

# BESTIMMUNG DES LEISTUNGSBEDARFS BEIM RÜHREN

Von

L. VIMMER

Lehrstuhl für chemisches Maschinenwesen und landwirtschaftliche Industrien der Technischen Universität, Budapest

(Eingegangen am 12. September 1961)

Vorgelegt von Prof. E. BASS

Der Leistungsbedarf beim Rühren läßt sich wegen der komplizierten Strömung der gerührten Flüssigkeit theoretisch nicht einmal annähernd bestimmen. Die charakteristischen Differentialgleichungen zur Beschreibung der Flüssigkeitsströmung können bei viskosen Flüssigkeiten zumeist nicht integriert werden, oder die durch Integration gewonnenen Ergebnisse sind nur beschränkt brauchbar, so daß man bei der Lösung des Problems auf Versuchsmessungen angewiesen ist.

Unsere Untersuchungen wurden auf Grund der Ähnlichkeitstheorie vorgenommen, die auf der Behandlung ähnlicher physikalischer Erscheinungen beruht. Zu den Ähnlichkeitsbedingungen gehören die geometrische und zeitliche Ähnlichkeit sowie die Ähnlichkeit der physikalischen Eigenschaften und der Anfangs- und Grenzbedingungen. Die Gesetze der Ähnlichkeitstheorie schreiben nicht nur vor, wie die Versuchsmessungen durchzuführen sind, sondern auch wie die gewonnenen Meßergebnisse gewertet und auf ähnliche Erscheinungen weiterer Gebiete angewendet werden müssen.

Beim Bestimmen der Ähnlichkeitskriterien für inkompressible, viskose Medien bei stationärer Strömung muß man von dem für die Erscheinung charakteristischen Kontinuitätssatz und von der Navier-Stokesschen Differentialgleichung ausgehen [1].

Die Ähnlichkeitskriterien, u. zw. die

*Eu*-, *Re*- und *Fr*-Zahlen

lassen sich auch mit Hilfe der Dimensionsanalyse ermitteln [2]. Beim Rührvorgang wollen wir von folgenden Überlegungen ausgehen: Der Leistungsbedarf des Rührelements hängt — gemäß unseren auf Grund von Versuchsmessungen gemachten Erfahrungen — von seiner Größe, von der Viskosität des gerührten Stoffes, von dem auf das System wirkenden Kraftfeld, von der Dichte des gerührten Stoffes und von der Drehzahl des Rührelements ab.

Wir setzen voraus, daß sich der Zusammenhang zwischen der abhängigen

and den unabhängigen Veränderlichen durch die einfache Potenzfunktion

$$N = \text{konst.} \cdot (d^a \cdot \mu^b \cdot g^e \cdot \rho^f \cdot n^j) \quad (1)$$

ausdrücken läßt, in der

$N$  den Leistungsbedarf des Rührelements (mkg/sec)

$d$  den Durchmesser des Rührelements (m)

$\mu$  die Viskosität des gerührten Mediums (kg sec/m<sup>2</sup>)

$g$  die Erdbeschleunigung (m/sec<sup>2</sup>)

$\rho$  die Dichte des gerührten Mediums (kg sec<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>)

$n$  die Rührerdrehzahl (U/sec) und

$a, b, e, f, j$  die unbekanntenen Exponenten bedeuten.

Statt der in Gl. (1) beiderseitig vorkommenden Größen setzen wir nun die entsprechenden Dimensionen ein und erhalten somit

$$\text{mkg/sec} = (\text{m})^a \cdot (\text{kg sec/m}^2)^b \cdot (\text{m/sec}^2)^e \cdot (\text{kg sec}^2/\text{m}^4)^f \cdot (\text{U/sec})^j. \quad (2)$$

Wegen der Homogenität der Dimensionen müssen die beiden Seiten der Gleichung die gleiche Dimension haben. Auf dieser Grundlage lassen sich die Exponenten bestimmen. Für die Identität der Exponenten der gleichen Größen gilt:

$$\text{für die Länge } 1 = a - 2b + e - 4f \quad (3)$$

$$\text{für die Kraft } 1 = b + f \quad (4)$$

$$\text{für die Zeit } -1 = b - 2e + 2f - j. \quad (5)$$

Diese Gleichungen enthalten fünf Unbekannte. Wir wählen zwei Exponenten, mit denen alle übrigen ausgedrückt werden können. Die Wahl ist ganz willkürlich, da wir schließlich in jedem Fall Ähnlichkeitskriterien erhalten, doch bleibt es ungewiß, ob sich mit diesen zweckmäßig weiterarbeiten läßt.

Wir wählen die Exponenten:  $b$  und  $e$ .

