

aber 40 t/h betragen, einfach aus dem Grund, weil bei einem längeren Aufenthalt der Arbeitskraft und des Transportfahrzeuges am Silo die gesamte Verfahrensleistung sinken würde. D.h. im ersten Fall (Kipper – Dosierer) müßten für den Gebläseantrieb etwa 10 kW und im zweiten Fall (Selbstentladewagen) etwa 30 kW bereitgestellt werden. Sofern im zweiten Fall mit Schlepperdurchtrieb gearbeitet wird, steht diese Antriebsleistung zur Verfügung.

Auch der Vergleich der beiden 2reihigen Verfahren zeigt deutlich, daß bei Verwendung einer Dosierstation die erforderliche Einlagerungsleistung niedriger ist als bei Verwendung von Selbstentladewagen. Sie liegt im ersten Fall bei etwa 18 t/h und benötigt dazu eine Antriebsleistung von etwa 18 kW und beim Einsatz von Selbstentladewagen 36 t/h mit einer Antriebsleistung von etwa 24 kW.

Aus diesen Beispielen wird deutlich, daß die mit Hochleistungssilobefüllgebläsen erreichbaren Einlagerungsleistungen immer genügen. Um die notwendigen Antriebsleistungen zur Verfügung zu stellen, ist jedoch u.U. der Schlepperzapfwellenantrieb erforderlich.

### Schrifttum

- [ 1 ] *Duffee, F.W. et al.:* M.F. Projekt 406 – Hay harvesting machinery – Blowers, Agricultural Engineering Department, University of Wisconsin, Madison 1955.
- [ 2 ] *Segler, G., G. Ackermann u. K. Keuneke:* Untersuchungen an Fördergebläsen mit Einschleusung durch das Schaufelrad. Landtechnische Forschung Bd. 9 (1959) Nr. 4, S. 89/96.
- [ 3 ] *Kampf, G.:* Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Wurfgebläsen. VDI-Forschungsheft 466, Düsseldorf: VDI-Verlag 1958.
- [ 4 ] *Matthies, H.J. u. H. Breustedt:* Wurf Förderung und pneumatische Förderung bei Gebläsehäckslern. Landtechnische Forschung Bd. 2 (1952) Nr. 1, S. 14/17.

Art und Ausstattung des Verfahrens		notwendige		Verfahrensleistung
		Förderleistung	Förderdauer	
		t/h	min	t/h
Feldhäcksler- arbeitsbreite		Anzahl der Arbeitskräfte		
1. Feldhäcksler + Kipper-Anhänger + Dosiertisch*)				
1reihig	1 AK	7	60	5
2reihig	2 AK	18	60	13
3reihig	3 AK	50	60	37
2. Feldhäcksler + Selbstentladewagen				
1reihig	1 AK	40	2 x 6	5
2reihig	3 AK	36	4 x 6	15

\*) nach *Auernhammer*

**Tafel 1.** Aufwand und Leistung bei verschiedenen Verfahren der Silomaiserte und -einlagerung.

- [ 5 ] *Gluth, M.:* Untersuchungen zur Wurfgebläseförderung. VDI-Forschungsheft 544, Düsseldorf: VDI-Verlag 1971.
- [ 6 ] *White, R.G.:* Selecting a forage harvesting system. Information Series Nr. 225, (1968) Dept. of Agr.-Eng., East Lansing Mich.
- [ 7 ] *Kromer, K.-H.:* Mechanisierung der Futterwirtschaft in den USA. Grüne Schriftenreihe der Landtechnik Weihenstephan, 13 (1971).
- [ 8 ] *Meyer, H.:* Die Bedeutung eines stufenlosen Getriebes für den Ackerschlepper und seine Geräte. Grundl. Landtechnik H. 11 (1959) S. 5/12.

## Das rheologische Verhalten von Flüssigmist in Kanal- und Rohranlagen

Von **Heinz Stuhmann, Gießen\***

DK 636.083.1:631.862:532.135

Die Zunahme der einstreulosen Haltungsverfahren im Bereich der tierischen Produktion macht theoretische Betrachtungen als auch experimentelle Untersuchungen an Flüssigmist notwendig. Die Versuche über das rheologische Verhalten von Flüssigmist bilden dabei die Grundlage für die Auslegung und Bemessung von Flüssigmistanlagen.

