung an den Gefäßswandungen bedingt. Bei der Beurteilung dieses Einflusses ist es daher von Interesse, ob durch die verstärkte Turbulenz auch die Prozesse selbst beeinflusst werden.

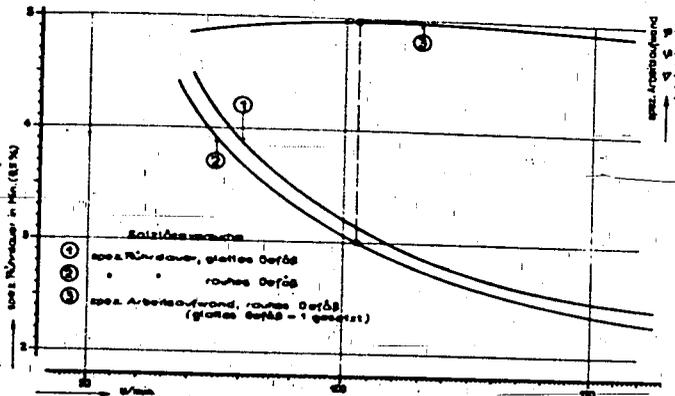


Abb. 84.

Hinsichtlich einer Aenderung des Wärmeüberganges wurden noch keine Versuche durchgeführt.

Die Ergebnisse über das Lösen von Salz

(6-8 mm Körnung,

$\lambda = 0,63$) zeigt

Abb. 84. In dieser

ist wieder wie früher über der Drehzahl die Zeit zur Erreichung von 9,5% Salzgehalt aufgetragen. Ein Vergleich zwischen Kurve I (glattes Gefäß) und Kurve II (rauhes Gefäß) zeigt, dass die Lösedauer durch die Wandunebenheiten verringert wird. Die anteilmässige Verminderung ist jedoch wesentlich kleiner, als die sich aus Abb. 83 ergebende, durch die Rauigkeit bedingte Leistungssteigerung von 94%. Die Kurve III gibt den schon früher erwähnten "relativen Arbeitsaufwand" zur Erreichung einer 9,5%igen Salzlösung als Funktion der Drehzahl wieder, der anhand der Lösezeitkurven berechnet wurde. Trotz der Verminderung der Lösezeit ist im rauhen Gefäß der Arbeitsbetrag zur Erreichung einer bestimmten Konzentration immer grösser als im glatten. Um einen Vergleich mit den in

160002858

den Abb. 4a - 4c wiedergegebenen Werten für den relativen Arbeitsaufwand zu ermöglichen, ist der Punkt für drei Minuten Lösedauer auf der Kurve III der Abb. 84 besonders gekennzeichnet. Man kann daraus ersehen, dass der relative Arbeitsaufwand im rauhen Gefäss das 1,84fache jenes im glatten beträgt.

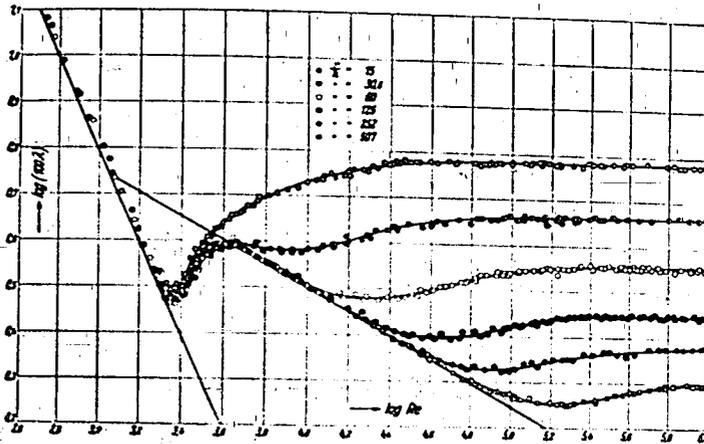


Abb. 85. $\lg(100 \lambda)$ in Abhängigkeit von $\lg Re$

Der Verlauf der Kurve III lässt im übrigen auch die nur sehr geringfügige Abhängigkeit dieses Wertes von der Drehzahl erkennen und gibt damit einen Nachweis für die Berechtigung, den

relativen Arbeitsaufwand durch eine einzige, von der Rührgeschwindigkeit unabhängige Zahl zu kennzeichnen, wie dies in den Abb. 4 und 5 bereits geschehen ist.

Die durch Aufkleben von Sand erzielte relative Rauigkeit ist mit Sicherheit grösser, als jene der in den Fabrikationen verwendeten Rührgefässe. Obwohl keine Messungen mit Sand verschiedener Körnung vorgenommen wurden, kann aus den Versuchen von N i k u r a d s e (Abb. 85) geschlossen werden, dass eine geringere relative Rauigkeit auch eine weniger starke Leistungssteigerung zur Folge hat +).

N i k u r a d s e bestimmte den Druckabfall in Rohren, deren

+) Dies ist nicht als selbstverständlich zu betrachten, da eine mit feinem Sand beklebte Fläche zwar weniger hohe, dafür aber erheblich mehr Unebenheiten und damit auch Wirbelablösungsstellen aufweist.

Wandungen durch Sand verschiedener Korngrösse mehr oder weniger stark uneben gemacht worden waren. In Abb. 85 ist der Rohrreibungskoeffizient als Funktion der R e y n o l d s'scher Zahl mit der relativen Rauigkeit k/r als Parameter dargestellt. Wie man sieht, nimmt dieser im turbulenten Gebiet mit grösser werdender Rauigkeit immer zu. Bei laminarer Strömung bestehen zwischen glatten und rauhen Rohren keine Unterschiede mehr.

Die Bestimmung der Höhe der bei Betriebsgefässen zur Berücksichtigung der Rauigkeit zu verwendenden Zuschläge konnte nicht unmittelbar durch Vergleichsmessungen zwischen glatten und rauhen Kesseln erfolgen, da keine hinreichend grossen Apparate mit verglasten Flächen genügend lang zur Verfügung standen. Infolgedessen wurden zunächst Versuche mit fertigen stopfbüchsenlosen Rührwerken ausgeführt, bei denen die Wellenleistung unter Zuhilfenahme der Wirkungsgradkurve aus der elektrischen Leistung wenigstens angenähert ermittelt werden konnte. Da die Gültigkeit des ermittelten Modellgesetzes für verschieden grosse glatte Gefässe durch Versuche bewiesen ist, gibt ein Vergleich des berechneten Leistungsbedarfes mit dem gemessenen Anhaltspunkte für die Grösse des Einflusses der Rauigkeit. Die Genauigkeit des so zu erhaltenden Korrekturfaktors ist nicht sehr gross, sie reicht jedoch für die Bestimmung der Motorstärke aus.

In der nachstehenden Tabelle sind drei derartige Vergleichsversuche in einer Holzbütte von 4,2 m \varnothing als Beispiel wiedergegeben und mit den zur genaueren Kennzeichnung notwendigen Angaben vereinigt.

Tabelle.

Relative Füllung λ	Berechnete Leistung KW für 27 U/min.	Gemessene Leistung KW	Mehrbetrag %
0,3	1,14	1,52	33
0,5	1,72	2,20	28
1,0	2,38	3,23	35

Als Flüssigkeit wurde durchweg Wasser verwendet, da sich hierbei, der niedrigen Viskosität entsprechend, ein Einfluss der Rauigkeit am stärksten zeigt. Aus den in grösserer Zahl vorliegenden Vergleichsmessungen über die prozentuale Leistungssteigerung konnte gefolgert werden, dass zur Berücksichtigung der Betriebsrauigkeit ein Zuschlag von 30% angemessen erscheint, wenn die Gefässe aus Metall oder Holz bestehen, bzw. eine Ausmauerung besitzen. Auch bei emaillierten Gefässen dürfte ein Zuschlag von 10% angebracht sein.

Es ergibt sich nun die Frage, ob dieser Zuschlag bei höherviskosen Flüssigkeiten niedriger gewählt werden kann. Wenn auch durch die oben mitgeteilten Versuche nicht einwandfrei geklärt ist, von welcher Viskosität bzw. Reynoldscher Zahl an der Einfluss der Rauigkeit stark zurücktritt, so darf doch aus den Abb. 83 und 85 geschlossen werden, dass eine allmähliche Abnahme des Unterschiedes gegen das laminare Gebiet hin erfolgt. Er wird jedoch erst in jenem hydrodynamischen Bereich klein, in dem eine Verwendung des Rührblattes nicht mehr am Platze ist. Die Grösse des Zuschlages dürfte wohl auch nicht durch das spez. Gewicht beeinflusst werden, da der Leistungsbedarf in beiden Fällen (glatt oder rau) diesem unmittelbar verhältnissgleich ist. Vorsichtshalber wird man wohl beim Blattrührer zweckmässigerweise den für Wasser er-

169002861

mittelten Reibungszuschlag in der vollen Grösse für alle Stoffe beibehalten.

Ergänzend sei noch bemerkt, dass der Einfluss der Wandrauigkeit in gleichem Masse in Erscheinung tritt, wenn in dem Gefäss Einbauten vorhanden sind.

7 Der Einfluss von Gefässeinbauten.

Die bisherigen Betrachtungen beschränkten sich nahezu ausschliesslich auf Rührgefässe ohne jegliche Einbauten. Diese gelangen jedoch verhältnismässig selten zur Verwendung, da die meisten Rührapparate zum mindesten mit Thermometerstutzen, Einleitungs-, Absaug- oder Abdrückröhren versehen werden, die auf den benötigten Leistungsaufwand von Einfluss sind.

In den früheren Abschnitten dieses Berichtes wurde gesagt, dass Einbauten zum Zweck der Verbesserung der Rührwirkung im allgemeinen keinen Erfolg bringen. (Ausnahmen: Rührer für hochviskose und plastische Stoffe, sowie Gasrührer). Die praktisch notwendigen Einbauten sind daher meistens nur durch die Art der durchzuführenden Prozesse bedingt. Die am häufigsten vorkommenden Einbauten sind ausser den Tauchrohren senkrecht oder am Boden waagrecht angeordnete Schlangen.

Die Tauchrohre.

Aus zahlreichen Modellversuchen wurde gefunden, dass durch den Einbau verhältnismässig dünner Thermometerrohre der Leistungsbedarf von Blattrührern um etwa 10%,

durch dickere Steigrohre um etwa 20% vergrössert wird +). Dieser Einfluss wird erst bei Flüssigkeiten mit sehr hoher Viskosität, für die Blattrührer an sich keine Verwendung mehr finden sollten, geringer.

Ordnet man zwei Rohre diametral gegenüber an, so beträgt die Leistungssteigerung das Doppelte des einfachen

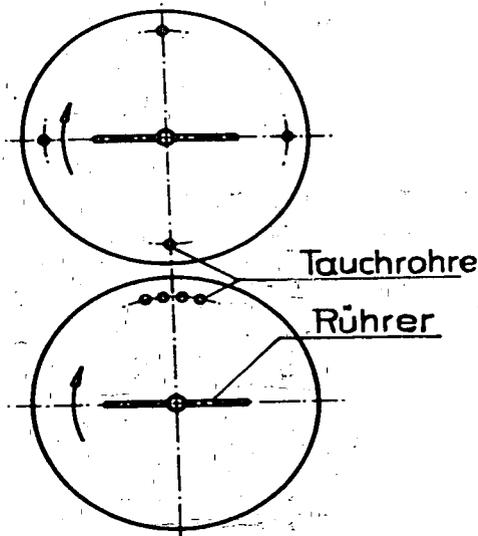


Abb. 86.

Rohres. Vier Rohre um 90° versetzt (Abb. 86) angeordnet, ergeben nahezu die vierfache Steigerung (40 bzw. 80%). Vom rein energetischen Standpunkt aus gesehen, wäre es zweckmäßiger, die Rohre unmittelbar hintereinander zu legen, da sie dann insgesamt kaum eine grössere Leistungssteigerung als ein einzel-

nes Rohr hervorrufen. Dies ist jedoch aus konstruktiven Gründen meistens unmöglich.

Durch Tauchrohre wird auch eine Leistungssteigerung hervorgerufen, wenn sich diese zwischen der Gefässwand und einer Schlange befinden. So nahm z.B. der Motor eines Blattrührers ($n = 60$ U/min, $D = 2400$ mm) ohne Steigrohr 8,4 KW, mit Steigrohr (150 mm \varnothing) 10,0 KW auf. Unter Berücksichtigung der Wirkungsgradänderung des schwach belasteten

+) Dies gilt nur für Anordnung in der Nähe der Wand; in der Rührernähe wird die Steigerung grösser, ebenso bei raschlaufenden Rührern.

Motors betrug die Leistungssteigerung 18%. Da, wie noch genauer auszuführen sein wird, durch die Schlangen eine sehr erhebliche Erhöhung des Energieverbrauches hervorgerufen wird, ist die durch das Steigrohr bedingte, absolute Zunahme wesentlich grösser, als im Gefäss ohne Einbau. Offenbar ist dies darauf zurückzuführen, dass das Steigrohr in der durch die Schlangen hervorgerufenen Wirbelzone liegt.

Die Schlangen.

Durch die Einbeziehung des Einflusses von Schlangen verschiedener Art wird die Auswahl der in Betracht kommenden geometrischen Veränderlichen wiederum wesentlich erhöht. Wie aus orientierenden Versuchen hervorgeht, kann zwar angenommen werden, dass auch bei eingebauten Schlangen der Einfluss von Blatthöhe, Bodenabstand, Füllhöhe, Rauigkeit u.s.w. anteilmässig derselbe bleibt, so dass nach dieser Richtung hin nicht mehr allzuviel zu klären sein wird. Trotzdem ist durch die neu hinzukommenden Variabeln (Wicklungsdurchmesser, Rohrdurchmesser, lichter Abstand, Höhe, Anzahl der Schlangen) ein sehr zeitraubendes Messprogramm gegeben. Als ausserordentliche Erschwerung kommt noch hinzu, dass die Art der Schlangenbefestigung von wesentlichem Einfluss sein kann.

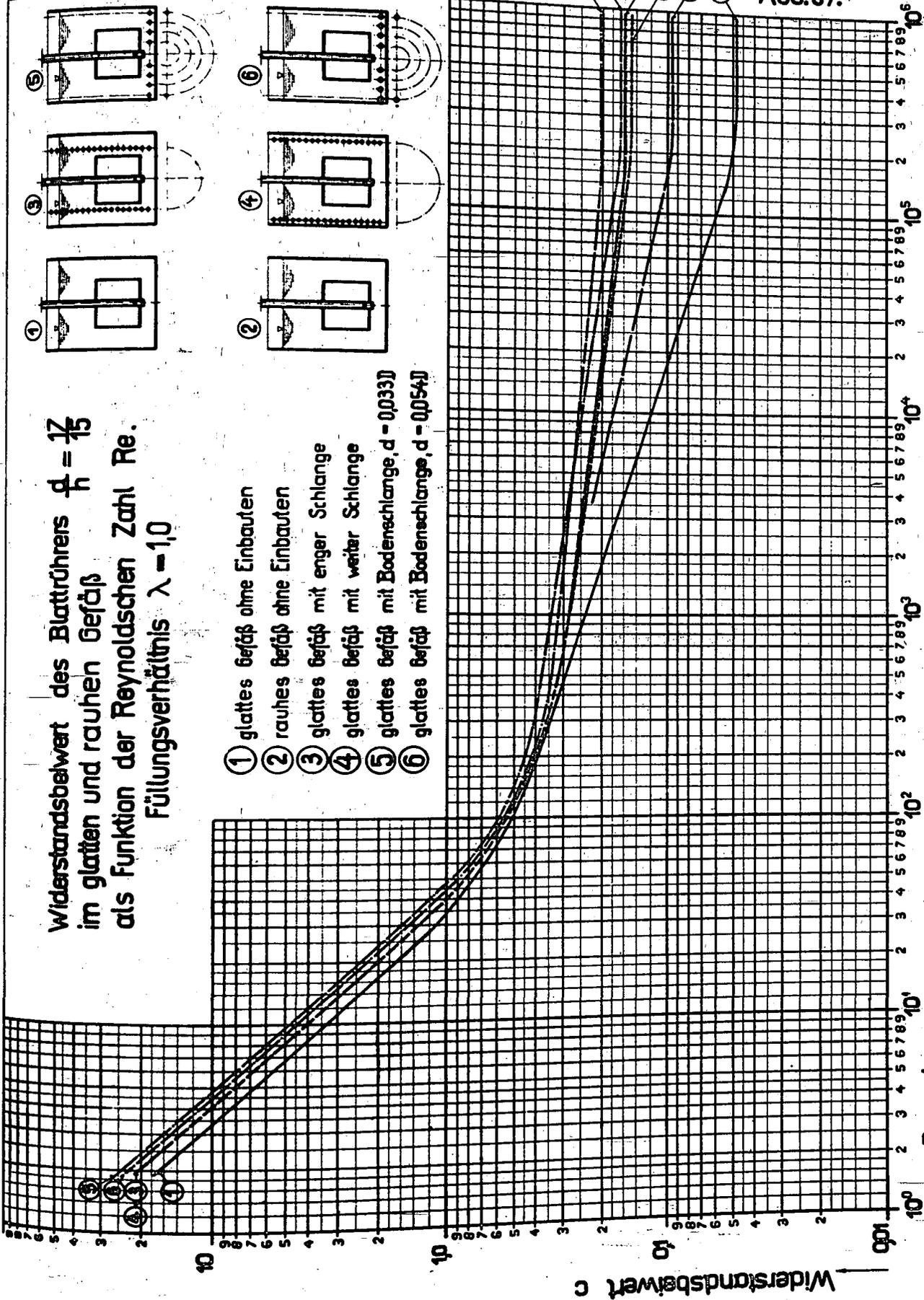
Die Durchführung eingehender Versuchsarbeiten zur Festlegung der Beiwerte scheint augenblicklich noch verfrüht zu sein. Erst wenn eine hinreichende Normung der Schlangen-anordnung und deren Befestigung besteht, können die entsprechenden Untersuchungen in Angriff genommen werden.

An dieser Stelle sei zunächst nur die grundsätzliche

Abb. 87.

Widerstandsbeiwert des Blattührers $\lambda = \frac{17}{15}$
 im glatten und rauhen Gefäß
 als Funktion der Reynoldsschen Zahl Re .
 Füllungsverhältnis $\lambda = 1,0$

- ① glattes Gefäß ohne Einbauten
- ② rauhes Gefäß ohne Einbauten
- ③ glattes Gefäß mit enger Schlange
- ④ glattes Gefäß mit weiter Schlange
- ⑤ glattes Gefäß mit Bodenschlange, $d = 0,033D$
- ⑥ glattes Gefäß mit Bodenschlange, $d = 0,054D$



Auswirkung von Schlangeneinbauten, sowie der Art ihrer Befestigung behandelt. Aus den zahlreichen Versuchen mit glatten Schlangen in glatten Gefässen ist in Abb. 87 der Verlauf des Beiwertes für das Füllungsverhältnis $\lambda = 1,0$ herausgegriffen. Die Kurve I gilt für das glatte, die Kurven III und IV für die senkrechten Schlangen mit engem und weitem Wicklungsdurchmesser und die Kurven V und VI für zwei verschiedene Bodenschlangen +). Die Kurve II gibt den vermuteten Verlauf für das sandraue Gefäss wieder. Die Abmessungen sind aus den Schemaskizzen der Abb. 90 - 94 zu ersehen.

Die Wirkung der Einbauten tritt demnach besonders bei hohen Reynolds'schen Zahlen, d.h. geringen Flüssigkeitsviskositäten hervor. Ueberraschend ist die Tatsache, dass einfache Bodenschlangen eine sehr erhebliche Leistungssteigerung hervorrufen. Die Kurven II - IV besitzen alle eine geringere Neigung als die Kurve I. Dies besagt, dass bei ihnen die Trägheitskräfte von grösserem Einfluss sind, als die Reibungskräfte, denn der Verlauf nähert sich jenem, bei dem der Beiwert c von der Reynolds'schen Zahl unabhängig wird ($\log c // \log Re$) und dem eine rein quadratische Abhängigkeit des Widerstandes von der Geschwindigkeit entspricht. Diese Erscheinung ist auch verständlich: im glatten Gefäss wird die Energie hauptsächlich in der Grenzschicht durch Reibung verzehrt. Das rauhe Gefäss bzw. die Schlangen geben Anlass zu einer verstärkten Ablösung von Wirbeln, deren kine-

+) In den eigentlichen Beiwertstafeln (Abb. 90 bis 94) wurden wegen der besseren Uebersichtlichkeit die Versuchspunkte nicht eingezeichnet.

tische Energie sich im Innern der Flüssigkeit in Reibungswärme umsetzt +). Interessant ist im übrigen, dass, wie aus Abb. 87 hervorgeht, die Grösse der "kritischen" Reynolds'schen Zahl (~ 60) durch den Einbau von Schlangen offenbar keine merkliche Aenderung erfährt.

Die oben wiedergegebenen Versuchsergebnisse zeigen schon den grossen Einfluss derartiger Einbauten auf die Höhe des Leistungsbedarfes. In welchem Masse sich aber auch die Art der Schlangenbefestigung auswirken kann, geht aus dem nachfolgenden Beispiel hervor:

In einem auswärtigen Werk war eine grosse Anzahl von Kesseln mit eingebauten Schlangen und Blattrührern zur Aufstellung gelangt. Je nach der Gefässgrösse (2200 - 2600 mm ϕ) waren zum Antrieb Motoren von 4,5 - 6,5 KW Wellenleistung bei rund 60 U/min vorgesehen worden. Nach der Inbetriebsetzung

zeigte es sich, dass die Kessel schon bei Füllung mit Wasser ein Mehrfaches der vorgesehenen Motorstärke als Leistung benötigten. Da das später zu verarbeitende Gemisch ein spezifisches Gewicht von 1,7 besitzt, schien es zunächst ausgeschlossen zu sein, die vorhandenen Motore und Getriebe für den gedachten Zweck zu

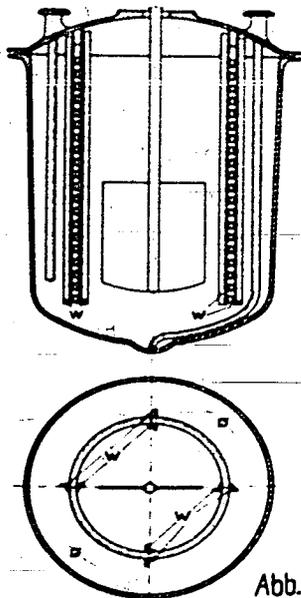


Abb. 88.