Aus Gln. (3, 4 und 5) lassen sich mit diesen gewählten Exponenten  $b$  und  $e$  die anderen drei Exponenten ausdrücken:

$$a = 1 - b \quad (6)$$

$$f = 5 - 2b - e \quad (7)$$

$$j = 3 - b - 2e \quad (8)$$

Mit den aus den Gln. (6, 7 und 8) folgenden Werten der Exponenten  $a, f$  und  $j$  schreibt sich Gl. (1) zu

$$N = \text{konst.} \cdot (d^{5-2b-2} \cdot \mu^b \cdot g^e \cdot \rho^{1-b} \cdot n^{3-b-2e}). \quad (9)$$

Werden die bestimmten und unbestimmten Exponenten voneinander getrennt,

erhält man

$$N = \text{konst.} \cdot (d^5 \cdot n^3 \cdot \varrho) \cdot (d^{-2} \cdot \mu \cdot \varrho^{-1} \cdot n^{-1})^b \cdot (d^{-1} \cdot g \cdot n^{-2})^e \quad (10)$$

und nach Umordnung:

$$N/d^5 \cdot n^3 \cdot \varrho = \text{konst.} \cdot (d^2 \cdot n \cdot \varrho/\mu)^{-b} \cdot (d \cdot n^2/g)^{-e}. \quad (11)$$

Die Funktion mit fünf Unbekannten wurde also in eine einfachere mit zwei Unbekannten umgewandelt. Die Größe unter dem Exponenten  $-b$  ist die dimensionslose *Reynoldszahl*

$$Re = d^2 \cdot n \cdot \varrho/\mu,$$

die auch aus der Ähnlichkeitstheorie abgeleitet werden kann, während die Größe unter dem Exponenten  $-e$  die ebenfalls dimensionslose *Froudezahl*

$$Fr = d \cdot n^2/g$$

darstellt. Auf der linken Seite der Gl. (11) steht die dimensionslose Größe

$$Eu = \xi = N/d^5 \cdot n^3 \cdot \varrho$$

die sogenannte *Eulersche Zahl*, die sich auf die Rührelemente bezieht und die wir im folgenden als »Widerstandskoeffizienten« bezeichnen wollen.

Aus Gl. (11) geht hervor, daß zwei der drei Ähnlichkeitskriterien — für die Berechnung des Leistungsbedarfs von Rührelementen —, nämlich die *Reynolds-* und *Froudezahl* voneinander unabhängig sind, während der Widerstandskoeffizient eine Funktion dieser beiden darstellt, u. zw.

$$\xi = f(Re, Fr).$$

Unseren Versuchsergebnissen zufolge ist der Widerstandskoeffizient tatsächlich eine Funktion der *Reynolds-* und der *Froudezahl*, doch kann diese Abhängigkeit durch einfache, allgemein verwendbare mathematische Formeln nicht ausgedrückt werden. Der funktionelle Zusammenhang läßt sich am einfachsten durch Versuchsmessungen bestimmen.

### Modellversuche

Der Leistungsbedarf von Rührelementen kann anhand der Formel

$$N = \xi \cdot d^5 \cdot n^3 \cdot \varrho$$

ermittelt werden, wenn der numerische Wert des auf das Rührelement bezogenen Widerstandskoeffizienten bekannt ist. Nach den obigen Anführungen

läßt sich der Widerstandskoeffizient nur aus den Ergebnissen der Versuchsmessungen bestimmen. In der Praxis werden unter den verschiedensten Rührbedingungen vielerlei Rührelemente verwendet, weshalb man die Versuchsmessungen zweckmäßig an Modellapparaten vornehmen wird [3, 4].

Die auf Grund der Ähnlichkeitstheorie abgeleiteten Ähnlichkeitskriterien und die unter Einhaltung der Ähnlichkeitsbedingungen mit den Modellapparaten gewonnenen Ergebnisse können auf jeden beliebig bemessenen Apparat übertragen werden.

Sind also die *Reynolds*- und *Froude*zahlen gleich, so ist die Strömung in Apparaten mit gleichen geometrischen Größenverhältnissen ähnlich, und somit sind die auf die beiden Strömungen bezogenen Widerstandskoeffizienten  $\xi$  gleich. Eine wichtige Rolle spielt hierbei auch die Bedingung der geometrischen Ähnlichkeit, denn wird diese nicht eingehalten, so können die für den Modellapparat ermittelten Resultate nur als geschätzte Richtwerte angesehen werden.

Den zahlenmäßigen Wert des Widerstandskoeffizienten

$$\xi = \frac{N}{d^5 \cdot n^3 \cdot \rho}$$

erhält man, wenn man den Durchmesser des Rührelements kennt und den Leistungsbedarf und die Drehzahl des Rührelements sowie die Dichte des gerührten Stoffes mißt.

Die Messung des Leistungsbedarfs von Rührelementen führten wir auf eine Momentenmessung zurück. Den Modellapparat stellten wir auf eine frei drehbare, gelagerte Tischplatte. Das zum Drehen des Rührelements nötige Drehmoment entspricht dem von der gerührten Flüssigkeit verursachten Haltmoment, das durch Abbremsen der freien Drehung der gelagerten Tischplatte gemessen wurde. Zieht man von dem auf diese Weise ermittelten Moment das Lagerreibungsmoment ab, so erhält man den Wert des durch die gerührte Flüssigkeit verursachten Haltmoments in der Form

$$M = M_g - M_s, \quad (12)$$

Bei bekannter Drehzahl wurde der Leistungsbedarf des Rührelements aus der Formel

$$N = M \cdot \omega = 2 \cdot \pi \cdot M \cdot n \quad (13)$$

errechnet, worin

$M$  das Haltmoment der Flüssigkeit (mkg)

