

# Rotationsviskosimeter für landwirtschaftliche fluide Fördermedien

Dr.-Ing. M. Türk, KDT/Dipl.-Ing. H. Schmidt/Dr.-Ing. D. Dähre  
Forschungszentrum für Mechanisierung der Landwirtschaft Schlieben/Bornim der AdL der DDR

## Verwendete Formelzeichen

H	m	Zylinderhöhe
M	N · m	Drehmoment
n		Fließexponent
$n_D$	$\text{min}^{-1}$	Drehzahl
r	m	radiale Koordinate
$R_a$	m	Radius des Außenzylinders
$R_i$	m	Radius des Innenzylinders
$R_r$	m	repräsentativer Radius
Re		Reynoldszahl
V	$\text{dm}^3$	Füllvolumen
$\beta$		Radienverhältnis
$\dot{\gamma}$	$\text{s}^{-1}$	Schergeschwindigkeit
$\dot{\gamma}_N$	$\text{s}^{-1}$	Newtonsche Schergeschwindigkeit
$\eta_s$	Pa · s	Scheinviskosität
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	Dichte
$\tau$	Pa	Schubspannung
$\Omega$	$\text{s}^{-1}$	Winkelgeschwindigkeit des gedrehten Zylinders

## 1. Aufgabenstellung

Die experimentelle Bestimmung reproduzierbarer und auf praktische Förderprobleme übertragbarer Fließkurven ist eine der wichtigsten Aufgaben der angewandten Rheologie. Gerade dabei unterlaufen oftmals durch Nichtbeachtung der rheologischen Grundla-

Fortsetzung von Seite 567

gen oder durch unzulässige Vereinfachungen erhebliche Fehler. Die Kennzeichnung des Fließverhaltens ist die Voraussetzung zur Bemessung von Förderanlagen zum Gülle- oder Futtertransport [1, 2]. Bei der großen Breite der realen landwirtschaftlichen Fördermedien, die von reinviskosen Newtonschen Flüssigkeiten über sedimentierende fluide Medien mit Grobstoffen bis hin zu hochkonzentrierten Stoffen mit plastischem und oftmals auch thixotropem Fließverhalten reicht, kann ein Viskosimeter nicht allen Anforderungen gerecht werden. Aufgrund der zumeist vorhandenen grobdispersen Struktur sind nur Rohr- oder Rotationsviskosimeter spezieller Bauarten einsetzbar. Rotationsviskosimeter mit koaxialen Zylindersystem werden häufig angewendet, da der Meßaufwand geringer ist und auch zeitabhängige Prozesse beobachtet werden können. In Abhängigkeit vom Strukturaufbau, von den realen Belastungsverhältnissen im technischen Prozeß und der konkreten Meßaufgabe sind daher Geräte mit verschiedenen Einsatzgrenzen notwendig. Dabei sind stets folgende Grundvoraussetzungen zu erfüllen [3, 4]:

- laminare und stationäre Strömung mit parallelen Stromlinien
- Inkompressibilität und Unabhängigkeit des Fließverhaltens vom Druck
- Homogenität
- Haftung an den Begrenzungsflächen
- konstante Temperatur
- keine Endeffekte.

Natürlich können diese Bedingungen nicht alle in gleichem Maß erfüllt werden. Die Fehlereinflüsse müssen jedoch genau analysiert und in Abhängigkeit von der Zielstellung korrigiert werden. Die dann vorliegenden abso-

luten, d. h. vom Meßverfahren unabhängigen Fließkurven, können mit Hilfe geeigneter Fließmodelle approximiert werden. Über den Stand und die Erfahrungen beim Einsatz von Rotationsviskosimetern zur Untersuchung landwirtschaftlicher Fördermedien soll nachfolgend berichtet werden.

luten, d. h. vom Meßverfahren unabhängigen Fließkurven, können mit Hilfe geeigneter Fließmodelle approximiert werden. Über den Stand und die Erfahrungen beim Einsatz von Rotationsviskosimetern zur Untersuchung landwirtschaftlicher Fördermedien soll nachfolgend berichtet werden.