+ Hierin ist auch die Erklärung dafür zu suchen, warum die von White und Sumnerford (s.o.) gefundene Abhängigkeit des Blattrührerbeiwertes von der Reynolds'schen Zahl eine etwas geringere Neigung aufweist, als die der Ludwigshafener Versuche. Sie arbeiten im rauhen Gefäss.

verwenden. Durch einige einfache Abänderungen gelang es jedoch, hierin Abhilfe zu schaffen. Wie aus Abb. 88 zu ersehen ist, in der die Hauptabmessungen der grössten verwendeten Gefässe wiedergegeben sind, dienen 4 Winkelleisenpaare W-W zur Versteifung und Befestigung der Schlangen. Eine Beobachtung des Strömungsvorganges zeigte zunächst, dass die radial gerichteten Schenkel dieser Verstreibungen Anlass zu den starken Wirbelablösungen gaben. Wie aus den nachstehend wiedergegebenen Massnahmen zur Beseitigung des hohen Leistungsbedarfes hervorgeht, war tatsächlich hierin der Hauptgrund für den hohen Leistungsbedarf zu suchen.

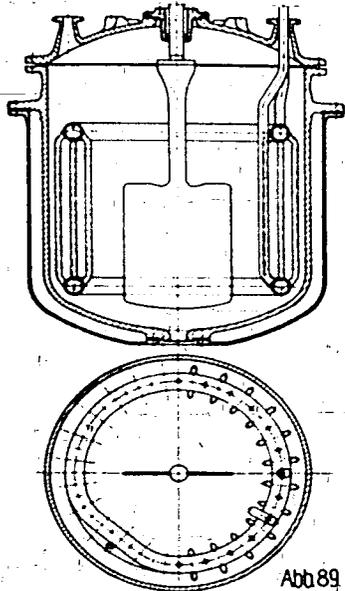
Ursprüngliche Leistungsaufnahme des Motors	17,4 KW
Leistungsaufnahme nach Abbrennen der 4 nach innen gerichteten Winkelleisenschenkel	12,6 KW
Leistungsaufnahme nach Abbrennen der 4 nach aussen gerichteten Winkelleisenschenkel	8,4 KW
Infolge des Wegfalles der Strombrecherwirkung der 8 Winkelleisenschenkel ist die Rührwirkung so verbessert, dass die Drehzahl von 60 auf 40 U/min herabgesetzt werden kann, ohne die Wirkung zu beeinträchtigen	
Leistungsaufnahme bei 40 U/Min.	3,6 KW
Rührblattecken mit $r = 0,2$ m abgerundet	
Leistungsaufnahme	3,0 KW

Nach diesen Abänderungen reichten die Antriebe für den gedachten Zweck aus. Messungen an einem Modell ergaben nach der Umrechnung eine völlige Uebereinstimmung mit der aus der Stromaufnahme und der Motorwirkungsgradkurve bestimmten Wellenleistung.

Aus diesem Beispiel ist zu erkennen, in welchem starkem Masse sich die Form derartiger Einbauten auf den Leistungsbedarf auswirkt. Die Durchführung von eingehenden Versuchen über die zweckmässigste Gestalt von Schlangen und ihren

Befestigungen ist dringend wünschenswert, denn bei der grossen Zahl von Rührgefässen, die dauernd in Betrieb sind, kann u.U. durch einfache Aenderungen eine beträchtliche Einsparung an Energie erzielt werden.

Die einfache, senkrechte Schlange, bzw. auch die Doppelschlange stellt offenbar ein Konstruktionselement dar,



das in Verbindung mit dem Blattrührer einen guten Wärmeaustausch ermöglicht, ohne den Leistungsbedarf allzu sehr zu erhöhen. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Rohre bei dieser Anordnung wenigstens in roher Annäherung den Stromlinien folgen. Die Bodenschlangen sind in dieser

Beziehung ungünstiger. Eine Wärmeaustauschvorrichtung nach Abb. 89, die im übrigen nur bei niedrigviskosen Flüssigkeiten Verwendung finden darf, und dem L i n d e'sche Steilrohrverdampfer nachgebildet ist, liefert eine wesentliche Leistungserhöhung. Es muss den späteren Untersuchungen über den Wärmedurchgang beim Rühren vorbehalten bleiben, festzustellen, ob der höheren Rührleistung auch ein entsprechender Vorteil auf thermischem Gebiete gegenübersteht.

Ueber den Einfluss der Rauigkeit von Schlangen wurden bis jetzt noch keine systematischen Untersuchungen durchgeführt. Aus einzelnen Vergleichsversuchen geht jedoch

hervor, dass diesem genügend Rechnung getragen wird, wenn man den Zuschlag von 30% auf die gesamte Leistung bezieht und nicht nur auf den Leistungsbedarf des Rührers im glatten Gefäß ohne Einbauten.

c) Die Tafeln für den normalen Blattrührer.

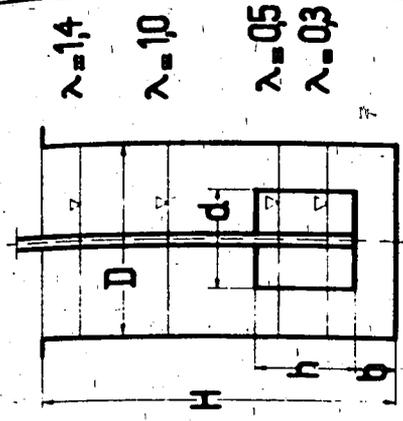
In dem experimentellen Teil des vorliegenden Berichtes wurden die zur Aufstellung von Rechentafeln notwendigen Versuchsarbeiten am Beispiel des Blattrührers erläutert. Dieser liegt in seinen Abmessungen soweit fest, dass die endgültigen Tafeln aufgestellt werden konnten, ohne nach seiner Normung noch solche Änderungen der Form befürchten zu müssen, die eine Wiederholung der Versuche notwendig machen.

Die Abb. 90 - 94 zeigen den Verlauf des Widerstandsbeiwertes als Funktion der Reynolds'schen Zahl bei vier verschiedenen relativen Füllhöhen für das glatte Gefäß ohne Einbauten, sowie für Kessel mit einer senkrechten Schlange engen und weiten Wicklungsdurchmessers und zwei verschiedene Bodenschlangen. Der Beiwert ist auf das von H a i l e r gefundene optimale Blatt mit dem Verhältnis $h:d = 15:17 = \sim 0,9$ bezogen.

Zur Bestimmung der reinen Wellenleistung ermittelt man mit der Viskosität und dem spezifischen Gewicht der Flüssigkeit, dem Durchmesser und der Umfangsgeschwindigkeit $v = \frac{d \cdot n}{60}$ des Blattrührers die Reynolds'sche Zahl $\frac{v \cdot d}{\nu}$ und greift aus dem zugehörigen Diagramm den Beiwert c ab. Führt man diesen mit den sonstigen Zahlenwerten in Gl. 20 ein, dann ergibt sich zunächst der Leistungsbedarf L im glatten Gefäß. Die tatsächlich an der Motorwelle aufzubrin-

Abb. 90.

Widerstandsbeiwert des Blattührers $\lambda = \frac{17}{15}$
 im glatten Gefäß ohne Einbauten
 als Funktion der Reynoldsschen Zahl Re
 und des Füllungsverhältnisses λ .



- ① $\lambda = 0,3$ $\lambda = \frac{H}{D}$
- ② $\lambda = 0,5$ $\frac{b}{D} = 0,18$
- ③ $\lambda = 1,0$
- ④ $\lambda = 1,4$

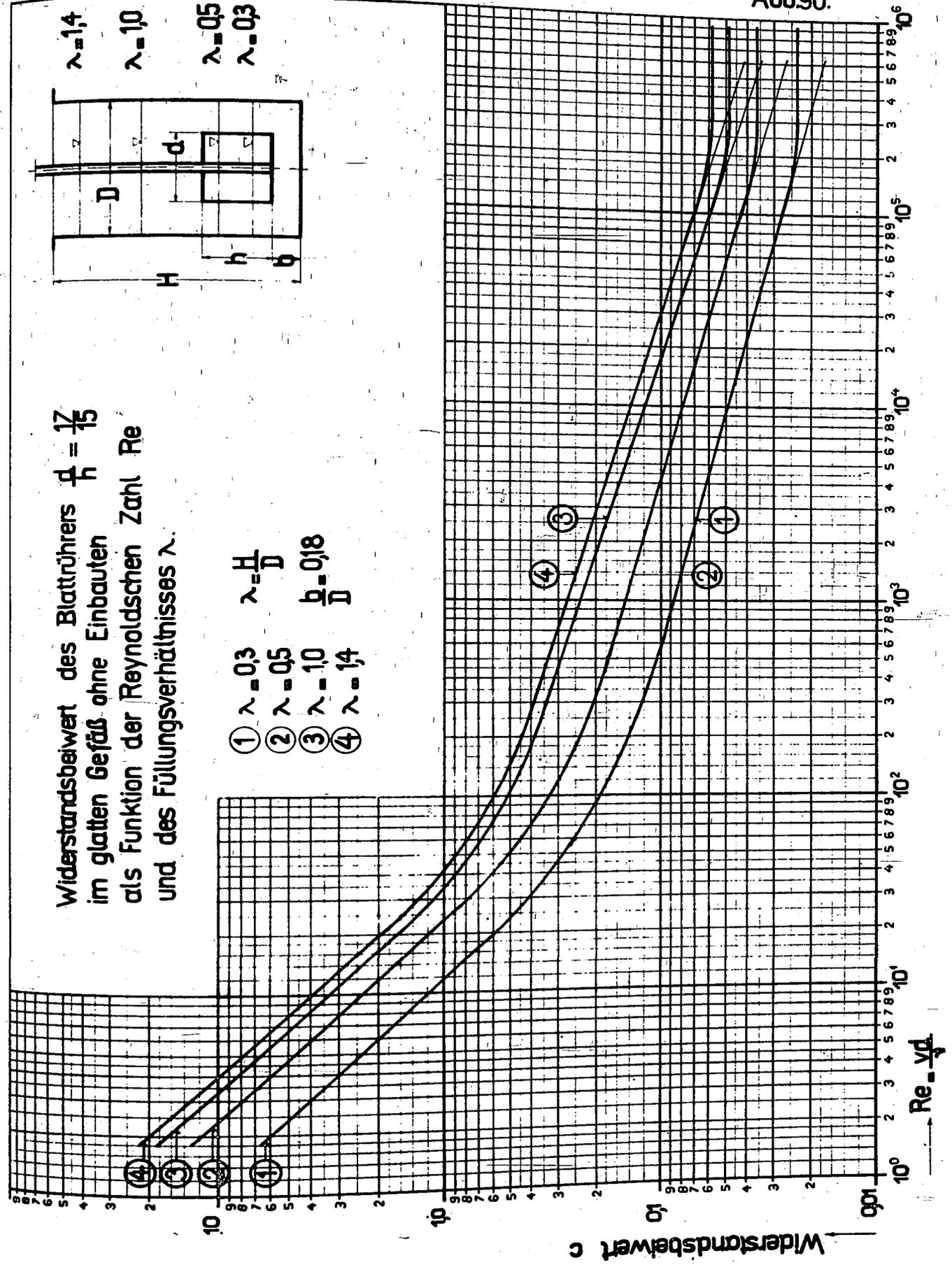


Abb. 91.

Widerstandsbeiwert des Blattrührers $\frac{d}{h} = \frac{17}{15}$
 im glatten Gefäß mit Einbauten
 als Funktion der Reynoldsschen Zahl Re
 und des Füllungsverhältnisses λ .

- | | | |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| ① $\lambda = 0,3$ | $\lambda = \frac{H}{D}$ | $\frac{d'}{D} = 0,65$ |
| ② $\lambda = 0,5$ | | |
| ③ $\lambda = 1,0$ | $b = 0,18$ | $\frac{d''}{D} = 0,033$ |
| ④ $\lambda = 1,4$ | | $\frac{t}{D} = 0,06$ |

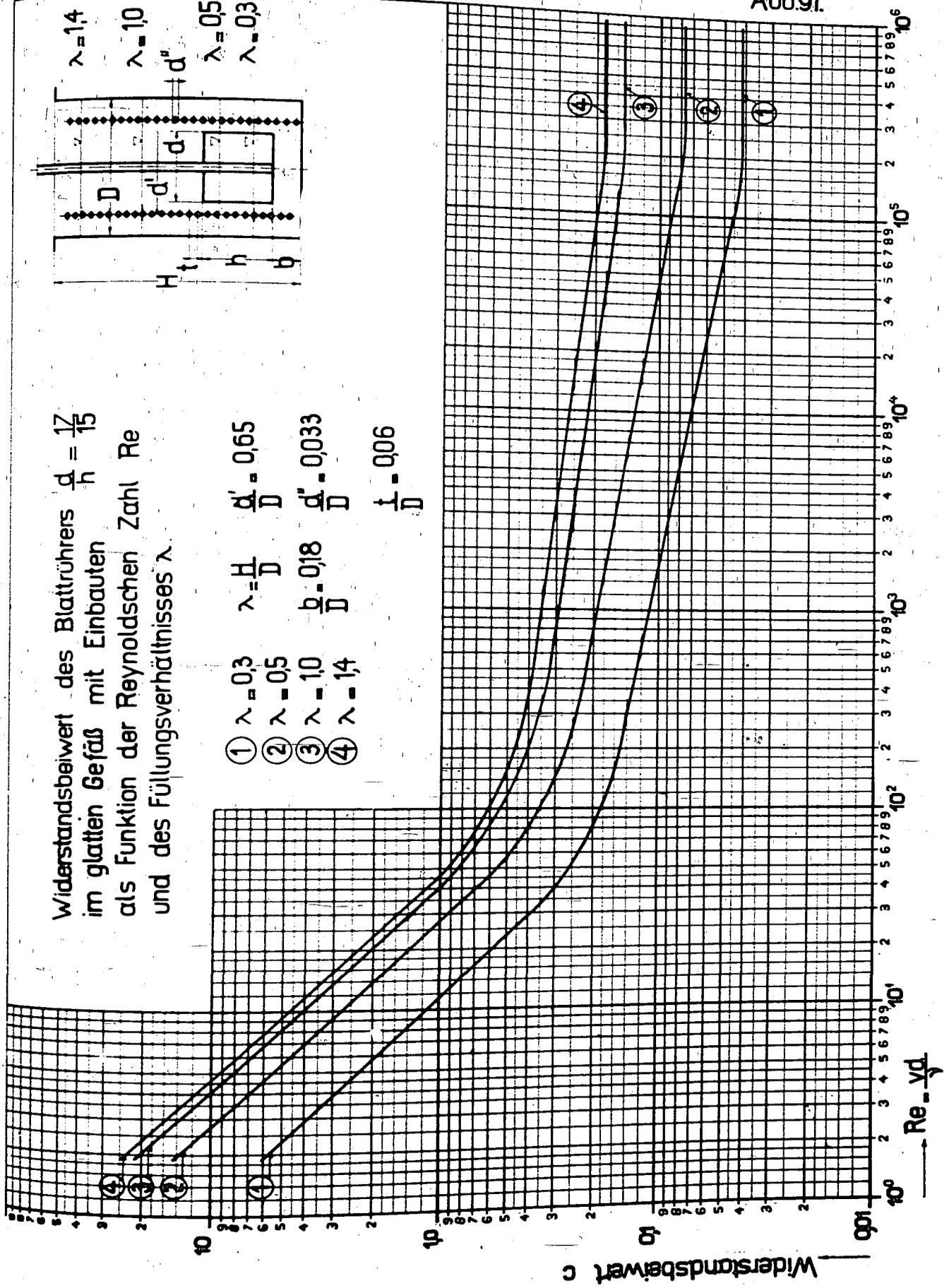
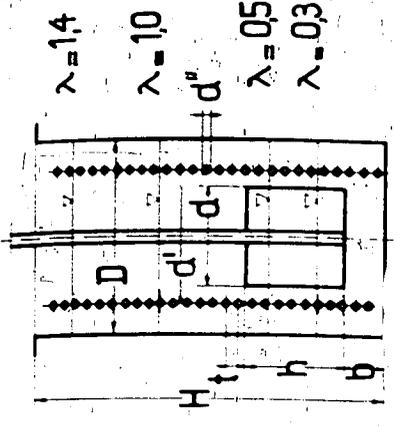
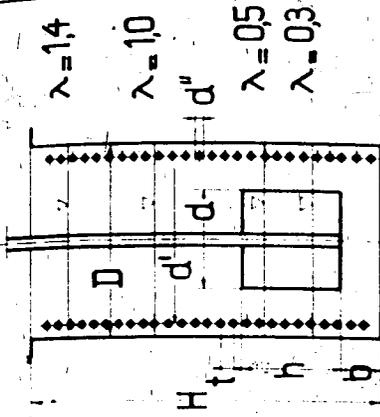


Abb 92.

Widerstandsbeiwert des Blattrührers $\frac{d}{h} = \frac{17}{15}$
 im glatten Gefäß mit Einbauten
 als Funktion der Reynoldsschen Zahl Re
 und des Füllungsverhältnisses λ .

- ① $\lambda = 0,3$ $\lambda = \frac{H}{D}$ $\frac{d'}{D} = 0,85$
- ② $\lambda = 0,5$ $\frac{b}{D} = 0,18$ $\frac{d''}{D} = 0,033$
- ③ $\lambda = 1,0$
- ④ $\lambda = 1,4$ $\frac{t}{D} = 0,06$



$\lambda = 1,4$
 $\lambda = 1,0$
 $\lambda = 0,5$
 $\lambda = 0,3$

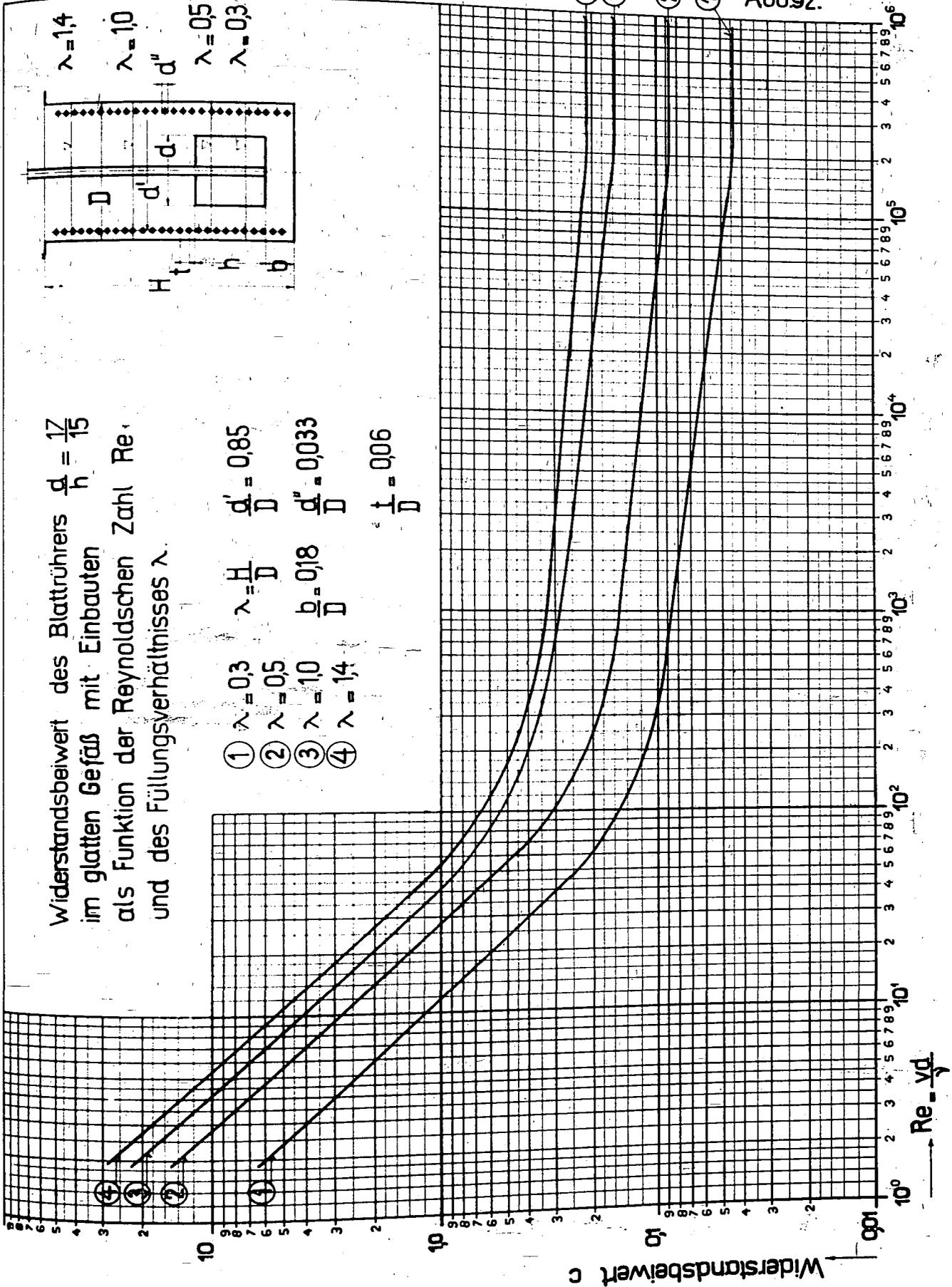


Abb.93.