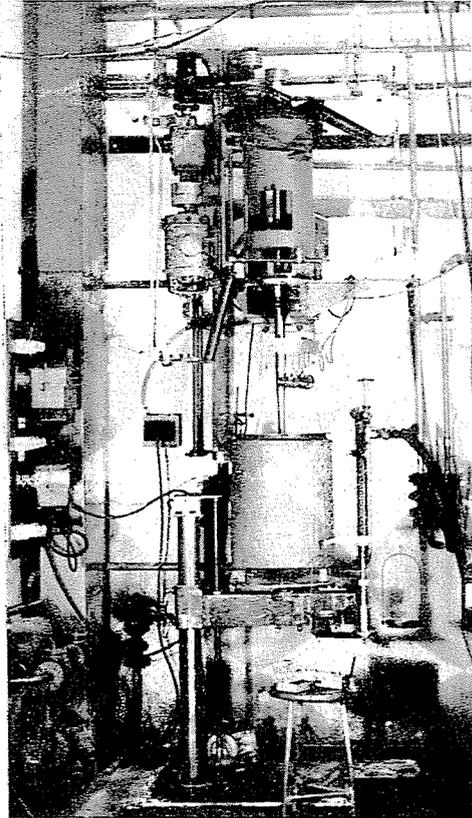
$M_g$  das gemessene Moment (mkg)

$M_s$  das Lagerreibungsmoment (mkg)

$\omega$  die Winkelgeschwindigkeit des Rührelements (1/sec) bedeutet.

### Die Modellvorrichtung

Die Modellvorrichtung ist in *Abb. 1* dargestellt. Die Rührerwelle wird von einem Gleichstrommotor durch einen Keilriemen über ein achtstufiges Getriebe angetrieben. Die Verwendung eines Gleichstrom-Nebenschlußmotors und des achtstufigen Getriebes gestattet es, die Drehzahlen im Bereich zwischen



*Abb. 1.* Modellapparat

$n = 30$  U/min und  $n = 3000$  U/min auf jedem beliebig gewählten Wert zu halten.

Der Modellapparat ist ein zylinderförmiger Behälter von 400 mm Durchmesser, mit einem tiefgewölbten korbkurvenförmigen Boden. Für höhere Flüssigkeitsspiegel kann auf den Apparat ein Zusatzstück aufgesetzt werden, so daß er eine Gesamthöhe von 800 mm erreichen kann. Der Apparat ist außen isoliert. Das Versuchsmaterial kann durch heraushebbare elektrische Heizelemente erwärmt werden.

Die drehbare Tischplatte ist im Gestell versenkbar gelagert. In seiner oberen Stellung sitzt das Rührelement eben auf dem Verschußdeckel des Modellapparats auf. Mit Hilfe des versenkbaren Tischgestells läßt sich das Rührelement in den gewünschten Abstand vom Apparateboden einstellen.

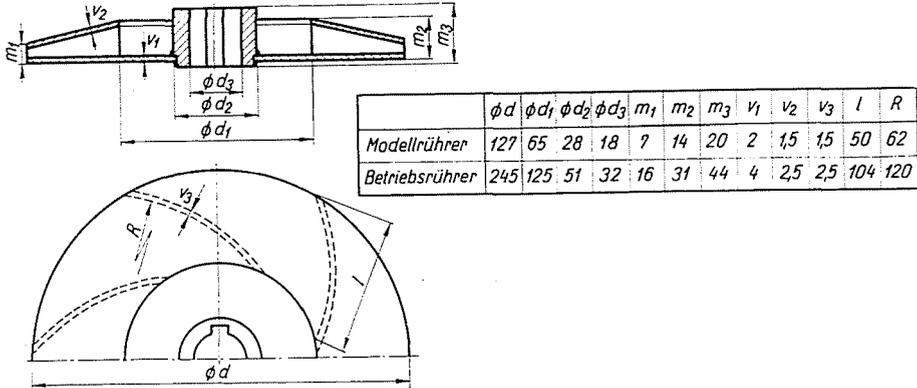


Abb. 2. Turborührer mit einseitiger Beschaukelung

Die zur Durchführung der Versuchsmessungen dienende Modellvorrichtung ermöglicht die Ermittlung der für die untersuchten Rührelemente charakteristischen Widerstandskoeffizienten innerhalb eines praktisch erreichbaren Wertebereichs. Durch Änderung der Drehzahl konnten für ein gegebenes Rührelement verschiedene *Reynolds*- und *Froude*zahlen erzielt werden. Die *Reynoldszahl* läßt sich auch durch Änderung des Stoffkennwertes — nämlich der Viskosität — der Versuchsflüssigkeit ändern, weshalb man als Versuchsmaterial zweckmäßig Öle wählt. Die Viskosität des Dampfzylinderöls beträgt z. B. bei 20° C 35 000 cP, bei 150° C hingegen nur 10 cP. Niedrigere Viskositätswerte können durch Verwendung von wäßriger Zuckerlösung bzw. von Wasser erreicht werden.