Mit der vorliegenden Arbeit wird versucht, das Problem des Fließverhaltens von Flüssigmist sowohl theoretisch als auch durch praktische Versuche zu erfassen. Dabei ist die Rheometrie mittels Rotationsviskosimeter der Ausgangspunkt für die theoretischen Ansätze und die Modellversuche. Der Flüssigmist läßt sich als eine strukturviskose Substanz, die eine Fließgrenze  $\tau_0$  aufweist, charakterisieren und mathematisch durch den Bingham- bzw. Casson-Ansatz voll beschreiben.

\*) *Dipl.-Ing. Heinz Stuhmann ist wissenschaftlicher Assistent am Institut für Landtechnik (Direktor: Prof. Dr. H. Eichhorn) der Justus Liebig-Universität Gießen.*

### 1. Einleitung

Kanalanlagen für Flüssigmist werden in ihren Abmessungen durch verschiedene Parameter bestimmt. So z.B. durch die Aufstellungsart der Tiere, die Tierzahl, den Ort der Flüssigmistlagerung und die Investitionskosten bei der Erstellung der Kanalanlagen. Die Ermittlung der Abmessungen funktions sicherer Kanalanlagen, aber auch die der Rohrleitungen bei der Zwangsförderung ist nur durch die Anwendung hydrodynamischer und rheologischer Gesetze, die für den Flüssigmist Gültigkeit haben, zu gewährleisten. Es sind dabei folgende Gleichungen anzuwenden:

Für die Erhaltung der Masse gilt in allgemeiner Schreibweise

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \nabla \cdot \rho \vec{v}$$

Bei einer stationären, inkompressiblen Strömung reduziert sich diese Gleichung zu

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0$$

Die Bewegungsgleichung, die gleichfalls zur Anwendung gelangt, lautet in ihrer allgemeinen Schreibweise

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) = - \nabla \cdot \rho \vec{v} \vec{v} - \nabla \cdot \sigma + \rho \vec{g}$$

Durch die Einführung des *Newtonschen* Ansatzes und bei der Annahme der Konstanz der Stoffwerte ergibt sich daraus:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla \cdot \vec{v} = -\nabla p + \eta \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g}.$$

Diese angeführten Differentialgleichungen wären für einen Flüssigmistkanal und die Zwangsförderung aufzustellen und zu lösen, wobei die Wahl des Koordinatensystems nach der Zweckmäßigkeit zu erfolgen hätte: beispielsweise für Rohranlagen Zylinderkoordinaten und für Rechteck-Kanäle kartesische Koordinaten. Für die Anwendung ergeben sich dabei aber gleich zwei Einschränkungen:

1. Die vorstehende Differentialgleichung ist in dieser Form bisher nicht geschlossen lösbar.
2. Wenn die Lösbarkeit gegeben wäre, müßte aber immer noch die dynamische Viskosität  $\eta$  als bekannt und konstant vorausgesetzt werden.

Hieraus läßt sich folgern, daß zunächst die Stoffwerte des Flüssigmistes, wie z.B. dynamische Viskosität  $\eta$  und Grenzschubspannung  $\tau_0$  bekannt sein müssen, um Berechnungen durchführen zu können. Darüber hinaus aber ist es von Bedeutung, welches Verhalten insgesamt der Flüssigmist bei einer Beanspruchung aufweist, wie z.B. Strukturviskosität und Zeitverhalten. Aussagen hierüber kann man durch die Anwendung der Rheometrie gewinnen.

## 2. Rheometrie des Flüssigmistes

Zur Bestimmung von Stoffwerten sind umfangreiche Untersuchungen durchgeführt worden. Wesentlich bei rheometrischen Untersuchungen ist es, daß eine Beanspruchung unter definierten Bedingungen stattfindet. So wird in einem Rotationsviskosimeter eine stationäre parallele Schichtenströmung erzeugt, deren Schubspannungsverteilung über die Schichtdicke bekannt ist.

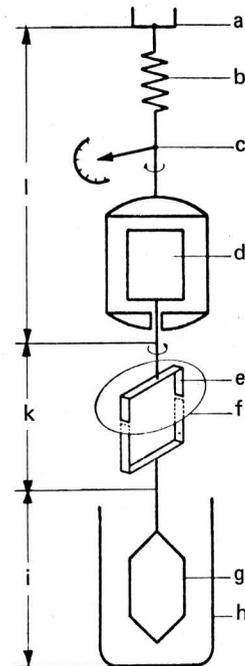
Da das Fließverhalten von Flüssigmist nicht durch einen Stoffwert allein zu beschreiben ist, sondern, wie auch bereits *Lommatzsch* [1] und *Seufert* [2] erkannt haben, zwei Stoffparameter, nämlich die Grenzschubspannung  $\tau_0$  und die Viskosität  $\eta$ , das Fließverhalten bestimmen, ist für die Rheometrie nur die Anwendung eines Rotationsviskosimeters möglich.