Widerstandsbeiwert des Blattührers $\lambda = \frac{17}{15}$
 im glatten Gefäß mit Einbauten
 als Funktion der Reynoldsschen Zahl Re
 und des Füllungsverhältnisses λ .

- ① $\lambda = 0,3$ $\lambda = \frac{H}{D} = 0,85$ $\frac{d'}{D} = 0,85$
- ② $\lambda = 0,5$ $\frac{b}{D} = 0,18$ $\frac{d''}{D} = 0,033$
- ③ $\lambda = 1,0$ $\frac{b'}{D} = 0,12$ $\frac{l}{D} = 0,1$
- ④ $\lambda = 14$

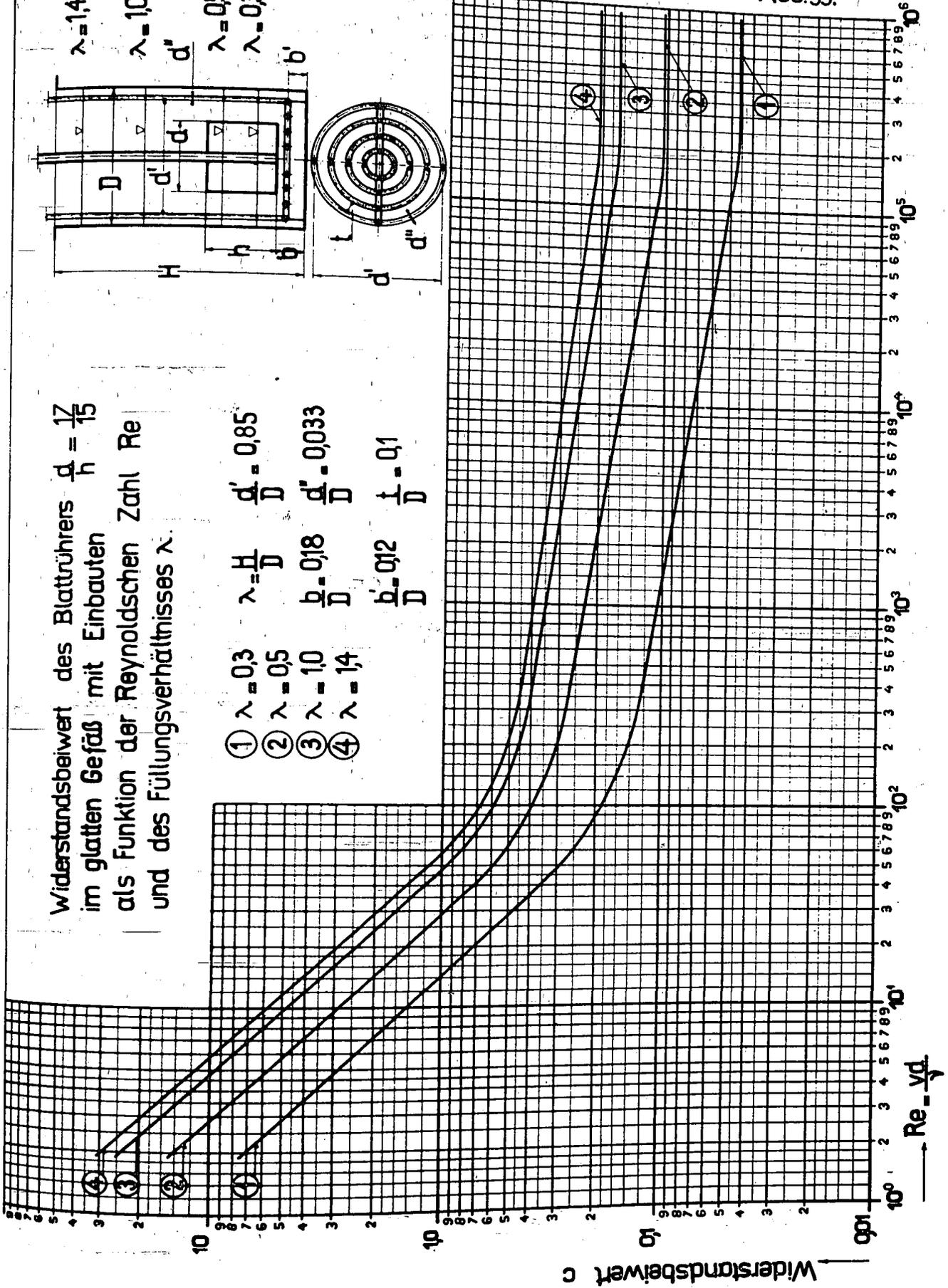
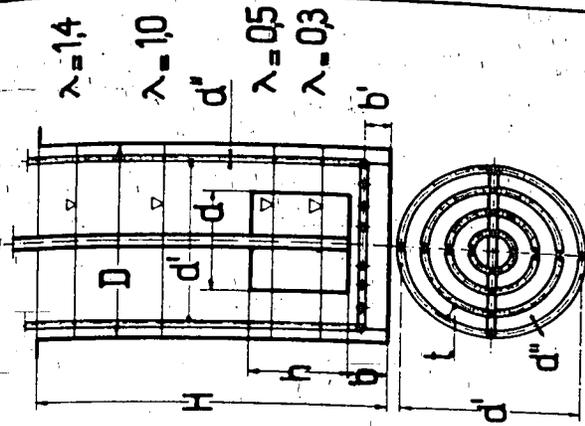
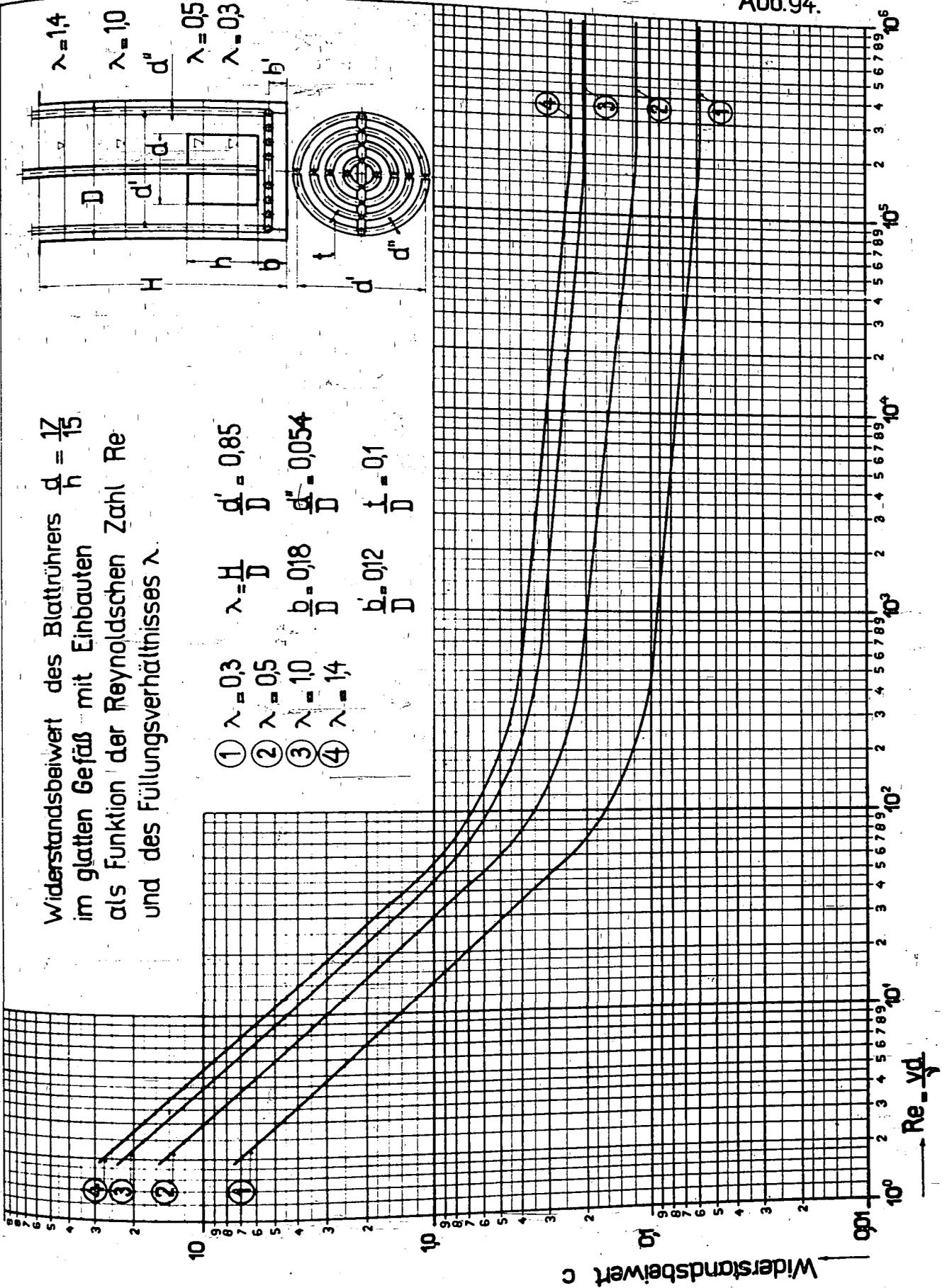
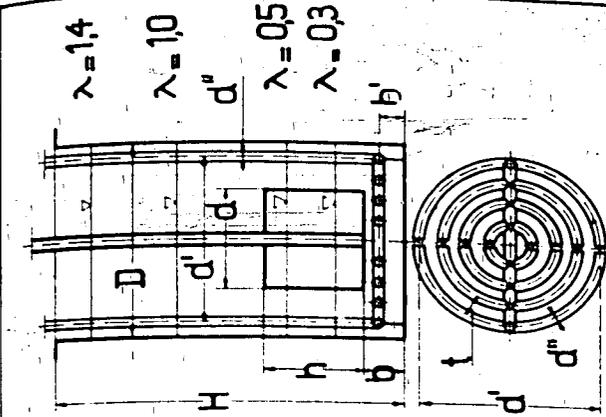


Abb.94.

Widerstandsbeiwert des Blattrührers $\frac{d}{h} = \frac{17}{15}$
 im glatten Gefäß mit Einbauten
 als Funktion der Reynoldsschen Zahl Re
 und des Füllungsverhältnisses λ

- ① $\lambda = 0,3$ $\lambda = \frac{H}{D}$ $\frac{d'}{D} = 0,85$
- ② $\lambda = 0,5$ $\frac{b}{D} = 0,18$ $\frac{d''}{D} = 0,054$
- ③ $\lambda = 1,0$ $\frac{b}{D} = 0,12$ $\frac{t}{D} = 0,1$
- ④ $\lambda = 1,4$



genau bekannt. In dieser Hinsicht hat sich die Erfahrung gezeigt, dass die Eigenschaften des Rohmaterials, insbesondere die W. wie aus Gl. 3 hervorgeht, durch die Verunreinigungen der Lager- und Stoffbehälter, die Feuchtigkeit sowie das Geruchsabwehrmittel.

Eine Betrachtung der Gl. 30 zeigt, dass die Kurve für die Temperaturverläufe im Wesentlichen parallel verläuft. Da der Wert α in logarithmischen Mass aufgetragen ist, besagt dies, dass das Verhältnis der Werte für zwei verschiedene Fallhöhen

unabhängig von der Fallhöhe h ist. In dem Maße, wie die Fallhöhe h mit der Temperatur T im Bereich $0,3 < T < 0,5$ kann der Wert α ohne allmählichen Verlauf durch eine lineare Beziehung von der Form

$$\alpha = a + b \cdot T \quad \text{Gl. 31}$$

ausgedrückt werden, wobei a nur noch eine Funktion der Fallhöhe h ist. Die Gl. 30 besitzt jedoch keine besondere qualitative Bedeutung, da nur zur zahlenmäßigen Auswertung besser die α als auch die Temperatur T errechnet wird, aus der Tafel abgelesen. Für die Gefässe mit Hindernis ist eine derartig einfache Darstellung wegen ihrer nicht möglich, weil die Kurven für verschiedene Fallhöhen nicht mehr annähernd parallel sind.

Die Salzwasser für weitere Kälteversuche.

Die grosse Zahl der durchgeführten Kälteversuche lieferte naturgemäss für eine ganze Reihe von Kälteformen die Werte der Drehmomente, unter den verschiedensten Bedingungen gemessen. Da jedoch die meisten Versuche nur zur

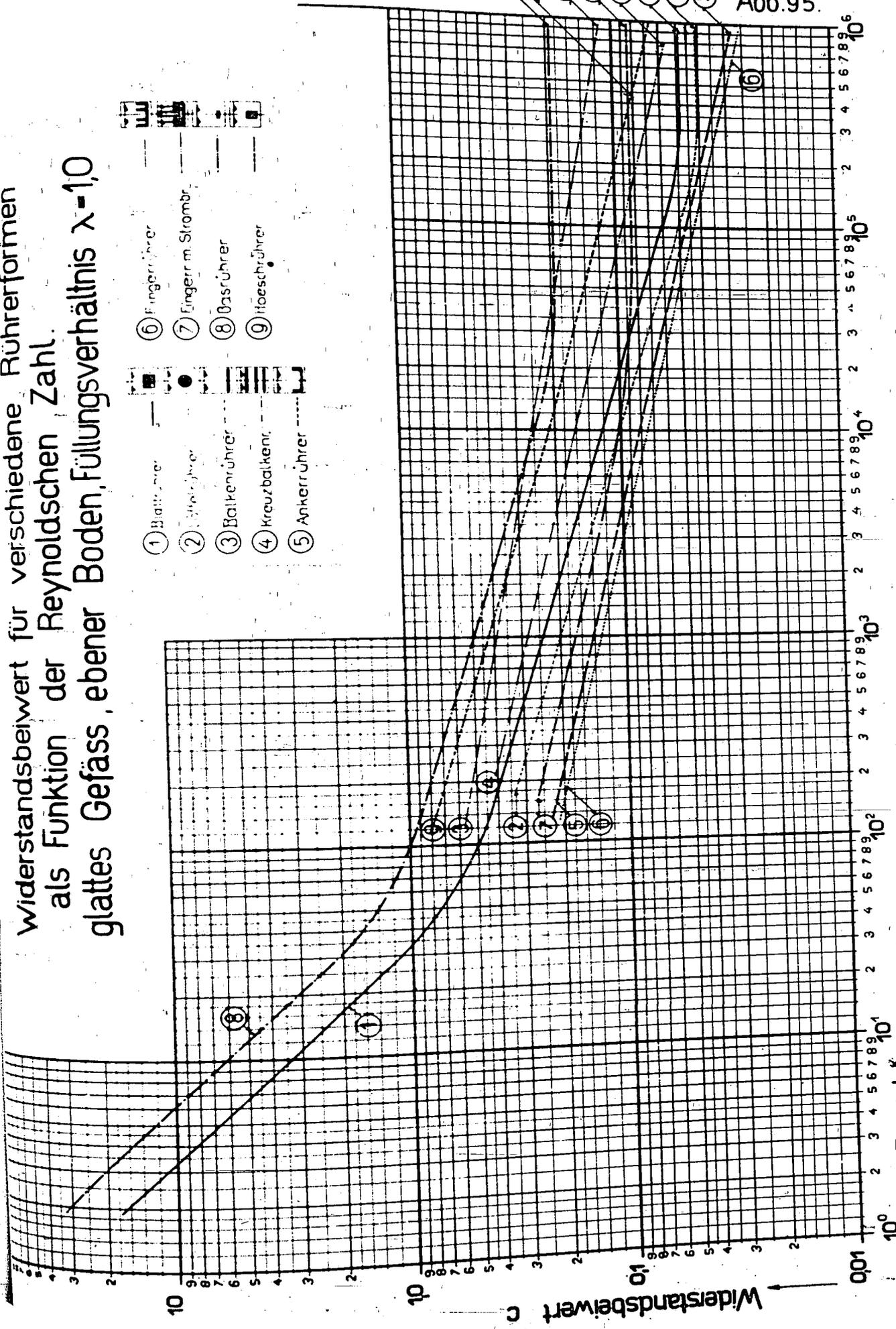
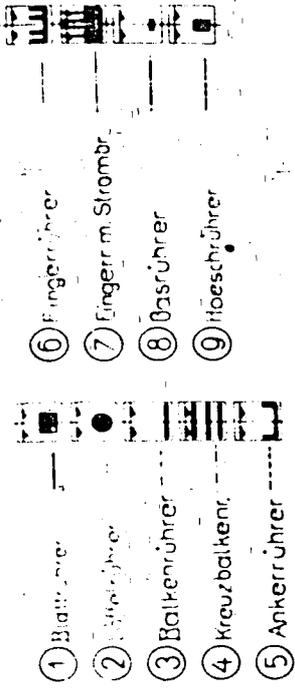
Bemessung von Rührwerken für bestimmte Zwecke dienen, geben die aus den Versuchen berechneten Beiwerte meist nur den Verlauf für einen engen Bereich der Reynolds'schen Zahlen wieder. Eine systematische Ermittlung der Zusammenhänge, wie dies für den als Beispiel behandelten Blattrührer erfolgte, schien jedoch noch verfrüht zu sein. Bevor diese zeitraubende Arbeit in Angriff genommen wird, ist es notwendig, zum mindesten hinsichtlich der Hauptabmessungen der für die Verwendung vorgeschlagenen Rührer (vgl. Abschn. II) eine Normung durchzuführen.

Um wenigstens einige Anhaltspunkte zu geben, sind in Abb. 95 einige Beiwerte für verschiedene Rührerformen zusammengestellt worden. Die zugehörigen geometrischen Abmessungen sind aus Abb. 96 zu entnehmen. Als charakteristische Geschwindigkeit ist dabei immer jene des am weitesten von dem Wellenmittel entfernten Punktes des Umfanges gewählt worden. Die Reynolds'sche Zahl dient wiederum als Abszisse. Man kann zunächst daraus erkennen, dass das kreisförmige Blatt über den ganzen Bereich um etwa 20% niedriger liegt als das rechteckige.

Die raschlaufenden Rührer (kleines Blatt und Hoeschrührer) werden augenblicklich genauer untersucht, da für sie die Abmessung^{en} im einzelnen bereits so festliegen, dass bei einer Normung kaum mit wesentlichen Änderungen zu rechnen sein wird.

Eine Betrachtung der Abb. 95 zeigt die zwischen den einzelnen Rührerformen bestehenden grossen Unterschiede in der Höhe der Beiwerte. Man muss sich jedoch hüten, hieraus unmittelbar auf die Grösse des Leistungsverbrauches zu

Widerstandsbeiwert für verschiedene Rührerformen
 als Funktion der Reynoldsschen Zahl.
 glattes Gefäß, ebener Boden, Füllungsverhältnis $\lambda=1,0$



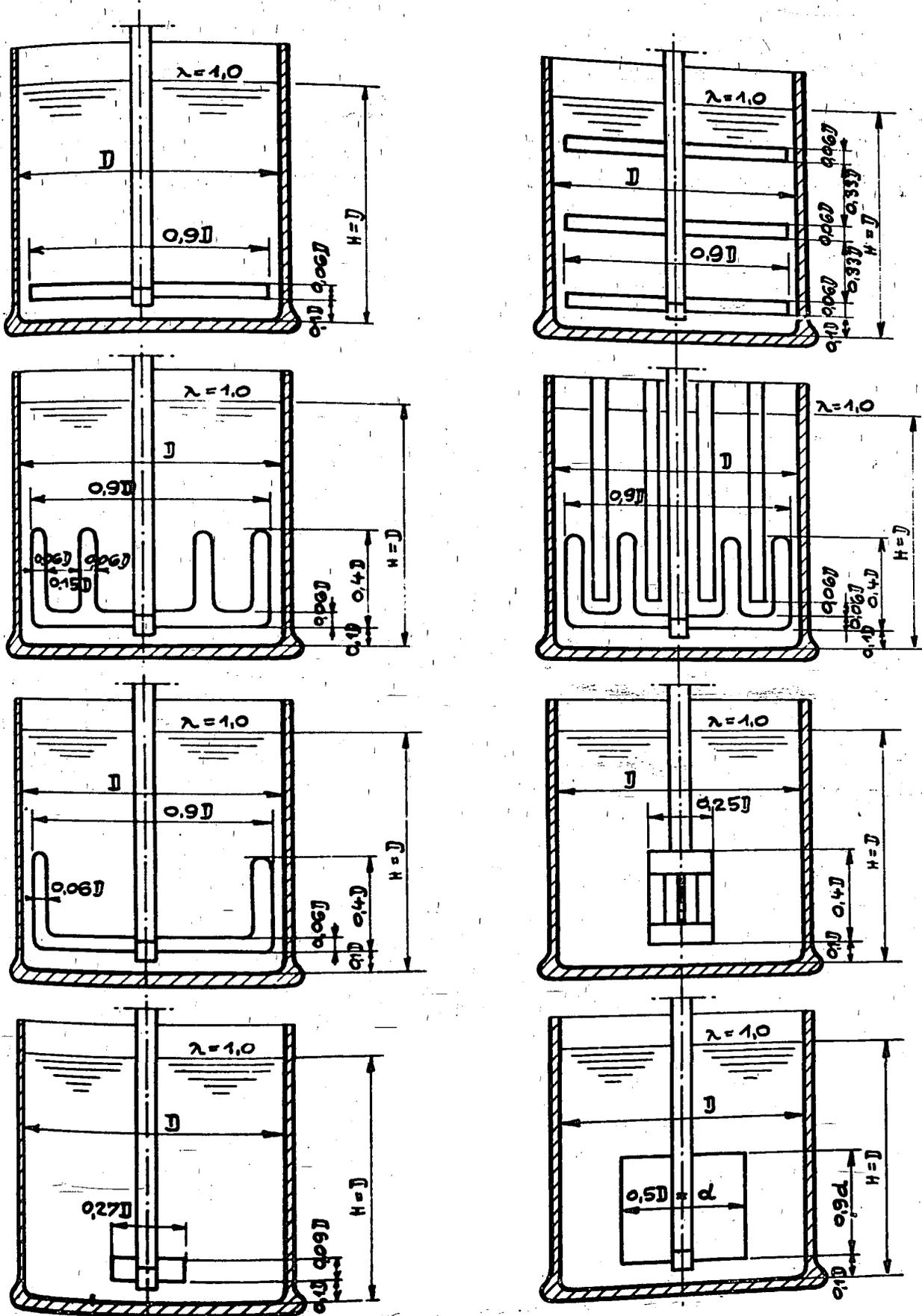


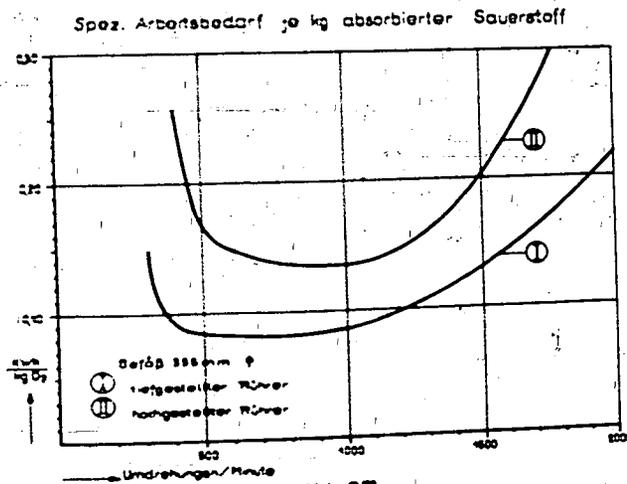
Abb. 96.

schliessen. Die Widerstandskoeffizienten sind nach Gl. 20 berechnet, in der für d der grösste Durchmesser und für h die grösste Höhe eingesetzt wurden. Rührer, die bei gleicher Drehzahl dieselbe Leistung aufnehmen, können daher je nach den Abmessungen völlig verschiedene Beiwerte besitzen. Zudem sind die günstigen Betriebsdrehzahlen je nach der Rührerform verschieden.

e) Die Wahl der Betriebsdrehzahl.