Rührer mit niedrigen Drehzahlen arbeiten im Wertebereich von  $Re = 1 - 10^4$ , solche mit hohen Drehzahlen dagegen im Bereich von  $Re = 10^2 - 10^6$ .

Abb. 2 stellt den Ausführungsentwurf eines Turborührers mit einseitiger Beschaukelung dar. Er hat zwei Rührelemente verschiedener Größe, die unter strenger Einhaltung der geometrischen Ähnlichkeit angefertigt wurden. Die Messungen wurden mit dem Modellrührelement durchgeführt und die Meßergebnisse als Kurve der Funktion

$$\xi = f(Re, Fr)$$

aufgetragen.

Die anhand der Messungen im Modellapparat gewonnene Kurve erscheint in Abb. 3 als stetige Linie. Aus dieser Kurve geht hervor, daß die Werte der

Reynoldszahlen bis zu  $Re = 150 \div 200$  von der Froudezahl unbeeinflusst bleiben. Aus der Lösung der Navier-Stokesschen Differentialgleichung oder aus der Ableitung der Dimensionsanalyse ist diese Tatsache nicht ersichtlich, da die Froudezahl in diesen als Veränderliche auftritt. Als Kriterium aufgefaßt,

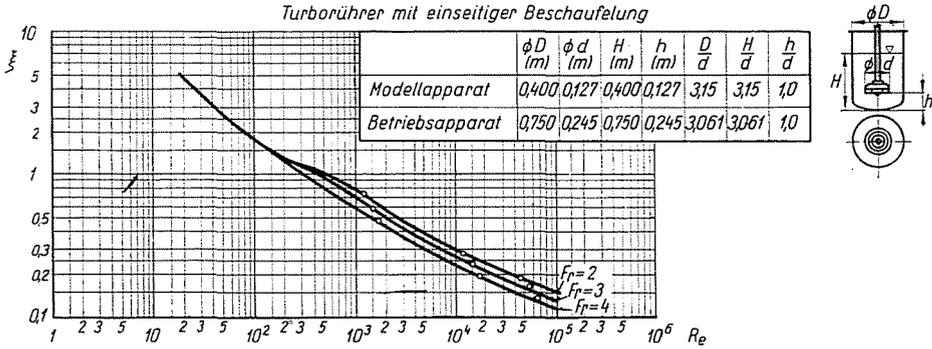


Abb. 3. Kurve der Funktion  $\xi = f(Re, Fr)$  aus Modellmessungen (stetige Linie) Rührelement: Turborührer mit einseitiger Beschauelung

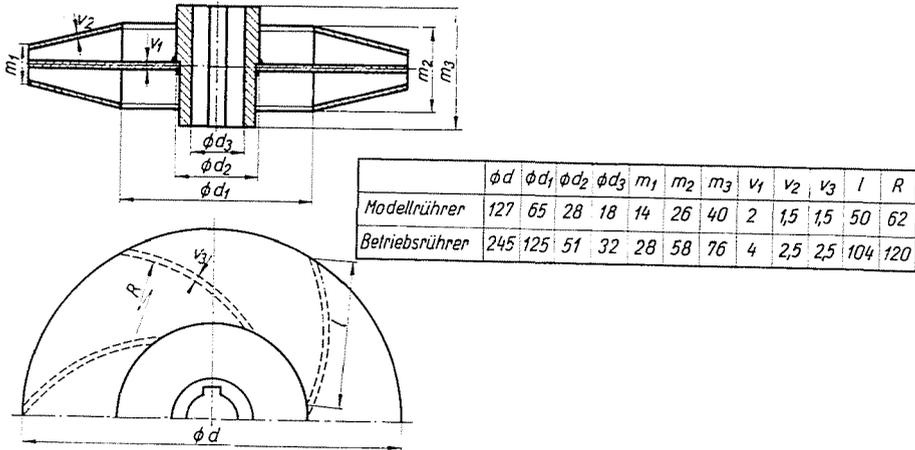


Abb. 4. Turborührer mit zweiseitiger Beschauelung

beeinflusst die Froudezahl die Funktion nur bei Werten, die höher liegen als  $Re = 150 \div 200$ . Nach den praktischen Beobachtungen fällt die Wirkung des Froudeschen Kriteriums mit der Trichterbildung im Apparat zusammen. Diese Beobachtung gilt auch für sonstige Rührelemente mit hohen Drehzahlen und stimmt mit den bisherigen Feststellungen der Fachliteratur überein.

Abb. 4 stellt einen Turborührer mit zweiseitiger Beschauelung dar. Nach Durchführung der Modellmessungen wurde die Funktionskurve des Widerstandskoeffizienten in Abb. 5 aufgetragen.

Ähnlich wie beim Turborührer mit einseitiger Beschaufelung ist der Widerstandskoeffizient im ersten Abschnitt von der *Froudezahl* unabhängig, während er im zweiten Abschnitt eine Funktion beider Kriterien darstellt.