## 2. Beurteilung der Meßfehler

Die Bestimmung von Schubspannung und Schergeschwindigkeit als Punkte der absoluten Fließkurve  $\tau = f(\dot{\gamma})$  erfordert eine eindimensionale, stationäre und isotherme Scherströmung in einem anwendungsrelevanten Belastungsbereich. Als integrale Meßgrößen werden die Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$  des gedrehten Zylinders und das am Innenzylinder angreifende Drehmoment  $M(R_i)$  bestimmt. Zwischen den koaxialen Meßzylindern befindet sich die Meßsubstanz, und entsprechend ihrer Zähigkeit greifen an den Zylinderflächen Scherspannungen an. Diese werden z. B. durch Federelemente kompensiert und können integral als Drehmoment mechanisch oder elektrisch gemessen werden. Allgemein werden folgende Bauformen unterschieden (Bild 1):

- Searle-Typ mit angetriebenem Innenzylinder
- Couette-Hatschek-Typ mit angetriebenem Außenzylinder.

Schubspannung und Schergeschwindigkeit werden i. allg. auf den Außenradius des Innenzylinders  $R_i$  bezogen. Die Schubspannung ist vom Fließgesetz unabhängig:

$$\tau(R_i) = \frac{M}{2\pi R_i^2 H} \quad (1)$$

Die Schergeschwindigkeit läßt sich dagegen nur mit Kenntnis des Fließgesetzes exakt bestimmen. Zumeist wird daher in erster Näherung der Newtonsche Ansatz zugrunde gelegt:

$$\dot{\gamma}_N(R_i) = \frac{2\Omega}{1-\beta} \quad (2)$$

$$\beta = \left(\frac{R_i}{R_a}\right)^2; \quad \Omega = \frac{\pi n_D}{30}$$

Mit Hilfe der scheinbaren Fließkurve  $\tau(R_i) = f(\dot{\gamma}_N(R_i))$  und einer scheinbaren Fließfunktion ist anschließend die wahre Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}(R_i)$  zu bestimmen. Wird diese Rechnung versäumt, können erhebliche Fehler entstehen (Bild 2). Für die wichtigsten Fließgesetze existieren hierzu einfache Auswerteverfahren und Rechnerprogramme [6]. Die Bestimmung der Fließgrenze erfolgt ebenfalls nach einer vielfach erprobten Methodik, einer Kombination von Entspannungsversuch und nachfolgender rechnerischer Extrapolation [7].

Von besonderer Bedeutung ist die Erkennung, Deutung und Korrektur systematischer Meßfehler. Diese können durch folgende Ursachen hervorgerufen werden [3, 4, 5, 8]:

- Endeffekte
- Exzentrizität und fehlerhafte Koaxialität
- Dissipation

## 3. Zusammenfassung

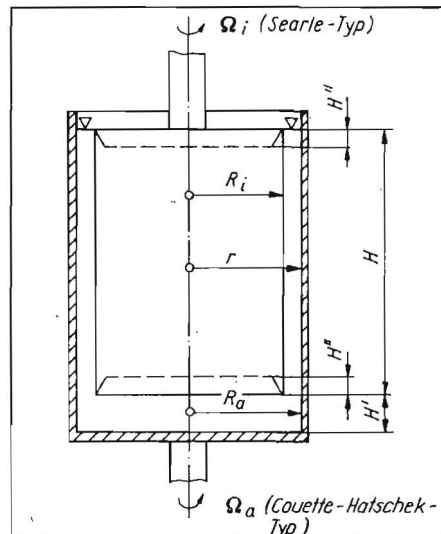
Das beschriebene Luftgeschwindigkeitsmeßgerät „Lumeg“ ist ein wichtiges Meßmittel zur qualitativen und quantitativen Bestimmung von Luftgeschwindigkeiten und Luftströmungen.

Durch die Erfassung von Geschwindigkeitsbereichen  $< 1 \text{ m/s}$ , die bisher durch mechanische Anemometer nicht möglich war, stellt dieses Gerät eine Ergänzung zur vorhandenen Prüf- und Meßtechnik dar. Nähere Informationen erteilt: Institut für Geflügelwirtschaft Merbitz, Abteilung Meßtechnik, Nauendorf (Saalkreis) 4107.