Die meisten physikalischen und chemischen Prozesse, die in Rührgefässen durchgeführt werden, sind in starkem

Masse von der Drehzahl abhängig +). Die Wärmeübertragung, die Reaktions-, und Lösegeschwindigkeiten werden mit wachsender Drehzahl gesteigert. Oft, besonders bei Gasreaktionen wird die



Umsetzung praktisch erst von einer bestimmten Rührgeschwindigkeit an überhaupt eingeleitet.

Im allgemeinen besitzt der Arbeitsbetrag, der auf-

+) Nur bei der Kondensation von Dämpfen oder der Absorption sehr leicht löslicher Gase tritt diese nicht so sehr in Erscheinung.

gewendet werden muss, um eine bestimmte Reaktionsgeschwindigkeit zu erzeugen, über der Drehzahl aufgetragen, ein ausgesprochenes Minimum. Ein Beispiel hierfür gibt Abb. 97, in der der Arbeitsbetrag zum Absorbieren von Sauerstoff in eine Natriumsulfitlösung mittels eines raschlaufenden, kleinen Blattes dargestellt ist. Man könnte an sich daraus zunächst folgern, dass es mit Rücksicht auf die Energieeinsparung am zweckmässigsten wäre, in jedem einzelnen Fall bei dieser ausgezeichneten Drehzahl zu arbeiten. Wie in der zweiten Folge dieses Berichtes jedoch noch nachgewiesen werden soll, wird die Grösse der Drehzahl, bei der ein Minimum des erforderlichen Arbeitsbedarfes eintritt, durch ausserordentlich viele Veränderliche beeinflusst (Viskosität, Temperatur, Konzentration, Grenzflächenspannungen, Diffusionskoeffizienten, Teilchengrössen u.s.w). Es kann daher möglich sein, dass

die sich bei der optimalen Drehzahl ergebenden Reaktionszeiten nicht in den Rahmen der sonstigen Arbeitsgänge einfügen oder man erhält bei unnötig kurzen Umsetzungszeiten übertrieben starke Wellenleistungen. Die Erfassung der

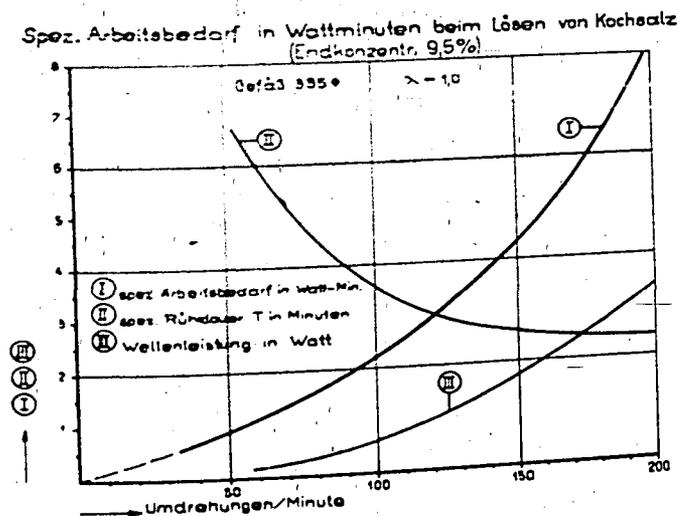


Abb. 98

günstigsten Drehzahl erfordert zudem sehr umfangreiche Ver-

suche.

Bei anderen Vorgängen zeigt sich jedoch überhaupt kein Minimum des Leistungsbedarfes. So z.B. nimmt (Abb. 98) der Arbeitsaufwand zum Lösen von Salz ständig zu. Bei derartigen Prozessen entscheidet daher schon von vornherein nur die Zeit, in der die Durchführung erfolgen soll, über die Wahl der Drehzahl.

Für die Praxis ist es deshalb viel wichtiger, anhand von Untersuchungen an kleinen Modellen nicht nur eine Vorausberechnung der zu erwartenden Leistungen zu ermöglichen, sondern auch Unterlagen für die bei der Grossausführung zu verwendenden Drehzahlen zu finden. Bei der Durchführung von Reaktionen im kleinen Maßstab, die den Zweck haben, aus den Ergebnissen Vorschläge für die Betriebsweise im Grossen geben zu können, erhebt sich daher neben den Fragen, die Form und Leistung des Rührers betreffen, auch die nach jener Drehzahl, bei der in der Grossausführung derselbe Verlauf hinsichtlich Ausbeute und Umsetzungszeit zu erwarten sein wird.

Wie leicht zu verstehen ist, wird schon beim Lösen die Zahl der den Vorgang beeinflussenden Veränderlichen viel grösser als diejenige, die die rein energetischen Abhängigkeiten bedingen (s. Gl. 24). In noch viel stärkerem Masse ist dies bei chemischen Umsetzungen der Fall. Damit wird aber eine exakte Behandlung nach den Methoden der Ähnlichkeitsphysik praktisch unmöglich und man muss nach einer Behelfslösung suchen, die der Wirklichkeit möglichst nahekommt. Es handelt sich also um die Klärung der Frage, welche Drehzahl bei der Grossausführung zu wählen ist, wenn im Modellversuch eine be-

stimme (Mindest-)Drehzahl gefunden wurde, mit der noch ein befriedigender Reaktionsverlauf zu erzielen ist.

Aufgrund theoretischer Ueberlegungen, wie auch von Feststellungen an zahlreichen Grossapparaturen, deren Gestalt und Betriebsweise anhand von Modellversuchen ermittelt worden waren, kann folgende Regel für die Wahl der Drehzahl angegeben werden: man gibt dem Rührer der Grossausführung jene Drehzahl, bei der auf die Volumeneinheit der Füllung derselbe Leistungsbetrag entfällt, wie auf die Volumeneinheit des Modellgefässes.

Diese Art der Drehzahlbestimmung hat sich bis jetzt in der Praxis sehr gut bewährt und besitzt, wie aus Vergleichsversuchen im Maßstab 1:5 über die Luftoxydation von Leukoverbindungen hervorgeht, offenbar auch für Gasreaktionen Gültigkeit.

Die Anwendung dieser Regel auf die wohl bei jedem Rührer auftretenden drei Grenzfälle der Strömungsform (s. Gl. 36), liefert die zwischen Drehzahl und Maßstabverhältnis jeweils geltenden Zusammenhänge.

Das Verhältnis des Leistungsbedarfes der Hauptausführung L_n zu dem des Modells L_m wird durch die Gl. 37 wiedergegeben. Da nach der oben erwähnten Regel bei beiden Apparaten die Leistung je Volumeneinheit dieselbe sein soll, ergibt sich die Beziehung

$$L_n/L_m = m^3$$

Für die drei verschiedenen Strömungsformen findet man dann folgende Zusammenhänge zwischen Drehzahlen und Modellmaßstab:

a) laminar, $c = \frac{c_1}{Re}$

$$m^3 = \left(\frac{n_h}{n_m}\right)^2 m^3$$

$$n_h = n_m$$

b) turbulent mit starkem Einfluss der Reibung, $c = \frac{c_2}{\sqrt[4]{Re}}$

$$m^3 = m^{9/2} \left(\frac{n_h}{n_m}\right)^{11/4}$$

$$n_h = n_m \left(\frac{1}{m}\right)^{6/11}$$

} Gl. 39

c) turbulent mit geringem Einfluss der Reibung, $c = \text{konst.}$

$$m^3 = m^5 \left(\frac{n_h}{n_m}\right)^3 \quad \text{oder}$$

$$n_h = n_m \left(\frac{1}{m}\right)^{2/3}$$

H a i l e r berechnete die Drehzahl der Grossausführung unter der Annahme der Gültigkeit des F r o u d e'schen Modellgesetzes, d.h. er legte die Beziehung

$$n_h = n_m \left(\frac{1}{m}\right)^{1/2} \quad \dots \text{Gl. 40}$$

zugrunde. Nun gilt für alle Werte $m > 1$ die Beziehung

$$\left(\frac{1}{m}\right)^{2/3} < \left(\frac{1}{m}\right)^{6/11} < \left(\frac{1}{m}\right)^{1/2} < 1.$$

Dies besagt, dass im Gebiet der turbulenten Strömung eine Ermittlung der Drehzahlen nach Gl. 40 immer höhere Werte liefert +), als sie notwendig wären, um die Bedingung zu erfüllen

+) Richtige Werte würden sich dann ergeben, wenn der Beiwert c der dritten Wurzel aus der R e y n o l d s'schen Zahl verhältnissgleich wäre.

len, dass in Modell und Grossausführung derselbe Leistungsbeitrag auf die Volumeneinheit des Rührgutes entfällt. Anders ist es dagegen im laminaren Gebiet ($Re < 60$). Eine Umrechnung nach Gl. 40 liefert zu niedrige Drehzahlen.

Die obenstehenden Ableitungen geben eine Erklärung dafür, warum bei dünnen Flüssigkeiten eine Bestimmung der Drehzahlen unter Annahme der Gültigkeit des F r o u d e'schen Gesetzes hinsichtlich der Rührwirkung nie zu einem Fehlschlag führte, während sie bei dicken Produkten nicht selten eine nachträgliche Erhöhung der Umlaufgeschwindigkeit machte.

f) Die Normung der Drehzahlen und Motorstärken.

Im Verlauf der letzten Jahre wurden innerhalb der I.G. zahlreiche Rührwerke mit Einzelantrieb neu aufgestellt bzw. ältere, an Transmissionen hängende Apparate mit diesem Antrieb versehen. Da zu Beginn dieser Umstellungen noch keine Erfahrung über die am zweckmässigsten zu wählenden Untersetzungsgetriebe vorlag, haben eine grosse Anzahl der verschiedensten Typen Eingang gefunden (Hartmann, Wülfel, Cyklo, Höchst, Renk, Axien, u.s.w.). Einer Möglichkeit zur Aenderung der Drehzahl wurde nötigenfalls entweder durch Verwendung polumschaltbarer Motoren bzw. durch Benützung des Höchster- oder Axien-Antriebes Rechnung getragen.

Allmählich ergeben sich jedoch bei Umstellungen hinsichtlich Drehzahl und Leistung, die durch Aenderung der Fabrikationen notwendig wurden, wie auch bei der Auswechslung von Getrieben oder Motoren zu deren Instandsetzung immer grössere Schwierigkeiten, die durch die augenblicklich beste-

henden langen Lieferfristen noch verstärkt werden. Die grosse Zahl von Getriebetypen mit den verschiedensten Drehzahlverhältnissen, sowie die hinsichtlich Drehzahl und Bauweise verschiedenen Motoren machen eine ausreichende Ersatzteilhaltung unmöglich und die wünschenswerte gegenseitige Auswechselbarkeit ist praktisch meist nie zu verwirklichen.

Aus diesen Gründen wurden vom Normenbüro Lu in Zusammenarbeit mit der Versuchsgruppe Lu Richtlinien zur Vereinheitlichung der Einzelantriebe entwickelt; mit der Cyklo G.m.b.H., München, wurde auch bereits schon ein Abkommen über die zukünftigen Vereinfachungen getroffen. Hierfür wurden folgende Richtlinien zugrundegelegt:

- 1.) Zum Antrieb werden nur Motoren von ~ 1000 U/min. verwendet, um die Möglichkeit zu einer Steigerung der Drehzahl durch Aufsetzen von Motoren mit 1500 U/min. offen zu lassen. Die Zahl der zur Verwendung zugelassenen Motorgrössen wird beschränkt.
- 2.) Die Rührerdrehzahlen werden festgelegt; von der Norm soll nur in Ausnahmefällen abgegangen werden.
- 3.) Die Rührwerksböcke werden genormt, nach Möglichkeit sollen für alle Gefässgrössen nur drei Typen Verwendung finden.
- 4.) Die Getriebe werden auf dem Bock unter Zwischenschaltung eines einfachen Paßstückes befestigt, damit sie nötigenfalls gegen die nächstgrösseren oder -kleineren Getriebe ohne Aenderung des Bockes und der relativen Lage der Wellenenden ausgewechselt werden können.
- 5.) Die Firmen, mit denen ein Normungsabkommen getroffen wird

sind verpflichtet, Ersatzteile auf Lager zu halten; ebenso müssen jene Getriebeteile vorrätig sein, die zu einer Drehzahländerung der genannten Typen innerhalb der aus baulichen Gründen gegebenen Grenzen dienen können.

Die Auswirkung einer derartigen Normung auf die Bemessung der Rührwerksantriebe soll am Beispiel der mit der Cyklo-G.m.b.H. getroffenen Abmachung gezeigt werden. Mit dieser Firma wurde vereinbart, dass in Zukunft nach Möglichkeit nur noch folgende Wellendrehzahlen Verwendung finden sollen:

16, 20, 26, 37, 54, 85 U/min

Die Motorstärken wurden wie folgt festgelegt:

0,9, 1,4, 2,2, 3,0, 5,0, 6,5, 10,5, 15, 21 KW.

Damit können zunächst die Drehzahlen von Blattrührern in Abhängigkeit vom Gefässdurchmesser festgelegt werden.

Aus den zahlreichen Modellversuchen in den Gefässen von 335 mm \varnothing ergab sich, dass bei turbulenter Strömung eine Drehzahl von 120 U/min. eine sehr gute Rührwirkung ergibt. Die halbe Drehzahl liefert eine Durchmischung, wie sie zu wählen ist, wenn in dem Behälter eine merkliche Bewegung aufrecht erhalten werden soll, ohne dass aber an die Wirkung allzugrosse Ansprüche gestellt werden (schwaches Rühren). Eine Drehzahl von 90 U/min. entspricht einer mittleren Rührleistung.

Diese für Gefässe von 335 mm \varnothing geltenden Drehzahlen wurden nach den durch die Gl. 39b und c gegebenen Potenzbeziehungen auf verschiedene Durchmesser umgerechnet. Aus Abb. 99 ist zu entnehmen, mit welcher Geschwindigkeit Blattrührer zur Erreichung schwacher, mittlerer oder starker Rührwirkung je

Drehzahlen von Blattrührern für verschieden große Gefäße

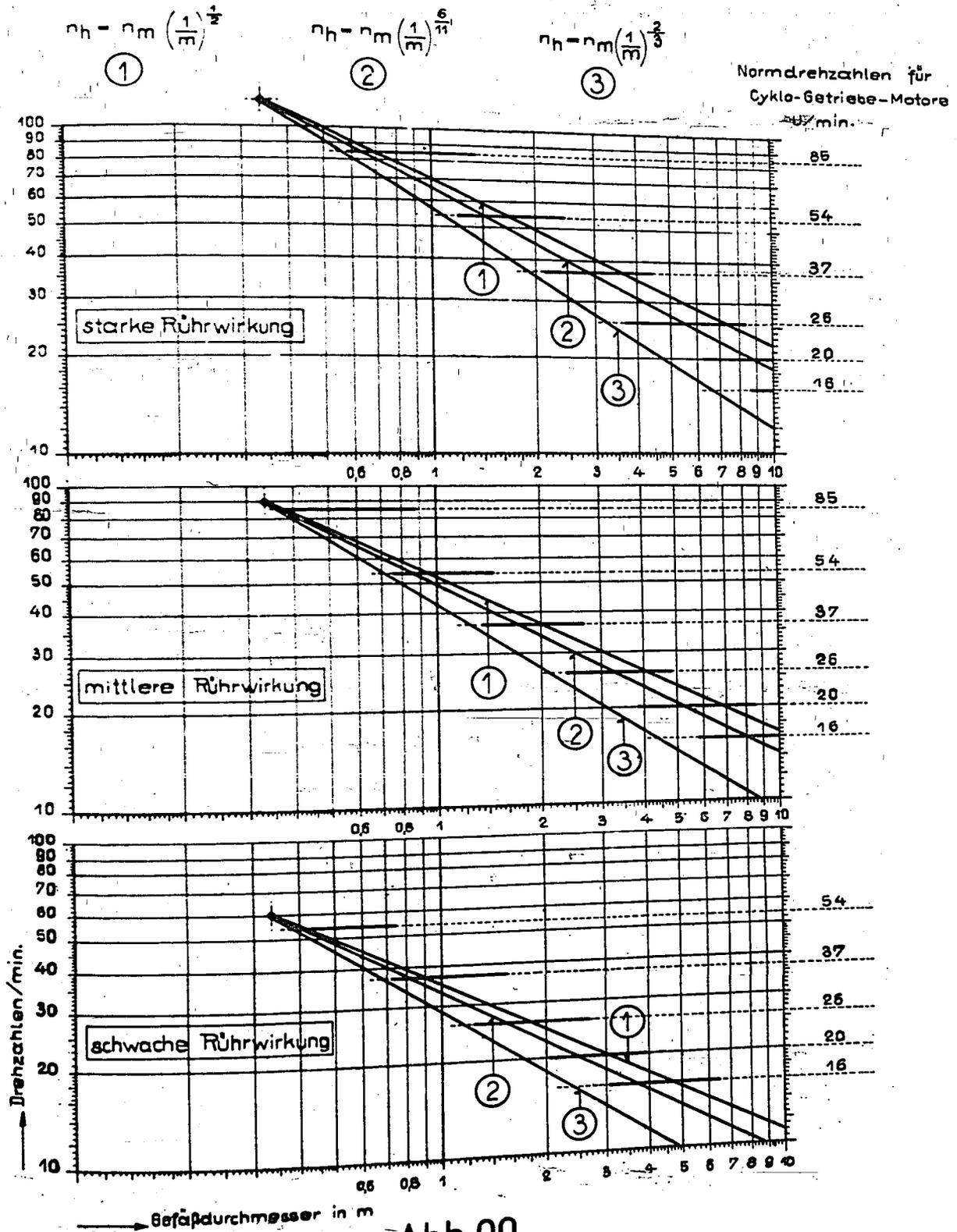


Abb.99.

nach der Gefässgrösse anzutreiben sind. Hierbei entsprechen die Linien I und II jeweils dem Strömungszustand mit konstantem, bzw. dem der vierten Wurzel aus der Reynolds'schen Zahl umgekehrt verhältnismässigen Beiwert. Die Linien III zeigen den sich aus dem von H a i l e r verwendeten Umrechnungsverfahren nach F r o u d e ergebenden Verlauf der Drehzahlen.

Eine Beschränkung auf verhältnismässig wenige, festgelegte Normdrehzahlen muss naturgemäss zu einer gewissen Verwischung der durch die verschiedenen hydrodynamischen Strömungszustände bedingten Unterschiede zwischen den Kurven I und II führen. Dies ist als Beispiel eingetragen (waagrechten) Linien für die ^{der} Uebereinkunft mit der Cyklo-G.m.b.H. entsprechenden Drehzahlen zu ersehen. Um hierin wenigstens einen angenäherten Ausgleich zu schaffen, erscheint es zweckmässig zu sein, in dem an den Grenzen der Abstufungen liegenden Bereich der Gefässdurchmesser die Wahl zwischen zwei Drehzahlen offen zu lassen. Die Entscheidung für den höheren oder niedrigeren Wert ergibt sich aus der Art der Strömungsform (Gültigkeit von Linie I oder II) und der gewünschten Stärke der Rührwirkung. Bei der Verarbeitung höherviskoser Stoffe und dem Wunsch nach guter Durchmischung wird man sich, wenn keine sonstigen Gründe dagegen sprechen, im Zweifelsfall für die obere Grenzdrehzahl entscheiden.

Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass die sich aus Abb. 99 ergebenden Drehzahlen im laminaren Gebiet keine Gültigkeit besitzen. Dies gilt auch für alle Stoffe, die in ihrem Verhalten stark von dem rein viskoser Flüssigkeiten abweichen.

g) Vorschläge für die Form von Rechentafeln.