In den *Abb. 6* und *7* sind die anhand anderer Größenverhältnisse ermittelten Kurven der Widerstandskoeffizienten aufgetragen. Beim Vergleich dieser Kurven läßt sich feststellen, daß die Werte der Widerstandskoeffizienten vom Verhältnis der Durchmesser unabhängig sind.

In der Praxis ist der Rührvorgang überaus mannigfaltig. Die Konstruktion der Rührelemente ist je nach ihren Anwendungszwecken verschieden, doch taucht stets die Frage der Größe des Leistungsbedarfs auf. Diese Frage läßt sich aber auf analytischem Weg — wie aus dem bisher Gesagten ersichtlich — nicht beantworten. Daher müssen solche Probleme mit Hilfe der Ähnlichkeitstheorie in Modellapparaten gelöst werden, da Betriebsapparate wegen ihrer Abmessungen zum Ausmessen der gesamten Funktionskurve ungeeignet sind.

Durch Ermittlung einer Funktionskurvenreihe für die Widerstandskoeffizienten der Rührelemente ist jedoch das Problem noch nicht erschöpft. Da dem Modell geometrisch ganz ähnliche Formen in Betriebsabmessungen nicht in jedem Fall hergestellt werden können, müssen die Modellmessungen fortgesetzt werden. So ist noch zu untersuchen, inwieweit die Änderung der einzelnen geometrischen Größenverhältnisse (z. B. des Verhältnisses von Flüssigkeitshöhe zum Rührerdurchmesser  $H/d$  oder des Abstands zwischen Rührelement und Behälterboden zum Rührerdurchmesser  $-h/d$ ) die Kurven des Widerstandskoeffizienten beeinflusst. Die Untersuchung dieses Problems ginge jedoch über den Rahmen dieses Aufsatzes hinaus.

Durch die Anwendung der Ähnlichkeitstheorie läßt sich die Lösung von Rührproblemen bedeutend vereinfachen, doch bleibt die Frage offen, ob die Modellkurven ohne Änderungen auf Apparate von Betriebsgröße übertragen werden können. Diese Frage wurde anhand einer Betriebsmeßreihe untersucht.

### Betriebsversuche

Am einfachsten ermittelt man den Leistungsbedarf, indem man das zum Drehen des Rührelements nötige Moment und die Winkelgeschwindigkeit des Rotationssystems mißt. Die Messung der Momente im Rotationssystem bedarf spezieller Meßinstrumente. Da sich die für den Modellapparat ausgearbeiteten Meßmethoden auf unsere Messungen im 300 l fassenden doppelwandigen Behälter nicht ohne weiteres übertragen ließen, mußten zur Momentenmessung neue Methoden ausgearbeitet werden.

Während beim Modellapparat das von der Flüssigkeit auf das Rührelement ausgeübte Haltmoment gemessen wurde, ermittelten wir bei den Be-

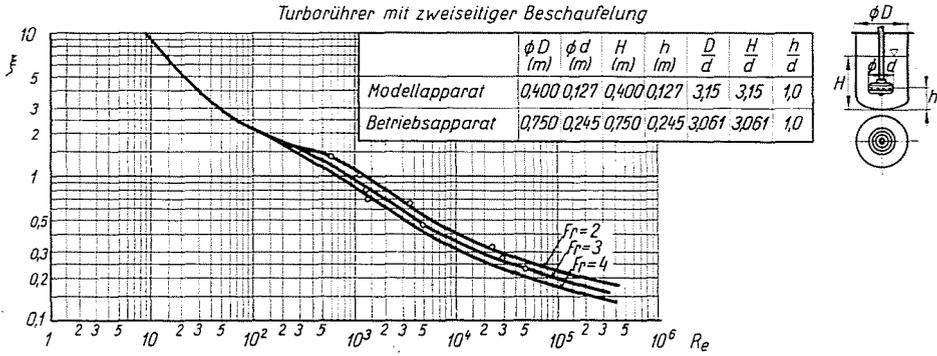


Abb. 5. Kurve der Funktion  $\xi = f(Re, Fr)$  aus Modellmessungen (stetige Linie)  
Rührelement: Turborührer mit zweiseitiger Beschaeufelung

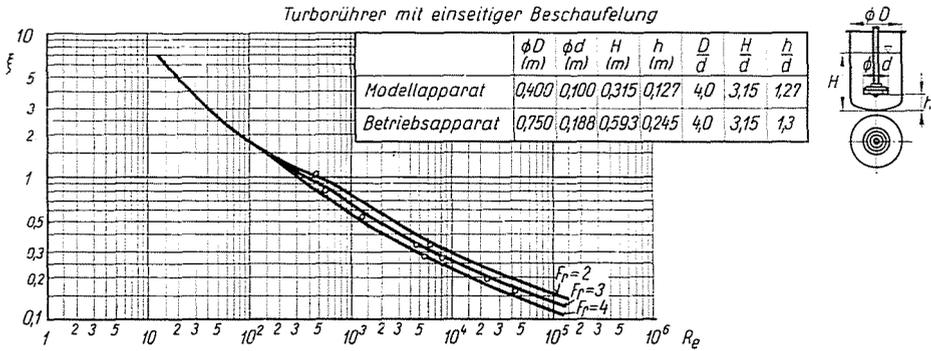


Abb. 6. Kurve der Funktion  $\xi = f(Re, Fr)$  aus Modellmessungen (stetige Linie)  
Rührelement: Turborührer mit einseitiger Beschaeufelung