## Literatur

- [1] Strickert, H.: Hitzdraht- und Hitzfilmanemometer. Berlin: VEB Verlag Technik 1974.
- [2] Hofmann, D.: Temperaturmessungen und Temperaturregelungen mit Berührungsthermometern. Berlin: VEB Verlag Technik 1977.
- [3] Häußel, P.; Stopp, H.; Rolle, W.: Vorrichtung zur Erfassung von Strömungsverhältnissen in Gasen und Flüssigkeiten nach dem thermoelektrischen Prinzip mit Mantelthermoelementen. messen - steuern - regeln, Berlin 20 (1977) 8, S. 455-456. A 5081

Bild 1. Rotationsviskosimeter mit koaxialen Meßzylindern;  
Vorzugsmaße [5]:  
 $R_i/R_a \geq 0,9$ ,  $H \geq 3R_i$ ,  $H' = 3(R_a - R_i)$ ,  
 $H'' \geq 0,2R_i$



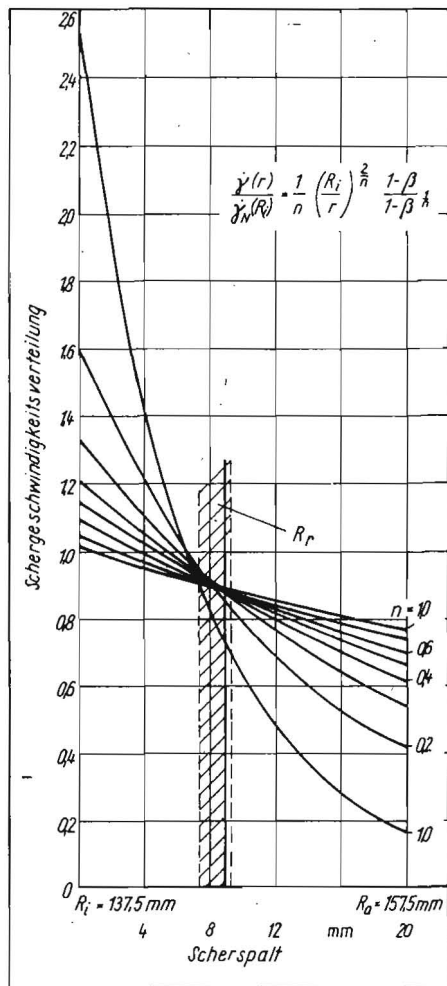


Bild 2. Schergeschwindigkeitsverteilung  $\dot{\gamma}(r)/\dot{\gamma}_w(R_i)$  im Rotationsviskosimeter großer Spaltweite bei pseudoplastischem Fließverhalten

- Zentrifugalkräfte beim Searle-Viskosimeter (sog. Taylorwirbel)
- Turbulenz
- Sedimentation
- Wandgleiteneffekte
- Zeit- und Belastungsabhängigkeit
- zu geringe Spaltweiten bei grobdispersen Medien
- Lagerreibung o. a. gerätebedingte Ursachen.

Grundsätzlich muß man Quasihomogenität und einen isotropen Strukturaufbau des Meßmediums voraussetzen. Fließanomalien, wie Thixotropie [9], Wandgleiteneffekte, erfordern spezielle Versuchsmethoden oder Gerätegestaltungen. So haben sich Sägezahnprofile der Innen- und Außenzylinder [10, 11] für alle landwirtschaftlichen Fördermedien als zweckmäßig erwiesen.

Erhebliche Meßfehler können durch Endeffekte, d. h. im wesentlichen durch Bodenreibung, entstehen. Diese zusätzliche Reibung kann durch eine experimentell bestimmte fiktive Zylinderhöhe berücksichtigt werden [3]. Oftmals werden auch Schutzringe oder Zusatzzylinder verwendet. Bewährt haben sich Innenzylinder mit eingezogenem Boden, unter dem sich ein Luftpolster ausbildet, das die Bodenreibung verhindert.