Eine Anleitung zur Berechnung von Rührwerken, deren Herausgabe geplant ist, muss in einfacher Form die Richtlinien zur Auswahl der zweckmässigsten Rührerformen, der Betriebsdrehzahl und des Leistungsbedarfes enthalten. Weiterhin wären ihr die Unterlagen zur Ermittlung der beim Rühren auftretenden Spiegelerhöhungen, sowie Tafeln zur Bestimmung der Stopfbüchsenreibung und zur Berechnung der 3. und 4. Potenzen beizufügen.

Hinsichtlich des Verwendungsbereiches der in Kap. II vorgeschlagenen Rührerformen, die in Zukunft, von Sonderfällen abgesehen, hauptsächlich benützt werden sollen, liegen so viel Erfahrungen vor, dass ein Schema zu ihrer Auswahl fertiggestellt werden kann. Anders ist es dagegen mit Vorschriften für die Wahl der Drehzahlen. Wenn auch hierüber bereits für die gebräuchlichsten Formen Unterlagen bestehen, bedarf dieses Gebiet in einigen Punkten noch einer Ergänzung durch Versuche. Darüber hinausgehend wäre es aber dringend notwendig, für die gebräuchlichsten Getriebe die Normdrehzahlen für die ganze I.G. einheitlich festzulegen, da dies sowohl für die Tafeln zur Ermittlung des Leistungsbedarfes eine ausserordentliche Erleichterung bedeutet, wie auch hinsichtlich der Auswechselbarkeit und Reparaturen nur Vorteile bringen kann.

Es ist auf alle Fälle geplant, der "Anleitung" die Tafeln beizufügen, auf denen der Zusammenhang zwischen Reynolds'scher Zahl und dem Beiwert hervorgeht, mit deren Hilfe es möglich ist, die reine Wellenleistung im glatten Gefäss für beliebige Drehzahlen zu bestimmen, aus den

dann die erforderliche Motorstärke in der beschriebenen Weise ermittelt werden kann. Diese Art der Leistungsermittlung dürfte jedoch für die praktische Handhabung immer zu unständiglich sein. Ausserdem besteht bei ihrer Verwendung für alle Benützer, die sich nicht oft damit befassen, die Gefahr einer Fehlrechnung. Aus diesen Gründen wird deshalb für jede Rühreranordnung eine tabellarische Zusammenfassung der Beziehungen zwischen Durchmesser, Füllhöhe, spez. Gewicht, Viskosität, Drehzahl und Motorstärke empfohlen. Dies ist jedoch nur möglich, wenn eine Drehzahlnormung vorgenommen worden ist. Als Beispiel hierzu werden im nachfolgenden Abschnitt IV 3 h die Rechenverfahren für die Aufstellung derartiger Tafeln anhand der für den Blattührer geltenden Gesetzmässigkeiten beschrieben.

Rein äusserlich muss die "Anleitung zur Berechnung von Rührwerken" in Form von einzelnen Textblättern und Tafeln, die in einem Ordner vereinigt sind, herausgegeben werden, um die Möglichkeit für das Einfügen von Ergänzungen offen zu lassen.

h) Die Aufstellung von Motorentabellen am Beispiel des Blattührers.

Die Auswertung der Modellversuche, wie auch ihr Vergleich mit ausgeführten Grossapparaten zeigt, dass es tatsächlich möglich ist, Tabellen aufzustellen, aus denen wenigstens für die gebräuchlichsten Rührwerksantriebe ohne jegliche Rechnung unmittelbar die Stärke der zum Einzelantrieb erforderlichen Motoren entnommen werden kann. Nachstehend sei der Gang zur Aufstellung derartiger Tafeln für den Blattührer wiedergegeben. Sie stellen Vorschläge für die Form

dar, wie später in der "Anleitung" jeder der gebräuchlichen Rührer behandelt werden soll.

Eine tabellarische Wiedergabe einer aus vielen unabhängigen Veränderlichen zusammengesetzten Funktion, wie sie die Gl. 20 darstellt, hat eine Wahl nicht zu kleiner Intervalle der Variablen zur Bedingung, wenn ein allzugrosser Umfang vermieden werden soll.

Hinsichtlich des Gefässdurchmessers D schien eine Abstufung von 200 zu 200 mm die richtige zu sein. Dieser entspricht eine Unterteilung des Blattdurchmessers von 100 zu 100 mm. Bei der Füllung genügt vermutlich die Unterteilung in die drei Gruppen mit $\lambda = 0,5, 1,0$ und $1,5$ mit "normalem" Blattrührer, dessen Seitenverhältnis $d:h = 17:15 \sim 0,9$ ist. Der Leistungsverbrauch bei der Füllung $\lambda = 1,0$, jedoch mit zusätzlich erhöhtem Rührblatt, stimmt genügend genau mit jenem von $\lambda = 1,5$, aber normalem Rührblatt überein und braucht daher nicht berücksichtigt zu werden. Lediglich für die Füllung $\lambda = 1,5$ mit einem Rührblatt von dem Seitenverhältnis $d:h = 1:2$ sind die Motorenstärken gesondert anzugeben.

Bezüglich des spezifischen Gewichtes dürfte eine Unterteilung in die Gruppen $\gamma = 1,0, 1,4, 1,8$ kg/l genügen.

Für die dynamische Viskosität können die Intervalle sehr weit gewählt werden, denn die Grösse des Beiwertes hängt beim Blattrührer ~~ungünstigstenfalls~~ nur von ihrer vierten Wurzel ab. Eine grobe Unterteilung in die Gruppe $\eta \leq 10^{-4}$ (gleich oder kleiner als die von Wasser) $10^{-4} \leq \eta \leq 10^{-2}$ (zwischen Wasser und dünnflüssigem Öl) und $10^{-2} \leq \eta \leq 1$ (zwischen dünnem Öl und dickflüssigem Öl) dürfte genügen.

Sie ist unsomehr am Platze, als genauere Angaben über die Beschaffenheit doch oft nicht gemacht werden können. In den Rechentafeln wäre zweckmässigerweise die Zähigkeit einer Reihe bekannter Flüssigkeiten als Beiwert anzuführen und die Umsetzungsfaktoren für das physikalische in das technische Mass-System, sowie der Engler-Grade in das absolute Mass-System aufzunehmen. Die Unterschiede, die sich hinsichtlich der Grösse des Beiwertes bei gleicher dynamischer Viskosität aber bei verschiedenen spezifischen Gewichten ergeben, spielen für die Rechentabellen keine Rolle, da diese auch nur mit der 4. Wurzel eingehen.

In der Abb. 100 ist die Tafel zur Bestimmung der Motorstärken für Gefässe ohne Schlangen mit einem Tauchrohr mit Blattrührern enthalten, wie sie sich unter den oben genannten Bedingungen unter Zugrundelegung des Abkommens mit der Cyklo-G.m.b.H. berechnet. Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass diese Tabelle zunächst lediglich einen Vorschlag darstellen soll und somit vor der Aufnahme in der "Anleitung" noch beliebige Abänderungen erfahren kann.

Die Nummern 0 - 9 bedeuten die einzelnen Normmotorstärken, wie sie beim Einzelantrieb Verwendung finden sollen.

No.	0	(0,5)	KW
	1	0,9	"
	2	1,4	"
	3	2,2	"
	4	3,0	"
	5	5,0	"
	6	6,5	"
	7	10,5	"
	8	15,0	"
	9	21,0	"

D Gefäß- durchmesser m	$\eta \leq 10^{-4}$						$\eta = 10^{-2}$						$\eta = 1,0$					
	$\lambda = 0,5$		$\lambda = 1,0$		$\lambda = 1,5$		$\lambda = 0,5$		$\lambda = 1,0$		$\lambda = 1,5$		$\lambda = 0,5$		$\lambda = 1,0$		$\lambda = 1,5$	
	1,0	1,4	1,8	1,0	1,4	1,8	1,0	1,4	1,8	1,0	1,4	1,8	1,0	1,4	1,8	1,0	1,4	1,8
40	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	3	3	3	4	4	5	5	5
42	1	2	2	3	3	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5
44	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	6	6	6
46	2	3	4	3	4	5	5	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7
48	3	4	4	4	5	5	6	7	7	7	7	7	7	7	7	8	8	8
50	3	4	5	5	5	6	6	7	7	7	7	7	7	7	8	8	8	8
52	4	5	5	6	6	7	7	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9
54	4	5	6	6	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9
56	5	5	6	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9
58	5	6	7	7	7	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
60	5	7	7	7	8	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
62	6	7	7	7	8	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
64	7	7	8	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
66	7	8	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
68	7	8	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
70	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
72	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
74	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
76	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9

Motorentafel für Blattührer

in Gefäßen mit Steigrohren
ohne sonstige Einbauten

$n = 16 U/min.$

- η = Zähigkeit $\frac{kg \cdot sek}{m^2}$
- λ = Füllhöhe
Gefäßdurchmesser
- γ = spez. Gewicht kg/L

D Gefäß- durchmesser m	$\eta \approx 10^{-4}$						$\eta = 10^{-2}$						$\eta = 10$					
	$\lambda = 0,5$		$\lambda = 1,0$		$\lambda = 1,5$		$\lambda = 0,5$		$\lambda = 1,0$		$\lambda = 1,5$		$\lambda = 0,5$		$\lambda = 1,0$		$\lambda = 1,5$	
	10	14	18	10	14	18	10	14	18	10	14	18	10	14	18	10	14	18
30	0	0	1	1	1	2	1	2	2	2	3	3	4	4	5	5	6	7
32	0	1	1	1	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9
34	1	1	2	2	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	9
36	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	9
38	2	2	3	3	4	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	9
40	2	3	4	4	5	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	9	9	9
42	3	4	4	4	5	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	9	9	9
44	3	4	5	5	6	6	6	7	7	8	8	9	9	9	9	9	9	9
46	4	5	5	5	6	6	6	7	7	8	8	9	9	9	9	9	9	9
48	5	5	6	6	7	7	7	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9
50	5	6	7	7	8	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
52	5	6	7	7	8	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
54	6	7	7	7	8	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
56	7	7	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
58	7	8	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
60	7	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
62	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
64	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
66	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9

Motorentafel für Blattührer

in Gefäßen mit Steigrohren
ohne sonstige Einbauten

$n = 20U/min.$

- $\eta =$ Zähigkeit $\frac{kg \cdot sek}{m^2}$
- $\lambda =$ Füllhöhe $\frac{Gefäßdurchmesser}{Gefäßdurchmesser}$
- $\gamma =$ spez. Gewicht kg/l

D Gefäß- durchmesser m	$\eta = 10^{-4}$												$\eta = 10^{-2}$												$\eta = 1,0$											
	$\lambda = 0,5$				$\lambda = 1,0$				$\lambda = 1,5$				$\lambda = 1,0$				$\lambda = 1,5$				$\lambda = 1,0$				$\lambda = 1,5$											
	10	14	18	22	10	14	18	22	10	14	18	22	10	14	18	22	10	14	18	22	10	14	18	22	10	14	18	22	10	14	18	22				
2,6	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1						
2,8	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4						
3,0	1	2	2	3	3	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5						
3,2	2	2	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6						
3,4	2	3	4	4	5	5	5	6	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7						
3,6	3	4	4	5	5	6	6	6	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8						
3,8	3	4	5	5	6	6	6	7	7	7	8	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9						
4,0	4	5	5	6	6	7	7	7	8	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9						
4,2	5	5	6	6	7	7	7	8	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9						
4,4	5	6	7	7	8	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9						
4,6	6	7	7	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9						
4,8	7	7	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9						
5,0	7	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9						
5,2	7	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9						
5,4	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9						
5,6	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9						

Motorentafel für Blattrührer

in Gefäßen mit Steigrohren
ohne sonstige Einbauten

$n = 26U/min.$

$\eta =$ Zähigkeit $\frac{kg \cdot sek}{m^2}$

$\lambda =$ Füllhöhe
Gefäßdurchmesser

$\lambda =$ spez. Gewicht kg/l

D Gefäß- durchmesser m	$\eta \leq 10^{-4}$						$\eta = 10^{-2}$						$\eta = 10$											
	$\lambda = 0,5$		$\lambda = 1,0$		$\lambda = 1,5$		$\lambda = 1,0$		$\lambda = 1,5$		$\lambda = 1,0$		$\lambda = 0,5$		$\lambda = 1,0$		$\lambda = 1,5$		$\lambda = 1,0$		$\lambda = 1,5$			
	1,0	1,4	1,8	1,0	1,4	1,8	1,0	1,4	1,8	1,0	1,4	1,8	1,0	1,4	1,8	1,0	1,4	1,8	1,0	1,4	1,8	1,0	1,4	1,8
1,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Motorentafel für Blattrührer

in Gefäßen mit Steigrohren
ohne sonstige Einbauten

$n = 37 \text{ U/min.}$

$\eta = \text{Zähigkeit } \frac{\text{kgsek}}{\text{m}^2}$

$\lambda = \frac{\text{Füllhöhe}}{\text{Gefäßdurchmesser}}$

$\gamma = \text{spez. Gewicht kg/l}$

D Gefäß- durchmesser m	$\eta \leq 10^{-4}$						$\eta = 10^{-2}$						$\eta = 10^0$					
	$\lambda = 0,5$		$\lambda = 1,0$		$\lambda = 1,5$		$\lambda = 1,0$		$\lambda = 1,5$		$\lambda = 1,8$		$\lambda = 1,0$		$\lambda = 1,5$		$\lambda = 1,8$	
	1,0	1,4	1,8	1,0	1,4	1,8	1,0	1,4	1,8	1,0	1,4	1,8	1,0	1,4	1,8	1,0	1,4	1,8
1,4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	
1,6	0	0	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	
1,8	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	
2,0	1	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5	
2,2	2	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	6	6	6	
2,4	3	4	4	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	7	7	7	
2,6	4	5	5	6	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	8	8	8	
2,8	5	6	6	7	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	9	9	9	
3,0	6	7	7	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9	9	10	10	10	
3,2	7	8	8	9	9	9	9	9	9	10	10	10	10	10	11	11	11	
3,4	8	9	9	10	10	10	10	10	10	11	11	11	11	11	12	12	12	
3,6	9	10	10	11	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	13	13	13	
3,8	9																	

Motorentafel für Blattührer

in Gefäßen mit Steigrohren
ohne sonstige Einbauten

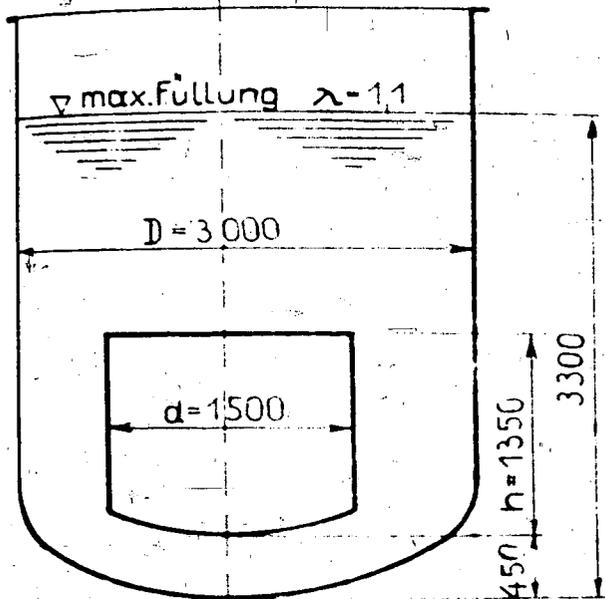
$n = 54 \text{ U/min.}$

$\eta = \text{Zähigkeit } \frac{\text{kg sek}}{\text{m}^2}$

$\lambda = \frac{\text{Füllhöhe}}{\text{Gefäßdurchmesser}}$

$\gamma = \text{spez. Gewicht kg/L}$

196a

Beispiel für die Verwendung der Tafeln.

In einem Kessel mit Kugelboden von 3000 mm \varnothing und 3300 mm grösste Füllhöhe soll eine Flüssigkeit von $\eta = 0,001$ kg sek/m² bei 20° und $\gamma = 0,9$ kg/l mit 5% Schwefelsäure von $\gamma = 1,8$ kg/l unter Verwendung eines Blattrührers vermischt werden. Gesucht wird Rührerabmessung, Drehzahl, Leistungsbedarf.

Aus den Gefässabmessungen $D = 3000$ mm ergibt sich eine Blattbreite von $d = \frac{D}{2} = 1500$ mm, eine Blatthöhe von $h = 0,9 d = 1350$ mm und ein Bodenabstand von

$\sim 0,15 D = 450$ mm. Aus dem Schaubild 99 (S.190) findet man für eine gute Mischwirkung bei $D = 3000$ mm die Normdrehzahl von 37 U/min.

Das Füllungsverhältnis ist $\lambda = \frac{3300}{3000} = 1,1$. Es kann mit Rücksicht auf die Kugelform des Bodens mit $\lambda = 1,0$ gerechnet werden. Da gelegentlich im Winter die Temperatur der Füllung trotz Raumheizung unter 20° sinken kann, ist auf der Rechentafel Abb. 100 (S.196) die Viskositätsgruppe für $\eta = 10^{-2}$ zu verwenden. Mit dem spezifischen Gewicht 1,0 der Mischung ergibt sich daraus ein Motor von No. 5 (5,0 kW).

Der Gang zur Aufstellung dieser λ sei am Beispiel für niederviskose Flüssigkeiten in Gefässen mit Tauchrohr (Abb. 101) dargestellt.

Für die Wellenleistung gilt die Gl. 20

$$L = 7,17 \cdot c \cdot d^4 h n^3 \gamma \cdot 10^{-5}$$

oder

$$L = 7,17 \cdot c \cdot d^5 \frac{h}{d} n^3 \gamma \cdot 10^{-5}.$$

Betrachtet man einen bestimmten Fall mit λ und $\gamma = \text{const.}$, so gilt, da auch $\frac{h}{d} = \text{const.}$ und $c = \text{const.}$

$$L = K \cdot d^5 n^3 \quad \text{oder}$$

$$\log L = \log K + 5 \log d + 3 \log n,$$

worin K eine Konstante ist.

Dies besagt, dass die reine Wellenleistung im doppelt logarithmischen System unter Verwendung der sich aus Abb. 99 ergebenden Zusammenhänge zwischen Durchmesser und Drehzahl über dem Durchmesser als ein System paralleler Geraden dargestellt werden kann. So geben in Abb. 101 die Linien I den Leistungsbedarf für das starke Rühren im glatten Gefäss für $\gamma = 1,0$, $\eta \leq 10^{-4} \text{ kgsec./m}^2$, $\lambda = 1,0$ an. Den Energieverbrauch im rauhen Gefäss mit einem Tauchrohr (Zuschlag $30 + 15 = 45\%$) erhält man durch eine entsprechende Parallelverschiebung aller Linien nach oben (Verlauf b - b).

Der tatsächliche Leistungsbedarf wird gefunden, indem man den Getriebe- und Stopfbüchsenverlust zuzählt. Für die Normdrehzahlen und Norm-Motoren sind die Reibungsleistun-

Ermittlung der Motorstärken für die Rechentafeln

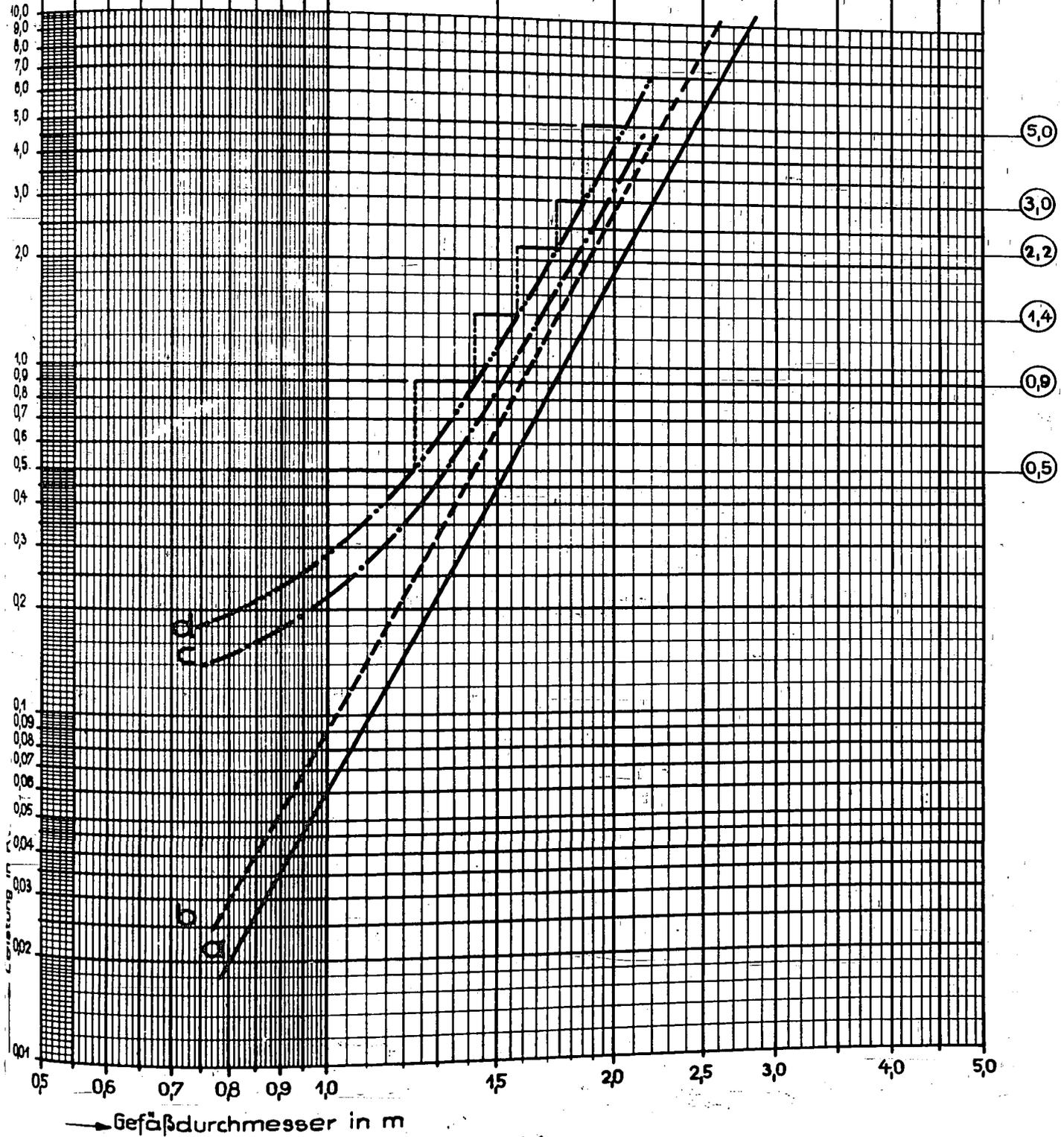


Abb. 101.

gen in kW in der Tabelle (Abb. 101a) wiedergegeben. Bei der Aufstellung der Tabelle wurde ein (mit Sicherheit zu kleiner) Getriebewirkungsgrad von 90% zugrundegelegt. Die Zuschläge für die Stopfbüchsenreibung ergaben sich aus den Gleichungen, die mittels den von Heidebroeck gemessenen Werten aufgestellt wurden.