Das Kegel-Platte-System hat, obwohl mit ihm eine weitere Stoffgröße bestimmbar ist, gegenüber dem *Couette*-System bzw. *Searl*-System den Nachteil einer nur geringen zu verwendenden Probenmenge.

### 2.1 Versuchsaapparatur

Für die Untersuchungen ist ein Rotationsviskosimeter, **Bild 1**, mit Programmgeber und Schreiber der Fa. Contraves verwendet worden. Dieses Gerät erlaubt es auch, ein Zeitverhalten der zu untersuchenden Substanzen zu ermitteln.

Die Meßeinrichtung besteht aus einem Rotor von 30 mm  $\phi$  und einem zugehörigen Meßbecher von 38 mm  $\phi$ , so daß ein Spalt von 4 mm vorhanden ist. Die Einfüllmenge des Meßsystems beträgt 80 cm<sup>3</sup>. Zum Meßgerät gehört ein Getriebe für 30 verschiedene Drehzahlen in geometrischer Abstufung von 0,048 min<sup>-1</sup> bis 350 min<sup>-1</sup> sowie ein Programmgeber mit dem die Drehzahlsteigerung vorprogrammiert werden kann. Das Gerät erlaubt Messungen in einem Viskositätsbereich von  $1 \cdot 10^{-3}$  bis  $1,7 \cdot 10^7$  Pa s, in einem Schergeschwindigkeitsbereich von  $1,2 \cdot 10^{-2}$  bis  $4 \cdot 10^3$  s<sup>-1</sup> und einem Schubspannungsbereich von 0,6 bis  $2,1 \cdot 10^5$  Pa. Wesentlich für die Auswahl des Gerätes war ferner die Möglichkeit, ein geringes Schergeschwindigkeitsgefälle durchfahren zu können, um damit annähernd die Verhältnisse in einem Flüssigmistkanal zu simulieren. Die ermittelten Stoffwerte haben auch nur Gültigkeit für diesen Bereich der Beanspruchung.



**Bild 1.** Prinzipdarstellung des verwendeten Rotationsviskosimeters.

a Aufhängung	f Dichtung
b Torsionsfeder	g Meßkörper
c Zeiger	h Meßbecher
d Synchronmotor	i Meßzelle
u. Getriebe	k Magnetkupplung
e Magnet	l Drehmomentmesser

### 2.2 Versuchsergebnisse

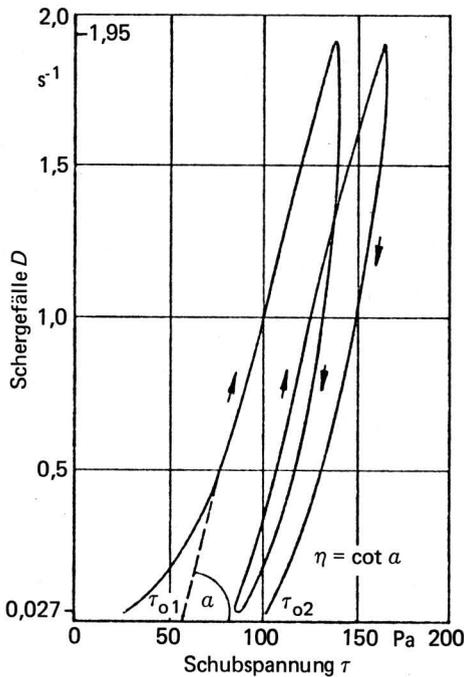
Für die direkt aus den Flüssigmistkanälen entnommenen Proben ergab sich im Viskosimeter das in **Bild 2** dargestellte Verhalten.

Das machte es notwendig, das Meßverfahren zu modifizieren. Es bot sich dabei in Anlehnung an eine für thixotrope Substanzen bewährte Methode, nämlich die  $\tau_0$ -GGG-Methode [3], folgende Vorgehensweise an. Zunächst Beanspruchung bis zum maximalen Schergefälle, dann 2minütiges Halten bei dieser Beanspruchung mit nachfolgender Entlastung sowie einem nochmaligen Auf- und Abfahren zur Kontrolle, **Bild 3**. Die Länge der Haltezeit von 2 min wurde dabei empirisch ermittelt.