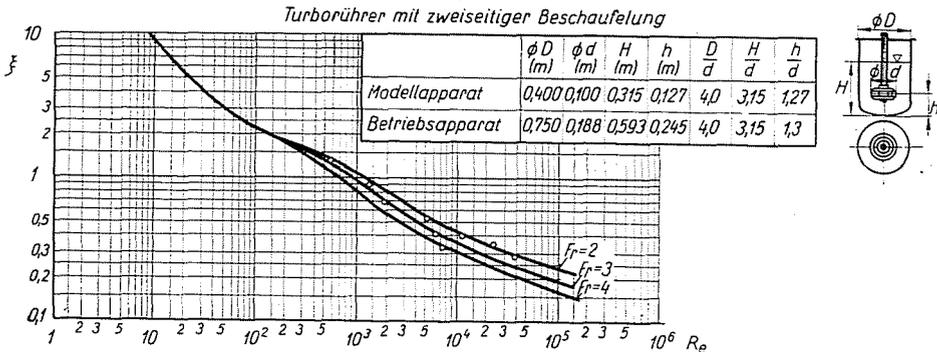
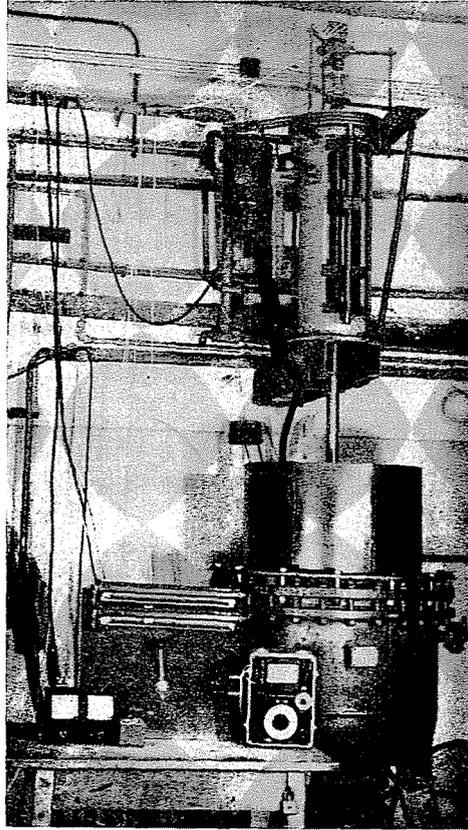


Abb. 7. Kurve der Funktion  $\xi = f(Re, Fr)$  aus Modellmessungen (stetige Linie)  
Rührelement: Turborührer mit zweiseitiger Beschaeufelung

triebsversuchen das zum Drehen des Rührelements nötige Moment an der Rührwelle.

Die Versuchsvorrichtung ist in *Abb. 8* dargestellt. Das Rührwerk ist auf eine separate Konsole über dem Apparat aufgebaut. Die Rührerwelle wird von einem Gleichstrom-Nebenschlußmotor über zwei Keilriemen



*Abb. 8.* Betriebsapparat

angetrieben. Der Drehmomentenmesser ist an der Keilriemenscheibe auf der Rührerwelle befestigt.

Der Rührbehälter ist doppelwandig, hat ein Fassungsvermögen von 300 l und kann mit Dampf beheizt werden. Der zylindrische Teil hat einen korbkurvenförmigen Boden. Auf den zylindrischen Teil läßt sich zum Erreichen höherer Flüssigkeitsspiegel ein Ansatzstück aufsetzen.

Die Momentenmessung im Rotationssystem erfolgte mit dem in *Abb. 9* dargestellten Momentenmeßinstrument.

Die Keilriemenscheibe ist an der Rührerwelle gelagert. Auf das Wellenende ist eine Muffe mit horizontaler Nut aufgekeilt, deren untere Kante sich

auf den inneren Ring des oberen Wellenlagers stützt. In der Muffennut ist ein zur Übertragung des voraussichtlichen Moments geeignetes Federblatt eingespannt. Die beiden freien Enden der Feder stützen sich auf die auf die Keilriemenscheibe befestigten Wellenlager.

Das zum Drehen des Rührelements nötige Moment wird durch das Federblatt von der Keilriemenscheibe auf die Rührerwelle übertragen. Die durch

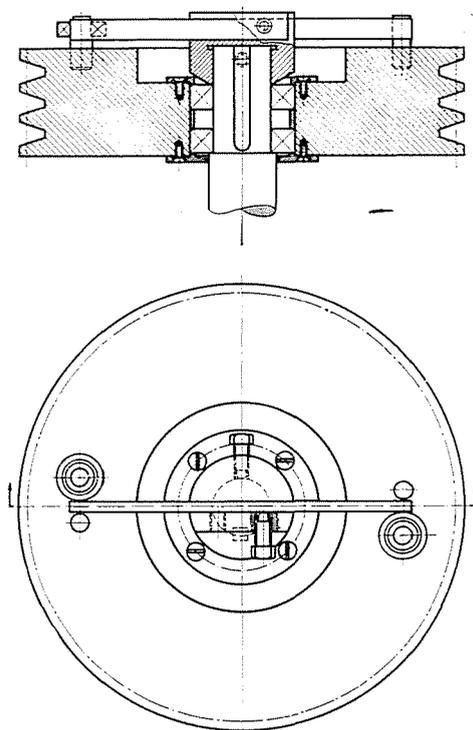


Abb. 9. Konstruktionszeichnung des Drehmomenten-Meßinstruments

Wirkung des Moments im Federblatt auftretenden Spannungen sind dem übertragenen Moment proportional.