Die Wellenleistung des Motors ist daher nur zu ermitteln, wenn man sich bereits auf eine bestimmte Motortype festlegt. Zu diesem Zweck wurde festgesetzt, dass die Stärke des Motors immer mindestens 30% über der berechneten Wellenleistung liegen muss. Es wurde also zu den durch die Linien b - b gegebenen, reinen Wellenleistungen aus der Tabelle punktweise fortschreitend die Reibungsverluste jenes Getriebe-Motors zugezählt, der unter Berücksichtigung des Sicherheitszuschlages von 30% zum Antrieb ausreicht. Hierdurch ergeben sich die Kurven c - c, die in Abhängigkeit von dem Durchmesser die tatsächlich erforderliche Wellenleistung des Motors angeben. Eine Parallelverschiebung dieser Kurven um eine dem Sicherheitszuschlag von 30% entsprechende Strecke nach oben ergibt die Kurven d - d, aus denen die tatsächlich vorzusehende Motorstärke hervorgeht. Eine Beschränkung auf die Verwendung einer geringen Anzahl genormter Motortypen muss naturgemäss die Linienschar d - d in eine Reihe von Stufenkurven e - e überführen, und die Beibehaltung einer Mindestsicherheit von 30% führt dazu, dass die tatsächlich benötigte Wellenleistung öfters wesentlich geringer ist, als der vorzusehenden Motorstärke entspricht. Eine Normung der Motoren, Getriebe und Drehzahlen wird also im allgemeinen

Abb. 101a.

Wellendurchmesser u. Reibungsverlust bei Einzelantrieb (Reibungsverlust norm. Stopfbüchsen u. Getriebe)												
Motorstärke	Wellendurchmesser in mm										Reibungsverl.	
	16	20	26	37	54	85	Umdrehungen / Minute					KW
(0,5)	60	60	60	40	40	40	40	40	40	40	40	0,12
0,9	60	60	60	60	40	40	40	40	40	40	40	0,15
1,4	80	80	60	60	60	40	40	40	40	40	40	0,21
2,2	80	80	80	60	60	60	60	60	60	60	60	0,30
3,0	100	100	80	80	60	60	60	60	60	60	60	0,40
5,0	125	100	100	80	80	60	60	60	60	60	60	0,61
6,5	125	125	100	100	80	80	80	80	80	80	80	0,80
10,5	140	140	125	125	100	100	125	100	100	80	80	1,25
15,0	160	160	140	140	125	125	125	125	125	100	100	1,85
21,0	180	160	160	140	160	140	140	140	125	125	100	2,50

gegenüber einer strengeren Anpassung des Motors an den erforderlichen Leistungsbedarf eine gewisse Erhöhung des Preises und eine Verschlechterung der Energieausnutzung zur Folge haben. Dieses wirkt sich jedoch keinesfalls so sehr aus, dass man auf die oben erwähnten, wesentlichen Vorteile einer Normung verzichten sollte. Immerhin erscheint es zweckmässig, in den Tabellen wenigstens grössenordnungsweise zu kennzeichnen, um wieviel die tatsächlich benötigte Wellenleistung kleiner ist, als die vorgesehene Motorleistung. Zu diesem Zweck wurden die die Motorengrösse bedeutenden Ziffern mit einem Kennzeichen versehen, das ein Mass für die Abweichung gibt. Ein Strich unter der Zahl ($\underline{3}$) bedeutet, dass die tatsächlich erforderliche Leistung kleiner als die Hälfte der Wellenleistung des durch sie gegebenen Motors ist, ein Strich über der Zahl ($\overline{3}$) bedeutet, dass die tatsächliche Wellenleistung zwischen $\frac{2}{3}$ und der Hälfte der Motorleistung liegt. Eine Typenzahl ohne Bezeichnung entspricht dem Leistungsbedarf zwischen $\frac{3}{4}$ und $\frac{2}{3}$ der Motorleistung.

Durch die Belastungskennzeichnung gewinnen die Tafeln einen grösseren Verwendungsbereich. Man kann mit ihnen beispielsweise ermitteln, ob die Verwendung von Stopfbüchsen mit grösserer Reibungsleistung noch zulässig ist, ohne dass eine grössere Motortype gewählt werden muss. Weiterhin ermöglichen die angegebenen Belastungsgrenzen eine Interpolation auf die in den Tafeln nicht aufgeführten Zwischenwerte der Gefässdurchmesser, spezifischen Gewichte, Füllhöhen. Ebenso erlauben sie die Beurteilung, ob eine Abweichung von der den Tafeln zugrundegelegten, geometrischen Form der Kessel und Höhe der Füllung (z.B. durch Anbringen von zusätz-

lichen Einleitungsrohren, Verringerung des Bodenabstandes u.s.w.) möglich ist, ohne auf die nächstgrössere Motortype überzugehen. Die Tafeln können auch zur Bestimmung der Motoren für den Gruppenantrieb von Rührwerken dienen.

Zu den obigen Ausführungen werden nachstehend zwei Beispiele gegeben.

No. 1 Für einen Kessel ($n = 54$ U/min.) sei Typenbezeichnung $\bar{4}$, entsprechend dem Motor von 3,0 KW gefunden. Es soll ermittelt werden, ob dieser auch noch ausreicht, wenn der Blattrührer mit dem Bodenabstand $\frac{b}{D} = 0,05$ betrieben wird und noch ein weiteres Tauchrohr erforderlich ist. Die Bezeichnung $\bar{4}$ bedeutet, dass die tatsächlich erforderliche Wellenleistung im Kessel mit dem Bodenabstand $\frac{b}{D} = 0,1$ und einem Tauchrohr höchstensfalls $\frac{2}{3}$ der Motorleistung, d.h. 2,0 KW betragen kann. Nach der Tabelle 101a betragen die Reibungsverluste 0,38 KW. Die reine Rührerleistung ist daher mit maximal 1,62 KW einzusetzen. Die Verringerung des Bodenabstandes bringt nach Abb. 77 eine Erhöhung von rund 10%, das Tauchrohr von 15%. Demnach wird die reine Rührleistung $1,62 \cdot 1,25 = 2,02$ KW betragen. Die gesamte Wellenleistung wird $2,02 + 0,38 = 2,4$ KW. Die Sicherheit beträgt dann $\frac{3,0 - 2,4}{2,4} = 0,25 \sim 25\%$. Obwohl eine Sicherheit von 30%, bezogen auf die erforderliche Wellenleistung als notwendig erachtet wurde, kann man in diesem Fall den Motor von 3 KW noch beibehalten, da als wahrscheinlich anzunehmen ist, dass die tatsächliche Wellenleistung etwas kleiner sein wird

(2/3 ist der Grenzwert!).

No.2. Für 7 Rührgefässe, die von einer Transmission aus angetrieben werden sollen, wurden folgende Bezeichnungen für die Einzelantriebsmotoren gefunden, 3, 3, 3, 4, 4, 5, 6. Gesucht ist die Grösse des erforderlichen Motors. Den Typenbezeichnungen entsprechen die Motore von 2,2 2,2 2,2 3,0 3,0 5,0 6,5 KW Leistung. Den Kennzeichen entsprechend werden die maximal erforderlichen Wellenleistungen

1,65 1,1 1,5 2,0 1,5 3,75 4 = 15,5 KW.

Hierin ist bereits der Transmissionsverlust mit Sicherheit enthalten, denn in der Tafel wurden die Getriebe mit 90% Wirkungsgrad eingesetzt und zudem sind die tatsächlich erforderlichen Leistungen wohl etwa niedriger. Schreibt man für den Gruppenantriebsmotor 20% Sicherheit vor, dann ist eine Stärke von mindestens 18,5 KW zu wählen. Eine Addition der Stärke der Einzelantriebsmotore hätte den zu hohen Leistungsbedarf von 24,1 KW ergeben.

In andersartig gelagerten Fällen ist in sinnvoller Weise zu verfahren.

5.) Die Kurven für die Spiegelverformungen.

Die Kenntnis der sich beim Röhren ausbildenden Form der freien Flüssigkeitsoberfläche ist für die Bemessung der zulässigen Füllhöhe, wie auch u.U. für die Gestaltung von Gefässeinbauten und Anbringung von Ueberlauf-tassen wichtig. So wird man es auch in geschlossenen Kes-

seln nur ausnahmsweise zulassen, dass während des Rührens die Randschichten des Inhaltes dauernd die Trennfuge zwischen Flansch und Deckel benetzen. Einbauten, wie z.B. Schlangen, die zur Uebertragung von Wärme dienen sollen, sind zweckmässigerweise nur so weit nach oben auszudehnen, als sie im Betrieb dauernd von Flüssigkeit umspült werden. Es dürfte daher, wie schon erwähnt wurde, zweckmässig sein, der "Anleitung" auch noch Tafeln beizugeben, aus denen zum mindesten die beim Rühren auftretende, stärkste Erhöhung am Rand entnommen werden kann.

Wie aus dem wiederum als Beispiel verwendeten Fall des Blattrührers zu ersehen ist, lassen sich auch hierbei durch die Modellgesetze verhältnismässig einfache Beziehungen feststellen.

Eine Anwendung des W e b e r 'schen Verfahrens (vgl. S.99) liefert zunächst für die relative Spiegelerhöhung $\frac{h'}{D}$ (h' ist die grösste Erhebung des verformten Spiegels gegenüber der Füllhöhe H)

$$\frac{h'}{D} = f (Re, Fr) \quad \dots \text{Gl. 41}$$

Dies gilt naturgemäss auch wieder nur für Gefässe, die hinsichtlich der Form und der Füllung geometrisch ähnlich sind.

Aus Gl. 41 geht zunächst hervor, dass die Form der Spiegelkurve sowohl durch absolute Grösse des Gefässes, wie auch durch die Geschwindigkeit und die Zähigkeit beeinflusst wird. Wie leicht zu verstehen ist, werden unter sonst gleichen Bedingungen die sich beim Rühren einstellenden Niveaudifferenzen umso geringer werden, je höher die Viskosität der Flüssigkeit ist (vgl. Abb. 9 und 10). Da aber hauptsächlich die an den Gefässwandungen bei bestimmten Drehzahlen auftretenden

höchstmöglichen Erhebungen von Bedeutung sind, können dickflüssige Stoffe von der Betrachtung ausgenommen werden. Die Frage, ob auch noch bei niederviskosen Produkten die innere Reibung auf die sich aus der Hauptsache nach aus einem Gleichgewicht zwischen den Flüssigkeitskräften und den Schwerekräften ergebenden Form der Oberfläche von Einfluss ist, bedurfte einer genaueren Prüfung.

Die Abb. 102 zeigt zunächst die Gestalt der Meridianlinien des Flüssigkeitsspiegels bei verschiedenen Drehzahlen

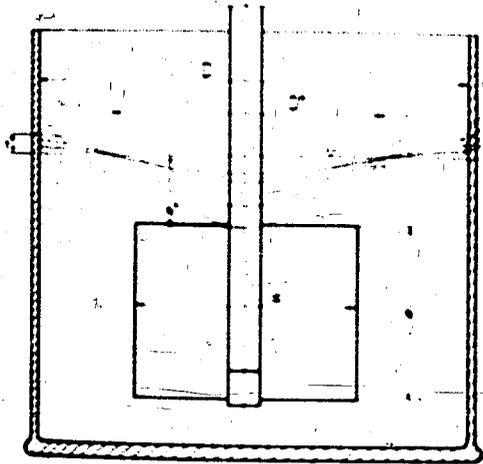


Abb. 102

für das Normalblatt 170 .

150 mm ($\frac{b}{D} = 0,1$) bei einem

Füllungsverhältnis von

$\lambda = 0,6$ für Wasser. Man

ersieht daraus, dass sowohl

die Erhöhung h' am Rand,

wie auch die Absenkung h''

in der Gefäßmitte nicht

in linearem Zusammenhang

mit der Drehzahl stehen:

sie nehmen mit dem Qua-

drat der Drehzahl zu. Be-

merkenswert ist weiter, dass sich alle Spiegelkurven in einem Punkt schneiden, der auf der Oberfläche der ruhenden Flüssigkeit liegt.

Zur genaueren Ermittlung der für die Randerhöhungen geltenden Beziehungen wurde für Gefäße von 335, 635 und 1400 mm \varnothing die Form der Spiegelkurve für Wasser in Abhängigkeit von der Drehzahl bestimmt. Dabei fand sowohl das Normalblatt, wie auch ein nach oben herausragendes Blatt Verwendung. In Abb.

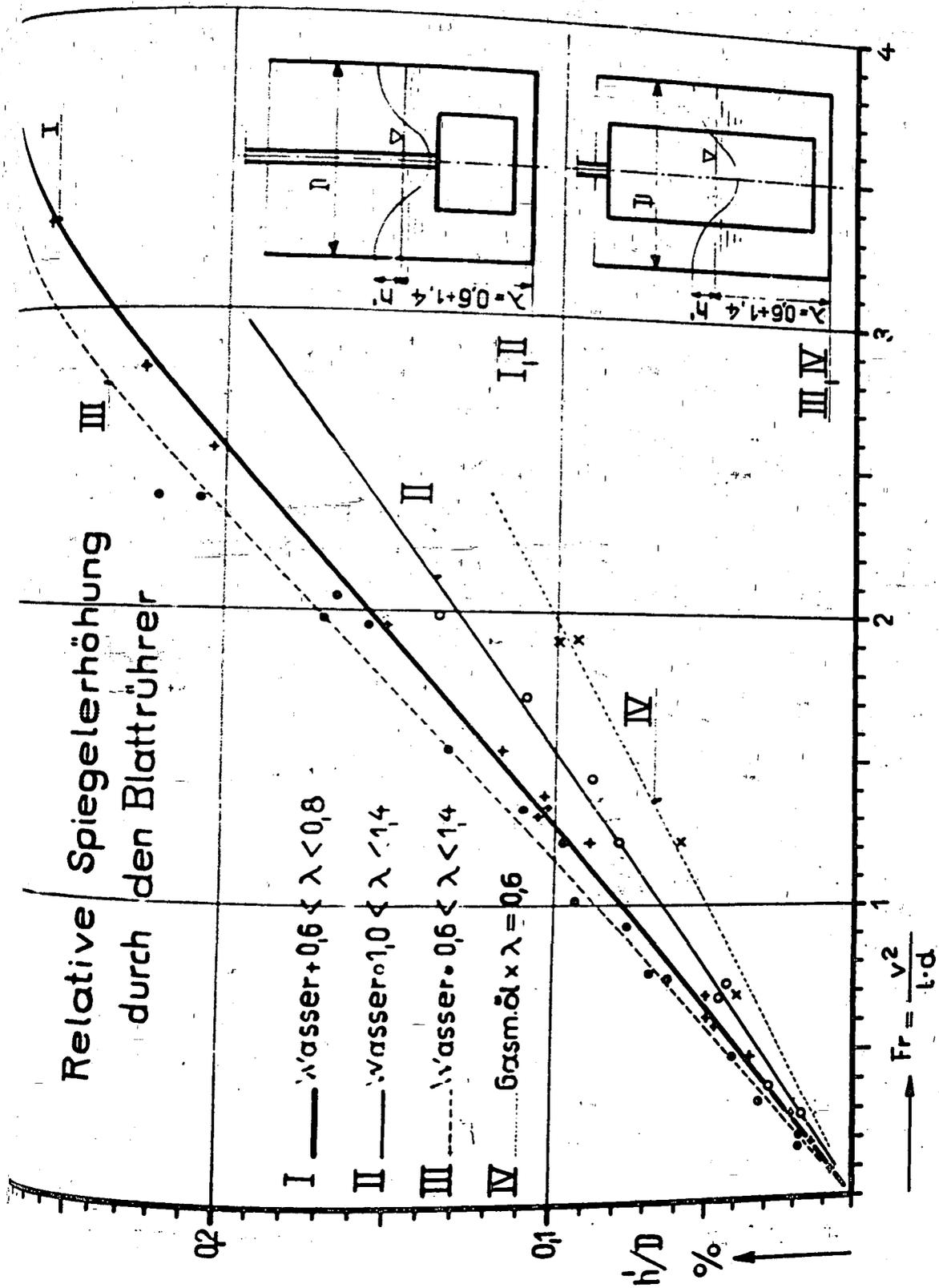


Abb. 103.

103 sind die relativen Spiegelerhöhungen am Rand ($\frac{h'}{D}$) über der Froude'schen Zahl dargestellt. Wie man daraus ersehen kann, folgen diese der einfachen Beziehung

$$\frac{h'}{D} = K \cdot Fr = K \frac{v^2}{gd}, \quad \dots \text{Gl. 42}$$

worin K für dünne Flüssigkeiten nur noch eine von den geometrischen Verhältnissen (Füllhöhe, Gefäss- und Rührerform) abhängige Grösse ist.

Die Kurve I gibt die Zusammenhänge für das normale Blatt für $\lambda = 0,6 - 0,8$ wieder. Die Linie II zeigt für $1,0 < \lambda < 1,4$, dass die relative Spiegelerhöhung kleiner wird, sowie die Oberkante des Rührers merklich unter dem ruhenden Spiegel liegt. Im Gegensatz dazu ist die Spiegelerhöhung beim herausragenden Blatt, wie die Kurve III zeigt, für $\lambda > 0,5$ grösser als bei dem Normalblatt, aber praktisch von der Füllhöhe unabhängig. Für den Grenzfall der höchsten Spiegelerhöhung bei herausragendem Blatt kann die Gl. 42 in der Form

$$\frac{h'}{D} = 0,0766 \frac{v^2}{gd}$$

geschrieben werden. Daraus folgt die Beziehung für h' und D in m und n in U/min.

$$h' = 1,07 \cdot 10^{-5} n^2 D^2 \quad \dots \text{Gl. 43}$$

die zur einfachen Ermittlung der absoluten Spiegelerhöhung Verwendung finden kann. Die Benützung der für das herausragende Blatt geltenden Beziehung erscheint deshalb zweckmässig zu sein, weil damit einer gegebenenfalls notwendigen Erhöhung des Blattes bereits Rechnung getragen ist.

Die Kurve IV, die den Verlauf von $\frac{h'}{D}$ für eine Flüssigkeit von etwa der fünfhundertfachen Zähigkeit von Wasser angibt, zeigt den Einfluss der höheren Viskosität.

Für den Durchmesser D'' (Abb.102), der für niederviskose Flüssigkeiten angibt, von welcher Stelle an sich die Spiegelerhöhung in eine Spiegelsenkung verwandelt, gilt

$$D'' = 0,56 D.$$

Dies ist u.U. für die Anordnung von Einbauten von Bedeutung.

Die Gl. 43 stellt die Grösse der mittleren Spiegelerhöhung dar. Sie umfasst also nicht jene zufälligen Schwankungen und Spritzer, die gelegentlich auftreten können. Bei offenen Gefässen muss man diesen durch einen geeigneten Zuschlag zu den durch Abmessungen und Drehzahl bedingten Randerhöhungen Rechnung tragen.

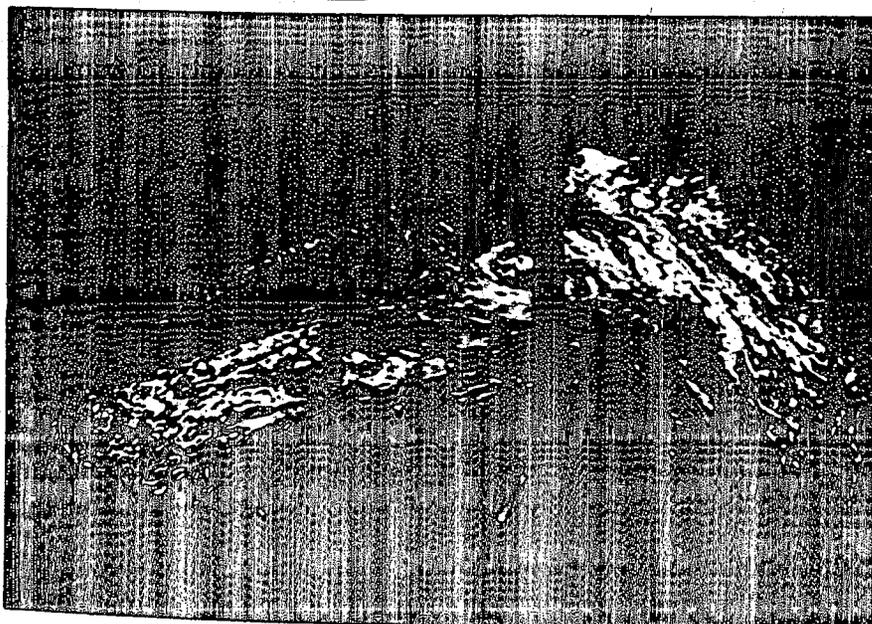


Abb.104.