Im Rotationsviskosimeter erfolgt durch Dissipation, besonders bei hohen Schergeschwindigkeiten und Langzeitbelastungen, eine Temperaturerhöhung des Meßgutes. Daher

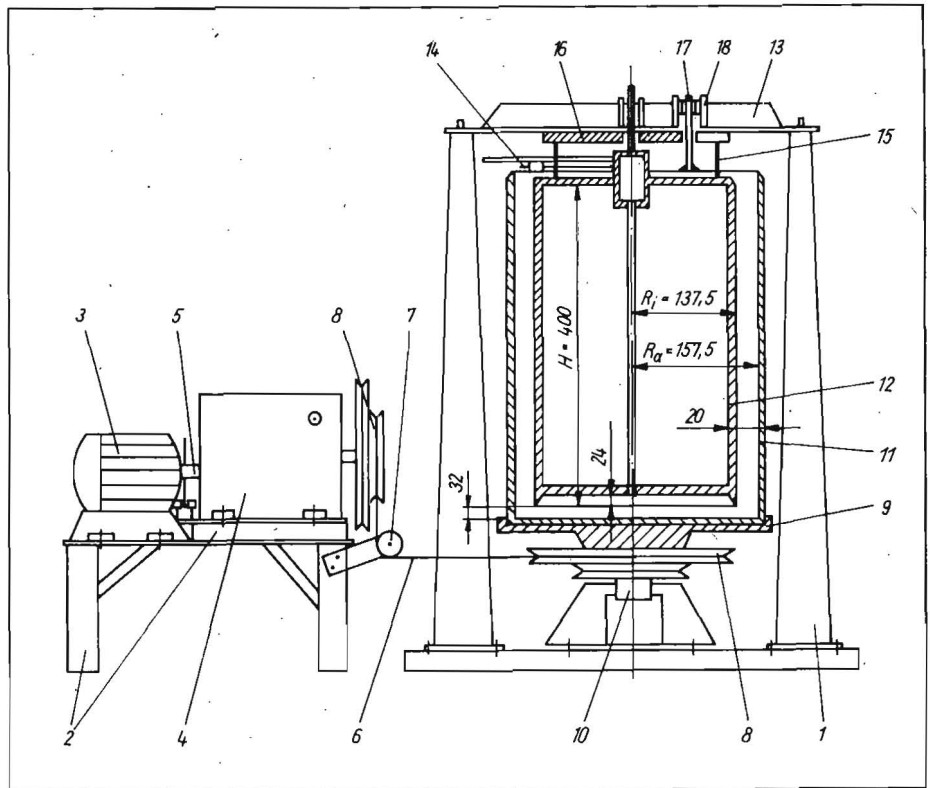


Bild 3. Prinzipdarstellung des Rotationsviskosimeters großer Spaltweite; 1 Grundrahmen, 2 Gestell des Antriebs, 3 Motor, 4 Schaltgetriebe, 5 Drehzahlmeßeinrichtung, 6 Keilriemen, 7 Umlenkrolle, 8 Keilriemenscheiben, 9 Aufsatzteller für Außenzylinder, 10 Lager, 11 Außenzylinder, 12 Innenzylinder, 13 Innenzylinderbrücke, 14 Luftkanal, 15 Federstäbe, 16 Befestigungsplatte, 17 Geberstift, 18 induktiver Wegsensor

Tafel 1. Kennzeichnung der Rotationsviskosimeter für landwirtschaftliche Fördermedien

Merkmal	Rotationsviskosimeter <sup>1)</sup>		
	RVG	RVL	Rheotest RV2
Meßprinzip	Couette-Hatschek		Searle
Hersteller	Eigenentwicklung FZM Schlieben/Bornim		VEB Prüfgerätewerk Medingen
$R_i$	mm 137,5	40...46	16,1 ...19,6
$R_o$	mm 157,5	50	20
$R_i/R_o$	0,87	0,80...0,92	0,81 ...0,98
$R_o - R_i$	mm 20	4 ...10	3,9 ...0,4
H	mm 400	127,5	72
$H/R_i$	2,9	2,8 ...3,2	3,7 ...4,5
V	dm <sup>3</sup> 20	0,75...0,80	0,025...0,050
Zylinderoberfläche	gezahnt (3 mm)	gezahnt (3 mm)	glatt
Temperierbarkeit	nein	ja	ja
$\dot{\gamma}_w$	s <sup>-1</sup> 0...100	0,2 ...352	0,17 ...1 312
$\Omega$	s <sup>-1</sup> 0...12	0,04...16,6	0,06 ...25,4
$\Omega_{krit}$ (Wasser)	s <sup>-1</sup> 0,73	4,6 ...11,5	1,5 ...37,1 (Taylorwirbel)
Getriebeabstufung	stufenlos	3 × 12	2 × 12
TS-Meßbereich Gülle	% 6...20	3...15	3 ...15
max. Korngröße	mm 10	2...5	0,1...1,0