Das Arbeitsprinzip des Momentenmeßinstruments beruht auf der Messung der im Federblatt auftretenden Spannungen. Diese Spannungen wurden mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen gemessen, die in der Nähe der Einspannung auf das Federblatt aufgeklebt wurden. Zur Erhöhung der Meßempfindlichkeit wurden die der Temperaturkompensation dienenden Meßstreifen ebenfalls auf das Federblatt aufgebracht. Durch diese kombinierte Lösung ließ sich im Verhältnis zur Messung mit einem einzigen Meßstreifen eine Vervielfachung der Empfindlichkeit erzielen. Die Dehnungsmeßstreifen deformieren sich unter der Einwirkung der Momente gemeinsam mit dem Federblatt und ändern daher ihren elektrischen Widerstand proportional zur Deformation.

Sie werden als Widerstände in eine *Wheatstonesche* Doppelbrücke geschaltet, die die der Dehnung proportionalen Widerstandsänderungen mißt, aus denen die Spannungen errechnet werden können. Unsere Messungen dienten der Ermittlung jener Momente, von denen die im Federblatt auftretenden Spannungen eigentlich hervorgerufen werden. Das Instrument muß also geeicht sein. Das Eichen erfolgte, indem die Rührerwelle gegen Verdrehungen fixiert

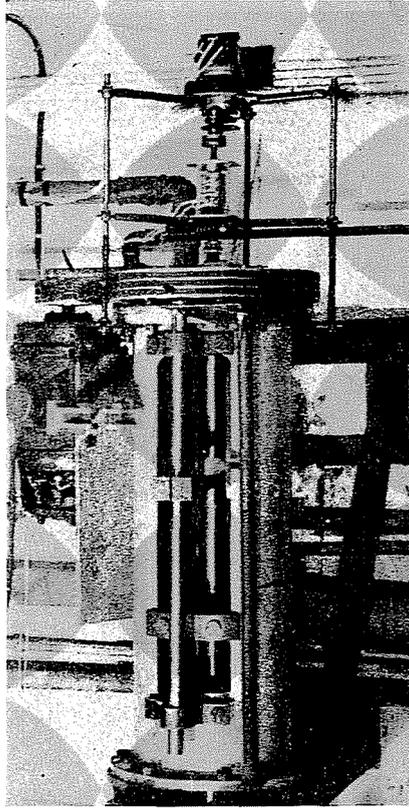


Abb. 10. Momentenmeßinstrument mit rotierendem Ausgangskontakt

und die Keilriemenscheibe mit einem bekannten Moment belastet wurde, so daß die spezifischen Dehnungen an der Dehnungsmeßbrücke gemessen werden konnten. Durch Wiederholung der Messungen für verschieden große Momente erhielten wir die Eichkurve des Instruments.

Die von den Dehnungsmeßstreifen am Rotationssystem ausgehenden Signale werden über einen rotierenden Ausgangskontakt an die Dehnungsmeßbrücke gelegt. Die durch den Übergangswiderstand der Kontakte sowie durch die Leitungssassymetrien verursachten Abweichungen werden an der Brücke kompensiert und verfälschen daher die Messung nicht.

Das auf die Keilriemenscheibe montierte Dehnungsmeßinstrument sowie

der angeschlossene rotierende Ausgangskontakt ist in *Abb. 10* dargestellt. Oberhalb des letzteren befindet sich ein Tachometerdynamo zum fortlaufenden Messen und Zählen der Drehzahl.

Die Abmessungen und Größenverhältnisse des Modellapparats, des Betriebsapparats sowie der Rührelemente wurden so gewählt, daß sie den Ähnlichkeitsbedingungen voll entsprachen. Die Kurven der im Modellapparat gemessenen Widerstandskoeffizienten erscheinen in den *Abb. 3, 5, 6, 7* als stetige Linien. In denselben Diagrammen sind die anhand der Betriebsversuche ermittelten Kurven aufgetragen, u. zw. der leichteren Unterscheidung halber punktiert. Auf Grund unserer Betriebsmessungen konnte nicht der gesamte Funktionszusammenhang durch dicht nebeneinander liegende Punkte aufgetragen werden, vielmehr vermochten wir lediglich einige Punkte des anhand der Modellversuche erhaltenen Funktionszusammenhanges zu kontrollieren. Die Abweichungen zwischen den am Modellapparat und den am Betriebsapparat auf Grund der Meßprotokolle und Kurven ermittelten Punkten wurden prozentuell ermittelt und die Ergebnisse in den *Tabellen I, II, III, IV* zusammengefaßt.