Es ist noch zu erwähnen, dass gelegentlich wesentlich grössere Spiegelerhöhungen beobachtet wurden, als sich aus Gl. 43 ergibt. Diese machen sich, wie Abb. 104 zeigt, allerdings nicht längs des ganzen Umfanges bemerkbar, sondern sie treten in der Form von ei-

ner oder zwei Wellen auf, die im Gefäss mit grosser Wucht umlaufen. Es wurde gefunden, dass derartige Erscheinungen dieselbe Ursache haben, wie das Auftreten von extrem grossen Bugwellen bei Schiffen, die mit einer bestimmten Geschwindigkeit durch seichte Kanäle fahren: es treten Resonanzerscheinungen zwischen der Eigenschwingungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit und der Bewegungsgeschwindigkeit auf. Dies ergibt sich offenbar dann, wenn die Rührergeschwindigkeit gerade gleich der der Füllhöhe entsprechenden Fallgeschwindigkeit oder deren Hälfte ist. Bei den praktisch verwendeten Rührerdrehzahlen trifft dies jedoch nur bei sehr geringen Standhöhen zu. Immerhin wird man darauf bedacht sein müssen, in grossen Kesseln, die langsam gefüllt oder abgelassen werden, die Einbauten besonders gut zu befestigen. Bei raschlaufenden Rührern wurden gelegentlich auch Schwingungen des Gefässinhaltes beobachtet, die bei grösseren Füllhöhen auftraten und vermutlich auf ähnliche Ursachen zurückzuführen sind.

Ergänzend sei hinzugefügt, dass sich die vorstehenden Betrachtungen in sinngemässer Weise natürlich auf alle anderen Rührerformen übertragen lassen. Insbesondere besitzt die Gl.42 eine allgemeine Gültigkeit, die Konstante muss von Fall zu Fall experimentell ermittelt werden.

6.) Die experimentellen Arbeiten über das Verhalten pastenförmiger Stoffe.

Die vorstehenden Ausführungen über die energetischen Beziehungen beim Rühren rein viskoser Stoffe lassen erkennen, dass die durch die Verschiedenheit der Stoffbeiwerte bedingten

Zusammenhänge gegenüber der durch die Vielheit der geometrischen Veränderlichen gegebenen Mannigfaltigkeit zurücktreten. Bei den pastenartigen Stoffen erfährt dies eine Aenderung: das Verhalten beim Strömen ist nicht nur durch zwei Konstanten (spez. Gewicht, Viskosität) gegeben, sondern wird durch eine grössere Anzahl von Stoffbeiwerten bestimmt.

Wie schon erwähnt wurde, folgen viele der technisch verarbeiteten Pasten dem Ansatz nach Gl. 21, d.h. ausser dem der Viskosität ähnlichen Gleitmodul (η') ist auch noch eine Fließspannung (τ) für das hydrodynamische Verhalten massgebend. Bei der Feststellung der Beziehungen zwischen dem Leistungsbedarf zum Rühren solcher Stoffe und ihren Konstanten ergeben sich infolgedessen wesentlich verwickeltere Zusammenhänge. Wie für die rein viskosen Flüssigkeiten nachgewiesen wurde, kann der Beiwert mit genügender Genauigkeit als Funktion einer einzigen Kenngrösse, der R e y n o l d s'schen Zahl aufgefasst werden. Dies trifft für Stoffe, die dem Ansatz nach Gl. 21 folgen, im allgemeinen nicht mehr zu. Der Beiwert ist eine Funktion der Grössen $\frac{v \cdot l}{\nu}$ und $\frac{\tau \cdot l}{\eta' v}$. Lediglich in Grenzfällen kann mit einer für den praktischen Gebrauch ausreichenden Genauigkeit angenommen werden, dass der Widerstandsbeiwert nur von einer dieser dimensionslosen Kennziffern allein abhängt. Aus ihrer Form lässt sich folgern, dass die erste besonders dann von Einfluss sein wird, wenn die Geschwindigkeit gross ist und der Gleitmodul, sowie die Fließfestigkeit klein sind, während die zweite mehr in Erscheinung tritt, wenn die Fließfestigkeit gross und die Geschwindigkeiten klein sind. Hierfür gibt Abb. 105 ein Beispiel. Die Kurve I zeigt den Verlauf des Drehmomentes beim

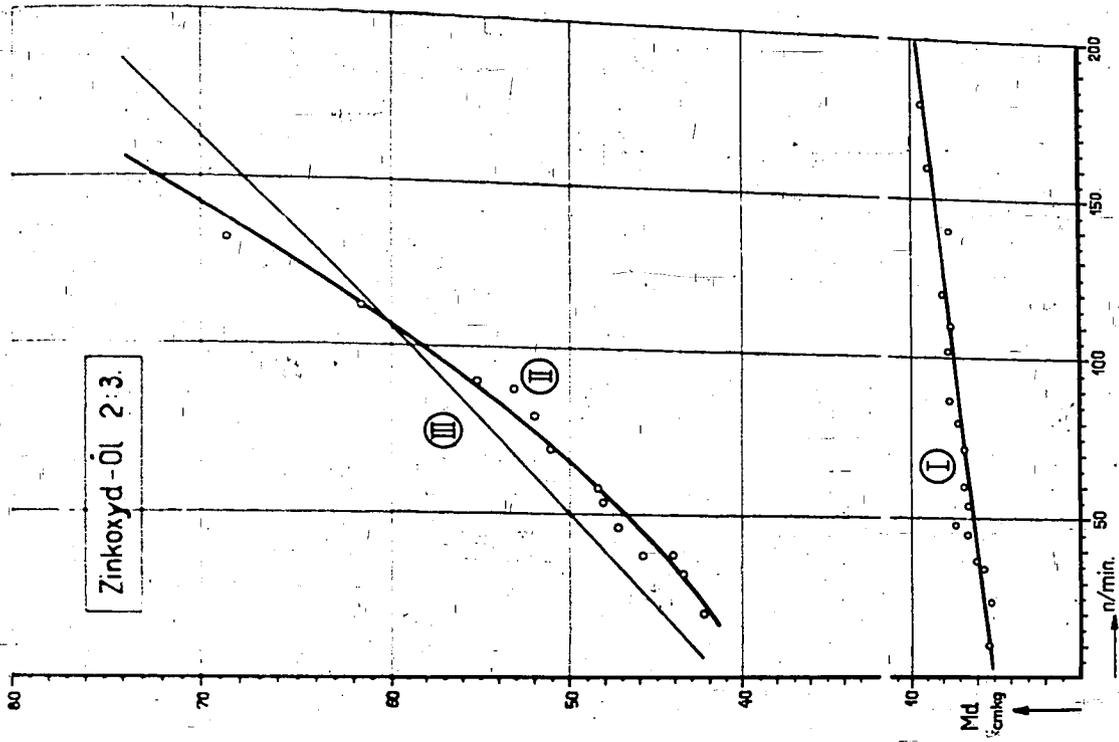


Abb. 106.

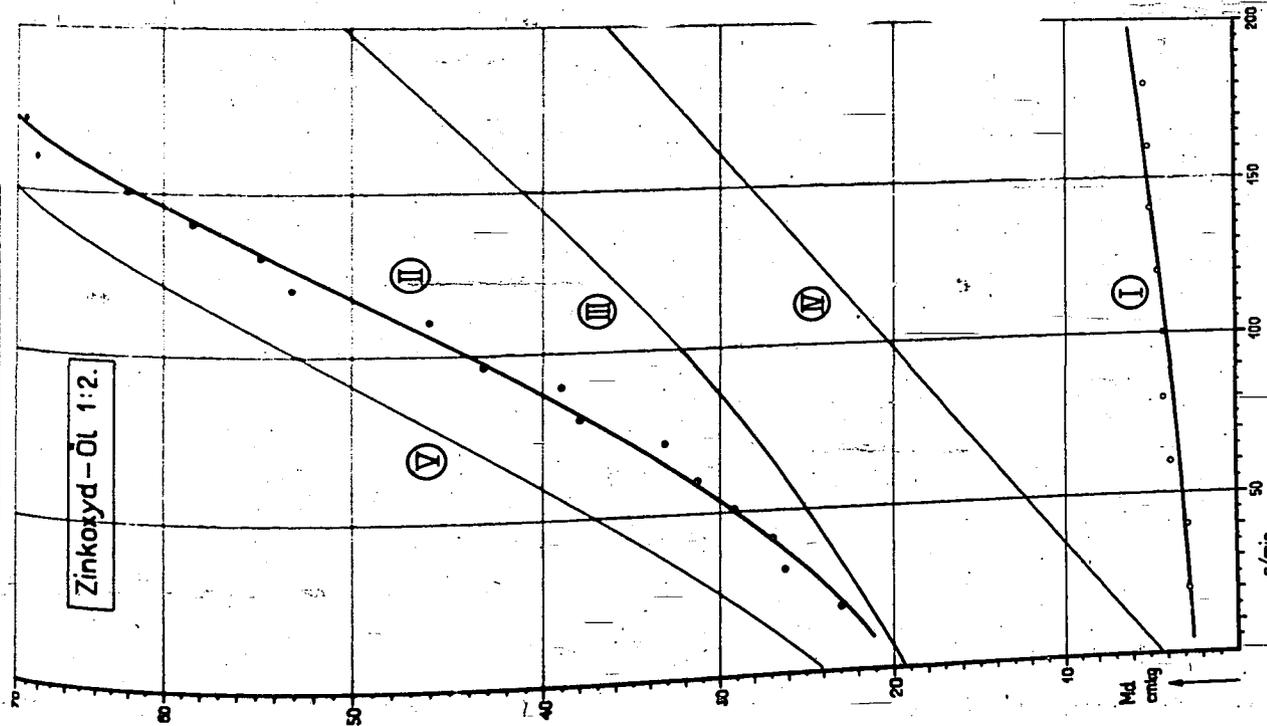


Abb. 105.

Rühren einer Zinkoxyd-Oel-Paste (Mischungsverhältnis 1:2) in einem Gefäss von 250 mm \varnothing als Funktion der Drehzahl. Die Kurve II gibt dasselbe für ein Gefäss von 500 mm \varnothing wieder. Die Kurven III und IV zeigen die aus Kurve I berechneten Verläufe, wobei zugrunde gelegt wurde, dass der Beiwert entweder nur eine Funktion der Kenngrösse $\frac{\tau l}{\eta' v}$ (III) oder nur von $\frac{v l}{\nu}$ (IV) ist. Man kann daraus ersehen, dass die Rechnung über die Kenngrösse $\frac{\tau l}{\eta' v}$ lediglich im Bereich kleiner Drehzahlen richtige Werte liefert; bei grösseren Anfangsgeschwindigkeiten ergeben sich Abweichungen nach unten. Die Kurve, die mit der Reynolds'schen Zahl ermittelt wurde, ist überhaupt zu niedrig. Man kann mit einer gewissen Berechtigung aus der additiven Form der Gl. 21 folgern, dass das Drehmoment der Grossausführung wenigstens angenähert der Summe der beiden aus der Modellkurve mittels der zwei Kenngrössen berechneten Einzelmomente gleich sein muss. Die Kurve V der Abb. 105 zeigt den so ermittelten Verlauf. Soweit bisher festgestellt werden konnte, gibt diese Art der Berechnung für die Drehmomente immer etwas zu hohe Werte.

Wählt man jedoch für diese Versuche eine Paste grösserer Konsistenz (z.B. Mischungsverhältnis 2:3), so ist der Beiwert in weitem Bereich nur eine Funktion der neu gefundenen Kenngrösse $\frac{\tau l'}{\eta' v}$ für plastische Stoffe (s. Gl. 30 und S. 116). Die Abb. 106 liefert hierfür den Nachweis: Kurve I und II zeigen die gemessenen Drehmomente in den Gefässen von 250 bzw. 500 mm \varnothing und die Kurve III gibt den berechneten Verlauf. Erst bei hohen Drehzahlen werden die theoretisch ermittelten Werte etwas zu niedrig, da nunmehr die Massenkräfte merklich in Erscheinung treten. Die Abb. 106 gibt im übrigen die experimentelle Bestätigung.

gung des neu aufgestellten Modellgesetzes für plastische Stoffe, die dem B u c k i n g h a m'schen Ansatz (Gl. 21) gehorchen.

Aus den bisherigen Versuchen über die energetischen Verhältnisse beim Rühren plastischer Stoffe kann bezüglich der Berechnung des Leistungsbedarfes aus Modellversuchen folgendes ausgesagt werden:

- a) Produkte geringer Steifigkeit gehorchen noch genügend genau dem R e y n o l d s'schen Modellgesetz; der Leistungsbedarf kann also unter Annahme dessen alleiniger Gültigkeit berechnet werden. Dies trifft besonders für die raschlaufenden Schnellrührer zu.
- b) Für Stoffe grosser Konsistenz ist die alleinige Abhängigkeit des Beiwertes von der neugefundenen Kennzahl $\frac{\tau \cdot l}{\eta \cdot v}$ erwiesen. Bei geringer Verformungsgeschwindigkeit (Kneter, Fünffingerührer) hat dieses Modellgesetz auch bei kleinerer Steifigkeit noch Gültigkeit.
- c) Bei Stoffen mittlerer Steifigkeit liegt das zum Rühren erforderliche Drehmoment aller Wahrscheinlichkeit nach zwischen dem Wert, der sich aus der Kennzahl $\frac{\tau \cdot l}{\eta \cdot v}$ allein ergibt, und jenem, der durch Summierung dieses so ermittelten und desjenigen Drehmomentes ergibt, das die Rechnung unter Zugrundelegung der Gültigkeit des R e y n o l d s'schen Ähnlichkeitsgesetzes liefert.

Wie schon früher erwähnt wurde, erübrigt die Durchführung von Modellversuchen mit demselben Stoff, der in der Hauptausführung verarbeitet werden soll, die Messung der Stoffbeiwerte. Die Form der Kurven lässt im allgemeinen leicht erkennen, welche Art der Rechnung für die Bemessung der Motoren der Grossausführung zu wählen ist. Damit schliesst sich aber

nicht die Notwendigkeit zu einer experimentellen Erfassung der Fließbeiwerte von Pasten aus; sie ist für die Erforschung des mechanischen Verhaltens derartiger, für die chemische Industrie wichtiger Produkte sehr wesentlich. Dies gilt umsomehr, da bisher kaum Stoffkonstanten, die die hydrodynamischen Eigenschaften plastischer Produkte exakt wiedergeben, zu deren Kennzeichnung gebräuchlich sind. Eine genaue Verfolgung der technologischen Prozesse, die zur Verarbeitung pastenförmiger Stoffe Verwendung finden, wie auch eine Weiterentwicklung dieser Verfahren bzw. das Schaffen neuer Wege wird sehr erleichtert werden, wenn man von den bisher üblichen, empirischen Methoden zur Messung der Stoffeigenschaften abgeht und sie durch theoretisch einwandfreie ersetzt ⁺). Da hierüber bis jetzt nur sehr wenig bekannt ist, sei noch kurz auf einige derartige Verfahren eingegangen:

- 1.) In den meisten Fällen ist die Messung der aus einer Kapillare unter der Wirkung verschieden grosser Differenzdrucke ausgetriebenen Menge ein genügend einfaches Verfahren, um die grundsätzliche Art des Fließverhaltens, wie auch der Stoffbeiwerte, soweit sie auf die in diesem Bericht betrachteten Vorgänge von Einfluss sind, feststellen zu können. Hierbei muss aber vorausgesetzt werden, dass während des Strömens durch die Kapillare keine Entmischung in dem plastischen Stoff eintritt und dass gegebenenfalls darin enthaltene Feststoffkörner klein gegen den Rohrquerschnitt sind. Dieses Verfahren ist zu Absolutmessungen der Beiwerte geeignet.

Ein Schema des Ludwigshafener Pastenviskosimeters ist in

⁺) Eingehende Untersuchungen über das Fließverhalten und die elastischen Eigenschaften von Suspensionen werden z. Z. von Dr. P a t a t , Höchst durchgeführt.

Abb. 107 wiedergegeben; die Arbeitsweise ist aus der Beschriftung zu ersehen. Die Art der Auswertung der Ergebnisse

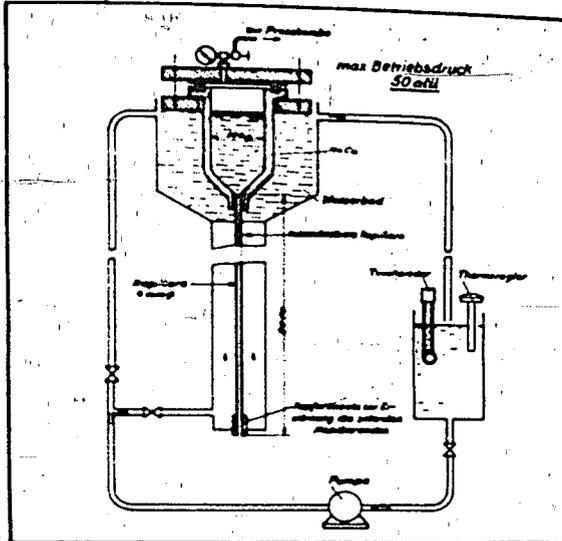


Abb. 107

geht aus der Gl. 23 (S.98) hervor. Als Beispiel für die Ergebnisse der Messungen mit diesem Gerät sind in Abb. 108 die Fließspannung und der Gleitmodul einer Zinkoxyd-Oel-Paste als Funktion der Temperatur dargestellt. Dieses Schau-

bild verdeutlicht durch den gänzlich verschiedenartigen Verlauf der beiden Kurven die Tatsache, dass es

nicht möglich ist, die Stoffeigenschaften eines derartigen Produktes, wie es vielfach üblich ist, durch Angabe einer einzigen Zahl zu kennzeichnen.

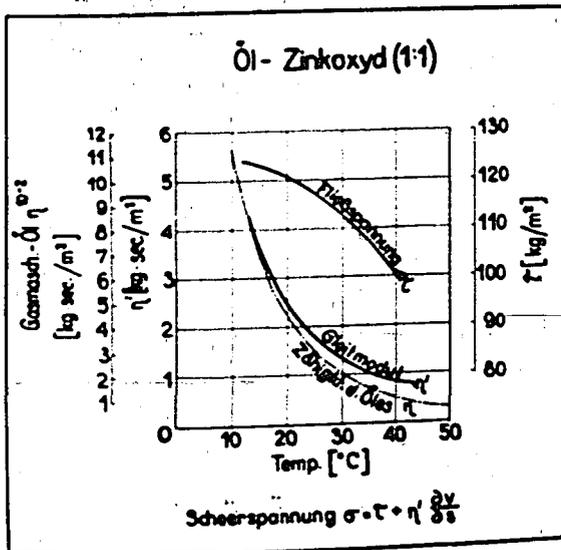


Abb. 108

2.) Ein weiteres Gerät, das grundsätzlich zur Messung der Eigen-

schaften von Pasten Verwendung finden kann, ist der Farinograph von Brabender, Duisburg. Er besteht aus einem Kneiter, der durch einen Pendelmotor angetrieben ist und

dessen Drehmoment durch ein Schreibwerk aufgezeichnet wird

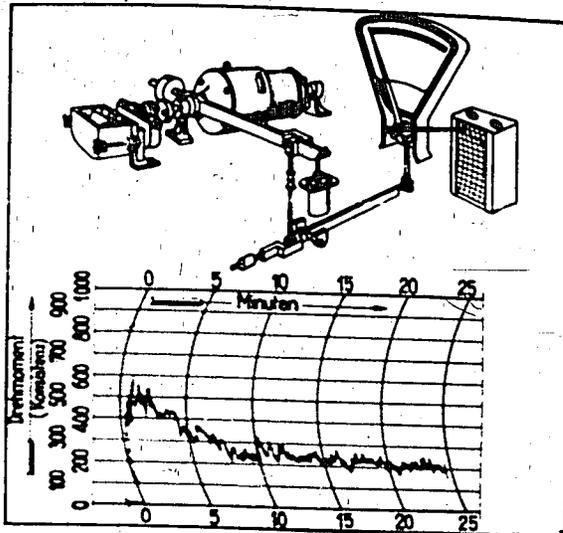


Abb. 109

der Beiwerte unter der Einwirkung einer dauernden Verformung (Gefügezerstörung) festgestellt werden kann.

3.) Ein weiterer Apparat, der sich für diese Zwecke eignet, ist

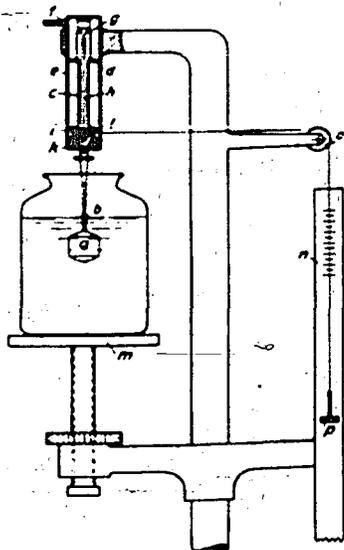


Abb. 110.

das Viskosimeter von K E m p f (I.G. Bobingen). Es besteht (Abb. 110) aus einem Drehkörper a, der in der zu untersuchenden Paste rotiert und durch ein beliebig wählbares Fallgewicht p über die Rolle o angetrieben wird. Die Welle wird oben mit einer Spitze h in einer Pfanne i gelagert, gegen die sich der Drehkörper durch einen bei f angesaugten Luftstrom hebt und abstützt. Gemessen wird die

Absinkgeschwindigkeit des Fallgewichtes an der Skala n. Das

Gerät findet bereits mit bestem Erfolg für die Messung an dickflüssigen, rein viskosen Stoffen Verwendung. Solange keine Turbulenz auftritt, besteht Proportionalität zwischen Belastungsgewicht und Fallgeschwindigkeit (Kurve I, Abb. 111).