1) RVG Rotationsviskosimeter großer Spaltweite, RVL Labor-Rotationsviskosimeter

sind häufig Temperiermöglichkeiten vorhanden, oder es erfolgen regelmäßige Temperaturmessungen zur rechnerischen Korrektur [12]. Analog zur Rohrströmung existieren auch Stabilitätsgrenzen hinsichtlich turbulenter Strömungsercheinungen. Wird der Außenzylinder gedreht, liegt eine wesentlich stabilere Laminarströmung als beim Searle-Typ vor. Daher ist der Couette-Hatschek-Typ die bevorzugte Bauart für landwirtschaftliche Fördermedien mit großem Viskositätsbereich. Als Grenze des Laminarbereichs kann man folgendes Kriterium ansetzen [8]:

$$Re_{krit} = \frac{\Omega \rho}{\eta_s} R_o^2 \left( 1 - \frac{R_i}{R_o} \right) = 1900 \dots 2300 \quad (3)$$

Damit läßt sich die kritische Winkelgeschwindigkeit (Tafel 1) errechnen. Völlig andere Strömungsverhältnisse liegen bei angetriebenem Innenzylinder des Searle-Typs vor. Hier erfolgt aufgrund der wirkenden Zentrifugalkräfte eine instabile Schichtung, da die Flüssigkeitsteilchen in der Nähe des Innenzylinders das Bestreben haben, nach außen zu gelangen. Es entstehen die sog. Taylorwirbel, d. h. paarweise gegensinnig rotierende Wirbel, die senkrecht auf der Richtung der Grundströmung stehen [8]. Diese sog. Zellularströmung tritt bereits bei geringen Reynoldszahlen auf und geht allmählich in die turbulente Strömung über. Daher kann man folgendes Stabilitätskriterium für Searle-Viskosimeter annehmen [13]:

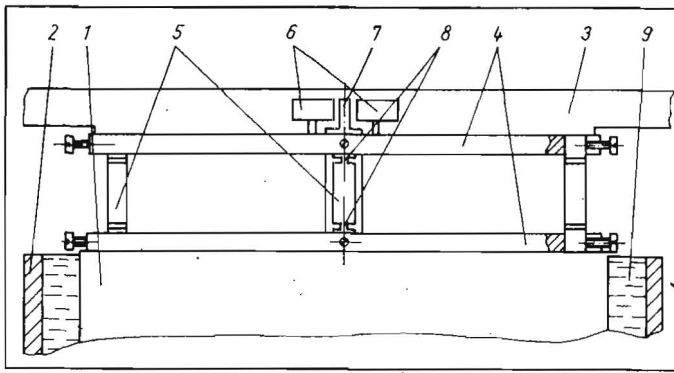


Bild 4  
Prinzipdarstellung der Kraftmomentmessung am Innenzylinder;  
1 Innenzylinder, 2 rotierender Außenzylinder, 3 starres Gerätegestell, 4 Befestigungsplatte, 5 Federstab, 6 induktiver Wegsensor, 7 Geberstift am Innenzylinder, 8 Federgelenk, 9 Meßmedium

$$Re_{krit} = \frac{\Omega_0}{2n_s} R_i^2 \times \frac{1}{\beta} - 1 = 100. \quad (4)$$

Daraus ergeben sich die kritischen Winkelgeschwindigkeiten für das Rotationsviskosimeter vom Typ Rheotest (Tafel 1). Weitere systematische Fehler, wie Einflüsse durch Lagerreibung oder Drehzahlschwankungen, sind durch sorgfältige Kalibriermessungen und Vergleichsuntersuchungen mit anderen Meßsystemen zu erkennen und zu korrigieren.