Bei allen ca. 350 Proben, die geprüft wurden, zeigte sich eine Fließgrenze, aber ebenso das strukturviskose Verhalten. Auch eine Veränderung der Flüssigmisttemperatur auf ca. +1 °C ergab zwar dem Betrag nach andere Werte, aber kein verändertes Verhalten. Gleiches gilt für eine Verringerung des Trockensubstanzgehaltes durch Zugabe von destilliertem Wasser. Die Lagerung dieser verdünnten Proben erbrachte ebenso keine Änderung im grundsätzlichen Verhalten.

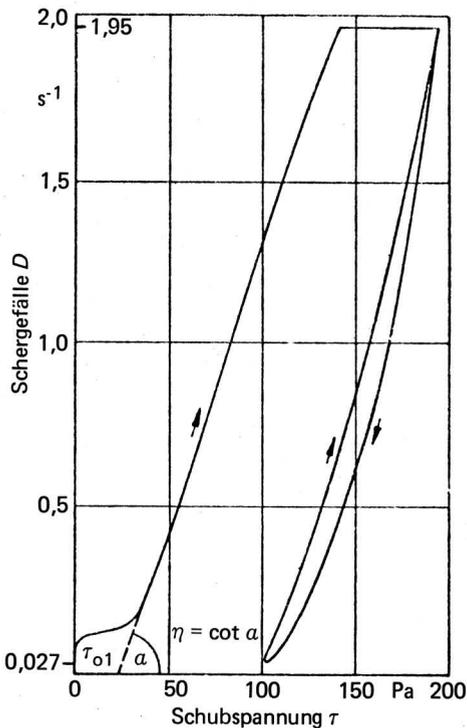
Es ist lediglich zwischen festeren und flüssigeren Proben ein Unterschied in der Krümmung der Kurven feststellbar, d.h. bei den festeren Proben (größeres  $\tau_0$ ) tritt mit zunehmender Beanspruchungshöhe und -zeit strukturviskoses Verhalten auf.

Dieses bedeutet, daß der Flüssigmist dünnflüssiger wird, wenn er einer steigenden Beanspruchung unterliegt. Eine Überprüfung, ob die Ergebnisse unabhängig vom gewählten Meßsystem sind, erfolgte durch Verwenden eines größeren Meßbechers und Meßkörpers. Bei einem Durchmesser von 44 mm für den Rotor und 56 mm für den Meßbecher hat dieses Meßsystem eine Spaltweite von 6 mm. Es war damit kein Einfluß des Meßsystems nachweisbar, wenn die notwendigen Umrechnungsfaktoren bezüglich Drehmoment und Schergefälle berücksichtigt wurden.



**Bild 2.** Fließkurvenverlauf von Flüssigmist bei der in Pfeilrichtung durchgeführten Beanspruchung im Rotationsviskosimeter. Die ermittelten Hysteresen deuten auf ein rheopexes Verhalten des Flüssigmistes hin.

$$\begin{aligned} \tau_{o1} &= 60,3 \text{ Pa} & \eta_1 &= 50,6 \text{ Pa s} \\ \tau_{o2} &= 102 \text{ Pa} & \eta_2 &= 32,9 \text{ Pa s} \end{aligned}$$



**Bild 3.** Im Rotationsviskosimeter ermittelte Fließkurve von Flüssigmist bei modifizierter Beanspruchung. Auch hier zeigen die Hysteresen das rheopexe Verhalten des Flüssigmistes.

$$\begin{aligned} \tau_{o1} &= 23,3 \text{ Pa} & \eta_1 &= 61,2 \text{ Pa s} \\ \tau_{o2} &= 104 \text{ Pa} & \eta_2 &= 46,3 \text{ Pa s} \end{aligned}$$

Bei der Versuchsdurchführung ist es von wesentlicher Bedeutung, daß die Scherung über die gesamte Spaltbreite erfolgt, um die definierten Bedingungen aufrecht zu erhalten. So ist es z.B. in einem

unendlich ausgedehnten Gefäß nicht möglich, das Schergefälle anzugeben und damit auch nicht die Viskosität des Materials. Das heißt aber auch, daß durch einfaches Bewegen eines Rotors im Flüssigmist keine Fließkurven ermittelt werden können.