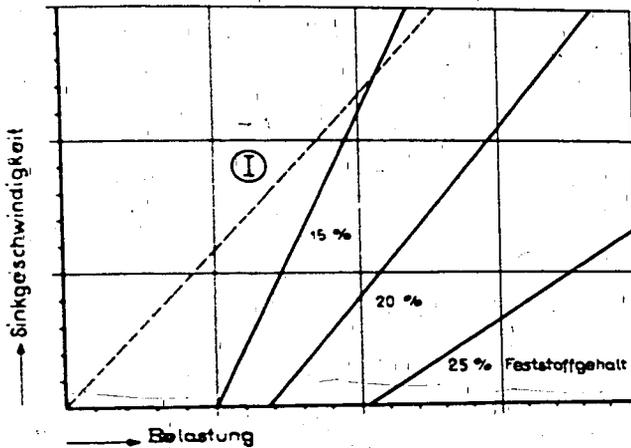


Abb. 111.

Das Verhalten von (plastischen) Suspensionen verschiedenen Feststoffgehaltes zeigen die weiteren Kurven dieses Schaubildes. Die Abszisse zeigt das Belastungsgewicht und die Ordinate den rezi-

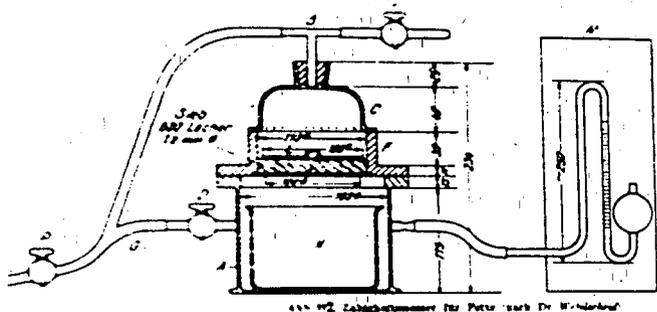
proken Wert der Fallzeit, d.h. ein der Drehgeschwindigkeit verhältnismässiges Mass. Der Theorie entsprechend dürfen die Punkte unmittelbar durch gerade Linien ausgeglichen werden +). Die Abszissenabschnitte sind der Fließfestigkeit proportional, während der Gleitmodul der Grösse des Steigungsmasses umgekehrt verhältnismässig ist.

Soweit es bis jetzt beurteilt werden kann, eignet sich das K ä m p f'sche Viskosimeter nicht für Pasten grösserer Konsistenz, da bei solchen entweder eine teilweise Ablösung an der Wand des Drehkörpers auftritt oder aber u.U. dort eine Flüssigkeitsausscheidung stattfindet. Rein viskose Produkte hoher Zähigkeit zeigen im Gegensatz dazu keinerlei

+) Vgl. hierzu Fussnote 1 auf S. 94.

Ablösung, so dass das Gerät gerade für derartige Stoffe ein einfaches und bequem zu handhabendes Messinstrument darstellt +).

4.) Eine Versuchseinrichtung, mit der wahrscheinlich die Eigen-



schaften plasti-
scher Stoffe eben-
falls messtech-
nisch erfasst
werden können,
wurde neuerdings
von W e f e l -
s c h e i d ++)

(Reichsbahnver-

suchsanstalt Göttingen) angegeben. Bei ihr wird (Abb.112) der Durchfluss der Paste durch eine Siebplatte verfolgt. Der zu untersuchende Stoff wird in den etwa 30-mm hohen, zylindrischen Raum eingefüllt und nach dem Glätten mit einer runden Metallplatte, die am Rand etwas Spiel hat, bedeckt. Zu Beginn der Messung wird in den beiden Räumen über und unter der Paste mittels einer Strahlpumpe Unterdruck erzeugt und dieser nach dem Abschalten der Pumpe mit dem Manometer M gemessen. Anschliessend wird der Raum über der Paste nach dem Schliessen des Hahns D über K mit der Aussenluft verbunden. Der plastische Stoff tritt nunmehr durch die Siebplatte, wodurch sich der Druck unterhalb dieser vermin-

 +) Höchst benützt ein verbessertes Kämpf'sches Viskosimeter, das mit umlaufendem Gefäss und feststehenden Strombrechern versehen ist, zur Erforschung des Fliessverhaltens von Teigen, ihrer elastischen Eigenschaften und zur Verfolgung von Thixotropieerscheinungen.
 ++) H. W e f e l s c h e i d, Ein neuer Zähigkeitsprüfer für Fette. Chem.Fabr.1936, S. 316.

dert. Bezeichnet man den Aussendruck mit p_a , den absoluten Druck nach dem Evakuieren mit p_u und den veränderlichen Druck mit p , so ist $p - p_u$ der durchgetretenen Menge verhältnisgleich und $p_a - p$ gibt die jeweils wirksame Differenz an. W e f e l s c h e i d nimmt den Mittelwert des

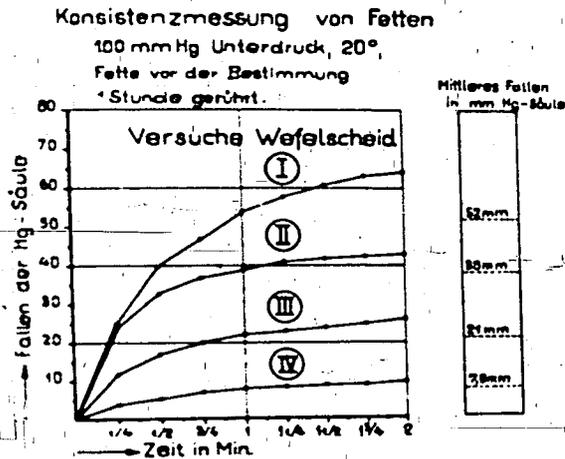


Abb.113.

schaften nicht durch eine einzige Grösse festzulegen sind.

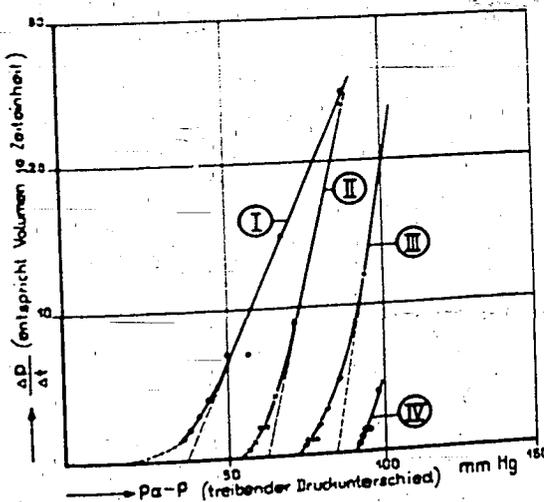


Abb.114.

Fallens der Quecksilbersäule als Mass für die Konsistenz. Es ist leicht zu verstehen, dass dies naturgemäss wieder nur eine nicht ausreichende Kennzeichnung der Pasten darstellen kann, da deren Eigen-

Trotzdem ist aber das Gerät bei geeigneter Art der Auswertung brauchbar. So zeigt Abb. 113 zunächst für vier verschiedene konsistente Fette den Verlauf des Wertes $p - p_u$ als Funktion der Zeit +). Hierbei war ursprünglich

$p_a - p_u = 100$ mm Hg. Die die "Weichheit" dieser Schmierstoff-

+) Die Messergebnisse wurden von Dr. Wefelscheid zur Verfügung gestellt.

fe kennzeichnenden "mittleren" Säulenabsenkungen sind rechts aufgetragen. Ein wesentlich besseres Bild über das Verhalten dieser Stoffe ergibt sich, wenn man $\frac{\Delta p}{\Delta t}$ für hinreichend kleine Zeit- und Druckabschnitte über dem zu Δt gehörigen mittleren Treibdruck aufträgt (Abb. 114). Es ergeben sich ähnliche Kurven, wie sie Abb. 53 für die Kapillare darstellt. Soweit es sich überblicken lässt, wird bei einer derartigen Auswertung der Ergebnisse wiederum der Abszissenabschnitt der Asymptote der Fließfestigkeit τ direkt und das Steigungsmass dieser Geraden dem Gleitmodul umgekehrt verhältnisgleich. Einer rechnerischen Behandlung ist das Fließen einer Paste durch ein scharfkantiges Loch nur schwer zugänglich, so dass also das W e f e l s c h e i d'sche Gerät ebenfalls geeicht werden muss. Infolgedessen können nur Verhältniszahlen für die Eigenschaften der Fette angegeben werden. Man erhält aus der Abb. 114 folgende Werte, die mit den (unbekannten) Eichkonstanten c_1 und c_2 zu vielfachen sind, um die wirklichen Werte der Stoffgrößen zu finden

	τ/c_1	η/c_2	Δh
Fett I	3,7	0,40	52
Fett II	6,3	0,21	38
Fett III	8,4	0,16	21

In der letzten Spalte sind die von W e f e l s c h e i d verwendeten, kennzeichnenden, mittleren Fallhöhen Δh wiedergegeben. Man sieht, dass keinerlei eindeutiger Zusammenhang zwischen diesen und den eigentlichen Stoffkonstanten besteht. In roher Annäherung ist offenbar Δh der Fließfestigkeit umgekehrt proportional.

Das W e f e l s c h e i d 'sche Gerät dürfte wahrscheinlich nach gewissen Verbesserungen geeignet sein, brauchbare Zahlen zur Kennzeichnung von Pasten, die dem Ansatz nach Gl.21 folgen, zu liefern. Sein Messbereich kann durch Wahl geeigneter Differenzdrücke und Lochweiten sehr gross gestaltet werden. Es hat überdies den Vorteil, dass es bei inhomogenen Pasten Durchschnittswerte liefert. Für die Erfassung einer Strukturabhängigkeit der Konstanten kommt es weniger in Frage.

Alle bisher behandelten Instrumente mit Ausnahme des Farinographen setzen voraus, dass die in den Pasten gegebenenfalls vorhandenen Feststoffteilchen eine hinreichend kleine Abmessung besitzen. Dies ist jedoch bei Rührgütern sehr oft nicht der Fall. Bei grobkörnigen Suspensionen ist die Erfassung der Beiwerte am einfachsten durch ein Rührwerk mit Dynamometer möglich, das mit einer Paste bekannter Konstanten geeicht wurde.

V. Zusammenfassung.

Der vorliegende Bericht stellt den ersten Teil einer Arbeit dar, in der die bisherigen Erfahrungen und Versuchsergebnisse auf dem Rührergebiet zusammengefasst werden sollen.

Zunächst wird auf die Eigenschaften verschiedener Rührerformen und -anordnungen eingegangen und auf die Bestimmung des Energiebedarfes aus Modellversuchen hingewiesen. Es zeigte sich, dass, von selteneren Sonderfällen abgesehen, die verschiedenartigsten Rührprozesse mit einer verhältnismässig geringen Anzahl von Rührerformen durchgeführt werden können. Damit ist aber die Möglichkeit nähergerückt, eine Anleitung zur Berechnung von Rührwerken herauszugeben, die es dem Konstrukteur ermöglicht,

in vielen Fällen ohne Schwierigkeit den richtigen Rührer zu wählen und die Grösse der zu seinem Antrieb erforderlichen Leistung zu bestimmen.

Die Grundlagen für derartige Rechentafeln sind für jede Einzelanordnung durch Modellversuche zu gewinnen. Die für Rührprozesse geltenden Grundsätze der Ähnlichkeitsphysik werden zunächst theoretisch entwickelt. Am Beispiel des Blattrührers wird die Richtigkeit der gefundenen Gesetzmässigkeiten nachgewiesen. Es wird weiterhin auch gezeigt, wie gross der Einfluss der zahlreichen Veränderlichen (Drehzahl, Form, Einbauten, Grösse, Stoffbeiwerte u.s.w.) ist, und welche von ihnen bei der Aufstellung von Rechentafeln Berücksichtigung finden müssen.

Am Beispiel des Blattrührers wird weiterhin der Weg zum Aufstellen handlicher Rechentafeln gewiesen: eine Voraussetzung hierfür ist die Beschränkung auf eine bestimmte Anzahl von Rührerdrehzahlen und, beim Einzelantrieb, von Motorstärken, eine Massnahme, die auch im Sinne einer Vereinfachung der Antriebe liegt.

Es gelang weiterhin auch, für plastische Stoffe neue Ähnlichkeitsgesetze zu finden und sie zu bestätigen. Damit besteht auch für Rührwerke, **Kneter** u.s.w., die zur Verarbeitung derartiger Produkte dienen, die Möglichkeit zur Vorausberechnung ihres Leistungsbedarfes.

Bevor die Bearbeitung der Anleitung zur Berechnung von Rührwerken in Angriff genommen wird, ist es notwendig, eine Einigung über die innerhalb der I.G. in Zukunft hauptsächlich zu verwendenden Rührerformen zu erzielen, um wenigstens bezüglich der Hauptabmessungen eine Normung durchführen zu können. Erst dann ist es rätlich, mit den erforderlichen umfangreichen

Modellversuchen zu beginnen. Für den Blattrührer liegen die Ergebnisse bereits fertig vor. Auch für eine grosse Anzahl anderer Typen wurde das energetische Verhalten weitgehend erforscht. Eine Herausgabe der Anleitung ist jedoch vor der Ergänzung nicht möglich und diese erscheint vor einer Normung nicht rätlich zu sein.

Der vorliegende, erste Teil der Arbeit über Rührwerke behandelt hauptsächlich die energetischen Fragen. Im zweiten Teil soll auf die physikalischen und chemischen Vorgänge (Wärmeübertragung, Umsetzungsverlauf zwischen festen und flüssigen Stoffen, Gasreaktionen u.s.w.) näher eingegangen werden.

Ludwigshafen am Rhein, den 31. Juli 1937.

gez. Dr. Büche.

Anhang I.

Verzeichnis der I.G.-Berichte über Rührerfragen.

No.	Verfasser.
83a u. b	Dr. Hafler, Lu, Rührerversuche I, 1. Teil.
92	Dr. Hafler, Lu, Rührerversuche I, Ergänzung z. 1. Teil.
93 - 95	Dr. Hafler, Lu, Verschiedene Modellversuche.
96	Dr. Hafler, Lu, Rührerversuche I, 2. Teil.
110	Dr. Hafler, Lu, Rührerversuche I, 3. Teil.
123	Dr. Hafler, Lu, Leistungs- und Drehzahlmessung während Dipl. Ing. Boehlke der Anlaufperiode bei Rührblättern mit Einzelantrieb.
124	Dr. Hafler, Lu, Rührerversuche I, Ergänzung zum 3. Teil (MAN-Schraubenschaufler).
125	Dr. Hafler, Lu, Rührerversuche II, Versuchsergebnisse bei Gasreaktionen und Emulsionen.
132	Dipl. Ing. Biedenkopf, Lu, Rührerversuche und deren Anwendung in der Praxis.
159	Dr. Büche, Lu, Zur Frage der Rührer. Zwiproreferat 1935.
166	Dr. Büche, Lu, Eignung des Farinographen zur Bestimmung der Fließbeiwerte von Pasten.
F 65	Dr. Villiger, Hauptlabor., Versuche über Rührer und Strombrecher.
F 169	Dipl. Ing. Omlor, I.G. Mainkur, Untersuchungen an Rühr- und Triebwerken.
F 197	Dipl. Ing. Büttner, Lu, Untersuchung eines Scheibenrührers in Bau Lu 337b.
F 199	Dr. Geister, Lu, Gruppen oder Einzelantrieb.
F 212	Dr. Kuns, Lu, Scheibenrührer.
F 256	Dipl. Ing. Matz } I.G.-Hö. Bericht über die Versuche am Dr. Esser } Blattrührer mit elektrischem Einzelantrieb.
F 268	Dr. Strasser, Lu, Strömungsmessung gerührter Flüssigkeiten in Behältern mit und ohne Strombrecher.
F 346	Dipl. Ing. Matz, I.G. Hö. Leistungsverbrauch der Blattrührer in der chemischen Industrie.

Anhang II.

Während der Fertigstellung des vorliegenden Berichtes wurden auf den Gebieten, die in ihm Behandlung fanden, noch eine Reihe neuer Erfahrungen gemacht, die in kurzen Zügen nachstehend wiedergegeben werden sollen:

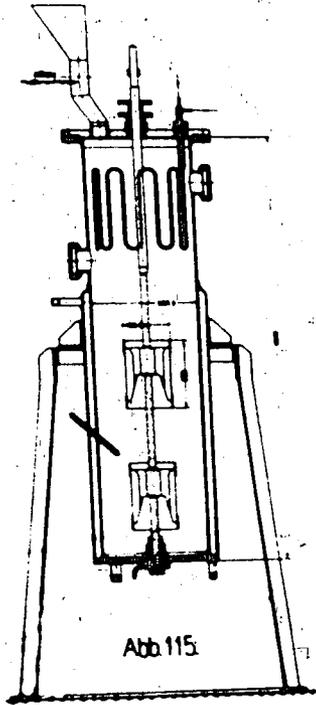
Zu Seite 24 (Verwendung des Blattrührers):

Es hat sich herausgestellt, dass der Blattrührer wie auch wahrscheinlich alle diejenigen Rührerformen, die eine verhältnismässig grosse Flüssigkeitgeschwindigkeit erzeugen, dann keine Verwendung finden dürfen, wenn das zu rührende Gut harte Feststoffe enthält, und das Kesselmaterial nur durch Ueberzug mit einer sehr dünnen Oberflächenschicht gegen Angriff beständig ist. So führte z.B. bei der Herstellung von Dinitronaphthol eine Drehzahlerhöhung des Blattrührers in wenigen Tagen zu einer restlosen Zerstörung des flusseisernen Kessels. Die Haltbarkeit von Eisen in Mischsäure beruht darauf, dass eine dünne Oxydschicht gebildet wird, die einen weiteren Angriff verhindert. Bei grösseren Rührergeschwindigkeiten schliff das in feinen Körnern ausgeschiedene Material dauernd am Kesselboden, den Wandungen und den Tauchrohren diese Schutzschicht weg, so dass ein unerwartet starker Angriff die Folge war.

Zu Seite 66 (Gasrührer):

Die Durchführung von Gasreaktionen in hohen Gefässen auf die beschriebene Weise hat den Nachteil, dass sie nur bei solchen Umsetzungen Verwendung finden kann, bei denen keine Inertgase vorhanden sind oder sich dabei bilden. In diesem Falle ist es notwendig, einen Teil des Reaktionsgases zur Vermeidung

einer unzulässig hohen Anreicherung an Inertgas dauernd abzuleiten. Hierdurch wird entweder die Nachschaltung eines zweiten



Rührgefäßes oder eines Waschturmes erforderlich. Inzwischen wurde nun eine neue Anordnung gefunden, die auch bei Anwesenheit von Inertgasen die Durchführung kontinuierlicher Reaktionen ermöglicht. Man leitet (Abb. 115)

die Gase unter den Rührer und vermeidet die Trombe durch einen in geeigneter Weise aus Rohren gebildeten Strombrecher, der von oben in die Flüssigkeit taucht und gleichzeitig zur Zufuhr und Abfuhr von Wärme dienen kann. Bei richtiger Wahl der Säulenhöhe und der Drehzahl vollzieht sich die Umsetzung im unteren Teile des Gefäßes und nur die Inertgase treten nach oben weg, wobei sie sich im Gebiete des Strombrechers zu grösseren Blasen vereinigen. Bei Verarbeitung zäherer Flüssigkeiten oder solcher mit schon leicht pastenartigen Eigenschaften empfiehlt es sich, mehrere Rührer übereinander anzuordnen.

Versuche mit derartigen Apparaten, die grundsätzlich auch eine Ausführung für die höchsten Drücke zulassen, zeigten bis jetzt sehr gute Ergebnisse.

Zu Seite 193 (Rechentafeln):

169002930

In dem vorliegenden Bericht wurde angeregt, für die Rechentafeln zur Bestimmung der Motorstärken Tabellen in der in Abb. 100 dargestellten Form zu verwenden, deren Werte auf dem Wege der Ähnlichkeitsmechanik aus Modellversuchen gewonnen wurden. Inzwischen ist jedoch der Gedanke aufgetaucht, ob es nicht zweckmässiger wäre, die Motorleistung auf die Volumeneinheit (1 m^3) zu beziehen. Diese Art der Ermittlung ergibt sich aus der Tatsache, dass nach Kap. IV, 4e bei der Umrechnung der Drehzahlen gefordert wird, dass im kleinen wie im grossen Gefäss die Leistung je Volumeneinheit dieselbe bleiben soll. Bei einer derartigen Form der Berechnung würde vermutlich die Gefässabmessung als Veränderliche verschwinden, ebenso würde vermutlich auch die Füllhöhe nicht mehr in Erscheinung treten.

Die Frage, welche Art der Tafeln zur Ermittlung der Motorstärke für Rührwerke die bessere ist, muss noch eingehend geprüft werden. Die Grundlagen für beide sind dieselben, d.h. es wird in jedem Fall von den Ergebnissen der Modellversuche ausgegangen. Entscheidend für die Wahl zwischen beiden dürfte jedoch die einfachere Handhabung sein. Im Zweifelsfalle soll hierüber ein grösserer Kreis entscheiden.

Zu Seite 53 (Fussnote):

Inzwischen wurde durch eine stroboskopische Beobachtung des Verhaltens der kleinen Rührblätter beim Zerteilen von angesaugtem Gas festgestellt, aus welchen Gründen die Kantenform keinen grossen Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit ausübt. Es zeigte sich hierbei, dass die Ablösung der Gasblasen nicht an den Blatträndern, sondern an Stellen, die mehr nach der Blattmitte zu liegen, erfolgt.