### 3. Meßgeräte

Die Kennzeichnung der zur Untersuchung landwirtschaftlicher fluider Medien angewendeten Rotationsviskosimeter erfolgt in Tafel 1. Als Standardmeßgerät wird seit Jahren ein Rotationsviskosimeter vom Couette-Hatschek-Typ verwendet, das durch die Dimensionierung der Meßzylinder ( $R_a - R_i = 20 \text{ mm}$ ) an die besonderen Eigenschaften grobstrukturierter Stoffe, wie Gülle oder Flüssigfüttermischungen, angepaßt ist (Bild 3). Dieses sog. „Rotationsviskosimeter großer Spaltweite“ wurde bereits 1968 von Tschierschke [11] beschrieben und hat sich vielfach bewährt. Unter Beibehaltung der geometrischen Abmessungen wurden jedoch Antrieb und Meßtechnik verändert. Der Außenzylinder wird über eine Schalt-Reibringgetriebe-Kombination und Keilriemen mit stufenlos stellbarer Drehzahl  $n_0$  angetrieben. Diese läßt sich mit Hilfe einer fotoelektrischen Meßeinrichtung (Schlitzscheibe, Fotozelle, Impulszählgerät) exakt bestimmen. Der Meßbereich wird durch die Fliehkräfte begrenzt. Der Innenzylinder ist über konzentrisch angeordnete Federstäbe mit dem Gerätegestell fest verbunden (Bild 4). Diese Federstäbe haben zugleich die Aufgabe von Lagerungs-, Zentrierungs- und Rückstellelementen und vermeiden Fehler durch Lagerreibung und parasitäre Belastungen [14]. Dadurch wird eine weitgehend weglose Kraftmomentmessung mit induktivem Wegsensor ermöglicht. Zeitabhängige Verformungen können aufgezeichnet werden, wie z. B. bei Entspannungsversuchen [7] oder thixotropen Medien [9]. Die Anzahl der Federstäbe bestimmt die Meßeempfindlichkeit, und es wird eine optimale Anpassung an das zu untersuchende Fördermedium ermöglicht. Zur Vermeidung der Bodenreibung wird unter dem eingezogenen Boden des Innenzylinders ein Luftpolster erzeugt, das ständig nachgefüllt werden kann. Mit diesem Meßgerät erfolgten z. B. die mei-

sten Versuche mit trockensubstanzreicher Gülle für den Bemessungskatalog [2]. Das Rotationsviskosimeter großer Spaltweite ist für niedrigviskose disperse Flüssigkeiten, wie z. B. Schweinegülle mit einem Trockensubstanzgehalt  $TS < 6\%$  oder Faulschlamm, aufgrund der auftretenden Sedimentation und Turbulenzerscheinungen nicht mehr geeignet.

Zur Erweiterung des Meßbereichs wurde ein temperierbares Labor-Rotationsviskosimeter für grobdisperse Fluide entwickelt, das ebenfalls einen angetriebenen Außenzylinder hat (Bild 5). Der Innenzylinder ist auswechselbar. Die Drehzahl des im temperierbaren Wasserbad laufenden Außenzylinders kann mit Hilfe eines Schaltgetriebes in  $3 \times 12$  Stufen variiert werden. Dadurch wird eine genügend feine Untersetzung erreicht. Die Kraftmomentmessung erfolgt analog zum Rotationsviskosimeter großer Spaltweite mit induktivem Wegsensor am Innenzylinder, der mit Federstäben am Gerätegestell befestigt ist. Dieses Meßgerät ist ebenfalls für alle hochviskosen landwirtschaftlichen Fördermedien, die Grobstoffe  $< 5 \text{ mm}$  beinhalten, geeignet. Schließlich können alle grobstofffreien und homogenen viskosen Flüssigkeiten mit dem Searle-Viskosimeter „Rheotest RV2“ vom VEB Prüfgerätewerk Medingen untersucht werden, wobei die richtige Auswahl des Meßspaltes von großer Bedeutung ist. Der große Meßbereich ist für alle fördertechnischen Fragen hinreichend geeignet. Besonders günstig sind die einfache Handhabbarkeit und die Möglichkeit der Messung temperatur- und zeitabhängiger Fließkurven.