Aus den Tabellen kann festgestellt werden, daß die bei gleichen Parametern gemessenen Widerstandskoeffizientenwerte für den Modellapparat sowie für den Betriebsapparat praktisch gleich sind. Die abwechselnden Vorzeichen der Unterschiede lassen erkennen, daß die Meßpunkte Streuungen haben müssen. Diese Unterschiede lassen sich aber im Fall mehrerer Meßpunkte völlig beheben.

Die Ergebnisse unserer im Modellapparat sowie im Betriebsapparat durchgeführten Versuchsreihe bestätigen unsere Annahme, daß die am Modell-

Tabelle I  
(zu *Abb. 3*)

$Re$	$Fr$	$\xi$ aus Betriebs- messungen	$\xi$ aus Modell- messungen	Abweichun- gen von den Modell- meßwerten %
1 200	2,0	0,728	0,720	+1,11
1 465	3,0	0,583	0,590	-1,18
1 690	4,0	0,475	0,480	-1,04
12 000	2,0	0,273	0,280	-2,3
14 700	3,0	0,233	0,230	+1,3
16 890	4,0	0,201	0,197	+2,03
48 300	2,0	0,187	0,180	+3,89
58 990	3,0	0,160	0,155	+3,51
67 850	4,0	0,143	0,137	+4,38

Tabelle II  
(zu *Abb. 5*)

$Re$	$Fr$	$\xi$ aus Betriebs- messungen	$\xi$ aus Modell- messungen	Abweichun- gen von den Modell- meßwerten %
600	2,0	1,419	1,400	+1,35
1 200	2,0	1,010	1,050	-3,81
1 475	3,0	0,795	0,805	-1,24
1 688	4,0	0,645	0,670	-3,73
3 375	2,0	0,682	0,650	+4,93
5 000	3,0	0,464	0,470	-1,28
23 500	2,0	0,343	0,315	+8,9
29 500	3,0	0,279	0,260	+7,31
50 800	3,0	0,232	0,225	+3,11

Tabelle III

(zu Abb. 6)

Re	Fr	$\xi$ aus Betriebs- messungen	$\xi$ aus Modell- messungen	Abweichun- gen von den Modell- meßwerten o <sub>o</sub>
483	2,0	0,108	0,100	+0,8
591	3,0	0,793	0,820	-3,3
1 265	3,0	0,523	0,570	-8,25
4 760	3,0	0,322	0,335	-3,88
5 810	4,0	0,275	0,280	-1,78
6 250	2,0	0,331	0,345	-4,05
8 360	3,0	0,267	0,275	-2,91
22 140	3,0	0,194	0,200	-3,0
44 280	3,0	0,150	0,162	-7,41

Tabelle IV

(zu Abb. 7)

Re	Fr	$\xi$ aus Betriebs- messungen	$\xi$ aus Modell- messungen	Abweichun- gen von den Modell- meßwerten o <sub>o</sub>
585	2,0	1,360	1,380	-1,45
1 550	2,0	0,908	0,950	-4,43
2 010	3,0	0,690	0,700	-1,43
5 330	2,0	0,523	0,560	-6,60
6 810	3,0	0,417	0,430	-2,95
7 880	4,0	0,348	0,355	-1,87
12 950	2,0	0,405	0,410	-1,22
25 500	2,0	0,338	0,340	-0,59
40 250	2,0	0,298	0,300	-0,67

apparat gewonnenen Ergebnisse unter Anwendung der Ähnlichkeitstheorie und durch strengstes Einhalten der Ähnlichkeitsbedingungen auf Betriebsapparate beliebiger Abmessungen ohne Änderungen übertragen werden können. Jene Faktoren des Rührvorgangs, die auf theoretischem Weg nicht erfäßbar sind, können also durch Versuche an Modellapparaten ermittelt werden.

### Zusammenfassung

Zur Bestimmung des Leistungsbedarfs von Rührern muß man die Widerstandskoeffizienten der Rührelemente kennen. Die zahlenmäßigen Werte der Widerstandskoeffizienten lassen sich auf analytischem Weg nicht ermitteln, doch können sie bei Einhaltung der auf Grund der Ähnlichkeitstheorie und der dimensionsanalytisch ermittelten Kriterien durch Modellversuche bestimmt werden.

Versuche an den den Modellapparaten ähnlichen Betriebsapparaten zeigten, daß die für Modellapparate ermittelten Meßergebnisse ohne Änderungen auf die Betriebsapparate angewendet werden können.

### Schrifttum

1. BASS, E.: Vegyipari gépek. I. A vegyipari gépek elmélete. Bp. 1961.
2. PATTANTYUS, Á. G.: Gépész- és villamosmérnökök kézikönyve. II. Bp. 1961. 1413. p.
3. LIENERTH, A.: M. Kém. Lapja 12, 308 (1957).
4. VIMMER, L.: M. Kém. Lapja 15, 463 (1960).

L. VIMMER, Budapest XI., Sztoczek u. 2. II. 220, Ungarn.