### Literatur

- [1] Türk, M.: Das Fließverhalten von trockensubstanzreicher Schweinegülle. agrartechnik, Berlin 36 (1986) 1, S. 31–33.
- [2] Türk, M.; Eckstädt, H.: Bemessungskatalog für Güllendruckrohrleitungen – Berechnungsgrundlagen und Tabellen. Arbeiten zur Mechanisierung der Pflanzen- und Tierproduktion, Schlieben/Bornim 4 (1987) 19, S. 1–172.
- [3] Reher, E.-O., u. a.: Studienmaterial zur technischen Rheologie und Verarbeitungstechnik. Technische Hochschule „Carl Schorlemmer“ Leuna-Merseburg 1981.
- [4] Dähre, D.: Einsatz und Vergleich von Viskosimetern zur Untersuchung von trockensubstanzreicher Gülle sowie Fehleranalyse des Rotationsviskosimeters großer Spaltweite. Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Diplomarbeit 1982.

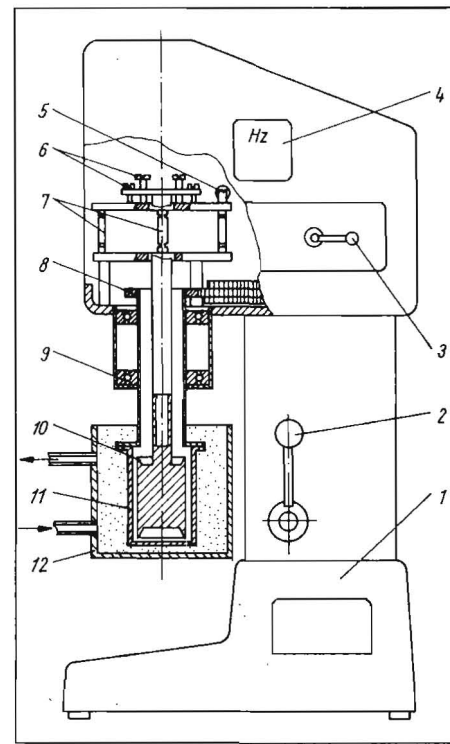


Bild 5. Labor-Rotationsviskosimeter vom Couette-Hatschek-Typ;  
1 Gerätegestell, 2 12-Stufen-Getriebe, 3 3-Stufen-Getriebe, 4 Frequenzmesser, 5 berührungsloser induktiver Wegsensor zur Kraftmomentmessung, 6 Justierschrauben zur Zentrierung des Innenzylinders, 7 Federstäbe mit 2 Federgelenken, 8 Zahnrad zum Antrieb des rotierenden Außenzylinders, 9 Lagerung des Außenzylinders, 10 Innenzylinder, 11 Außenzylinder, 12 Temperiergefäß

- [5] DIN 53019 Viskosimetrie; Messung von Viskosität und Fließkurven mit Rotationsviskosimetern mit Standardgeometrie, Teil 1. Ausg. Mai 1980.
- [6] Dähre, D.; Türk, M.: Vereinfachte Auswertemethode von Rotationsviskosimeter-Meßdaten bei der Untersuchung plastischer Substanzen. FZM Schlieben/Bornim, Manuskript 1987.
- [7] Türk, M.: Bestimmung der Fließgrenze von Gülle. agrartechnik, Berlin 35 (1985) 10, S. 472–474.
- [8] Hengstenberg, J., u. a.: Messen und Regeln in der chemischen Technik. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag 1964.
- [9] Dähre, D.: Untersuchungen zum zeitabhängigen Fließverhalten trockensubstanzreicher Rindergülle und die Anwendung auf die Rohrströmung. Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Dissertation 1986.
- [10] Fincke, H.; Heinz, W.: Zur Bestimmung der Fließgrenze grobdisperser Systeme. Rheologica Acta, Darmstadt 1 (1961) 4/6, S. 530–538.
- [11] Tschierschke, M.: Rotationsviskosimeter für grobdisperse Suspensionen. Archiv für Landtechnik, Berlin 7 (1968) 1, S. 91–100.
- [12] Türk, M.: Temperatureinfluß auf das Fließverhalten von Gülle. agrartechnik, Berlin 36 (1986) 12, S. 558–559.
- [13] Tillmann, W.: Zum Reibungsmoment der turbulenten Strömung zwischen rotierenden Zylindern. Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens, Düsseldorf 27 (1961) 6, S. 189–194 (Ausgabe B).
- [14] Schmidt, H.; Türk, M.; Dähre, D.: Rotationsviskosimeter. WP-Anmeldung G 01 N/280 013/6 vom 27. August 1985. A 5031