Es ist eine Abhängigkeit der Grenzschubspannung vom Trockensubstanzgehalt gegeben, aber nur in einem weiten Bereich, so daß nicht jedem Trockensubstanzgehalt nur ein Grenzschubspannungswert zugeordnet werden kann.

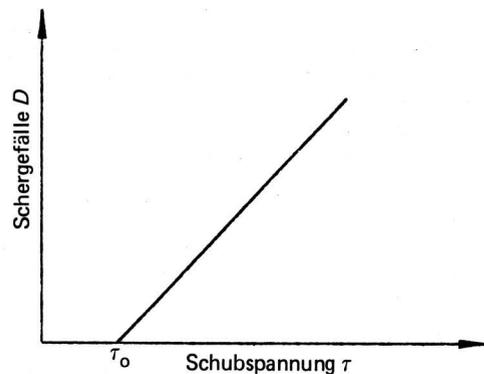
Der Trockensubstanzgehalt der unbehandelten Proben lag zwischen 11 % und 18 %. Dabei lagen die  $\tau_o$ -Anfangswerte zwischen 26,2 Pa und 276 Pa, während die  $\tau_o$ -Endwerte im Bereich von 97 Pa bis 383 Pa zu finden waren. Die zugehörigen Viskositätswerte überdecken den Bereich von 20 Pa s bis 160 Pa s.

Eine Abhängigkeit der Stoffparameter  $\tau_o$  und  $\eta$  von der Temperatur ist, wie zu erwarten war, vorhanden, jedoch weisen die ermittelten Werte große Streuungen auf. Eine exakte Beziehung für diese Temperaturabhängigkeit läßt sich daher noch nicht angeben. Es gehören dazu noch weitere Untersuchungen.

### 3. Theoretische Ansätze für Flüssigmist

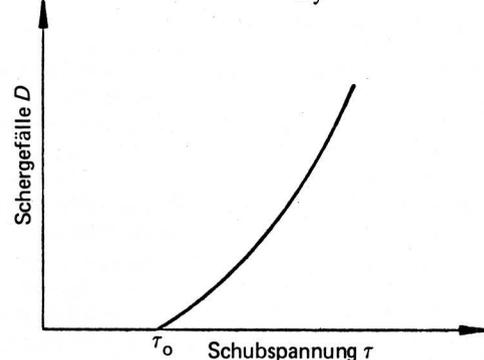
Flüssigmist ist also unter bestimmten Voraussetzungen, wie sie beispielsweise in der Praxis auftreten, bei den strukturviskosen Flüssigkeiten einzuordnen, darüber hinaus aber in der Lage, geringe Schubspannungen im Ruhezustand aufzunehmen (Fließgrenze).

Deshalb ist Flüssigmist mit einer Bingham-Substanz vergleichbar, wenn nicht auch noch strukturviskose Anteile vorhanden sind. Von den allgemein bekannten Ansätzen für Fließgesetze wie der von Newton, der Potenzansatz, der sinh-Ansatz oder auch der Polynomansatz von Rabinowitsch ist keiner auf den Flüssigmist anwendbar. Hier können nur der Bingham-Ansatz bzw. der Casson-Ansatz Anwendung finden, Bild 4.



**Bild 4.** Fließkurve für eine Bingham-Substanz, idealplastisches Fließverhalten.

$$\text{Bingham-Ansatz: } \tau = \tau_o + \eta \frac{dv}{dy}$$



**Bild 5.** Fließkurve für eine Casson-Substanz, nicht-idealplastisches Fließverhalten.

$$\text{Casson-Ansatz: } \sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_o} + \sqrt{\eta \cdot \frac{dv}{dy}}$$

Der Ansatz von *Bingham* lautet:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \frac{dv}{dy}$$

Dieser Ansatz ist auf ein ideal plastisches System anzuwenden, während der Ansatz von *Casson* [4], Bild 5,

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\eta \cdot \frac{dv}{dy}}$$

bei nicht-ideal plastischem Fließverhalten zu verwenden ist.

Insgesamt betrachtet kann der Flüssigmist als ein Stoffsystem angesehen werden, welches in seinen Eigenschaften zwischen einer *Bingham*-Substanz und einer *Casson*-Substanz liegt. Welches Fließgesetz angenommen werden kann, hängt von der vorhergehenden Beanspruchung des Flüssigmistes ab.

Die Anwendung dieser Ansätze innerhalb der Bewegungsgleichung würde eine Beschreibung des Fließverhaltens von Flüssigmist voll ermöglichen. Jedoch ist eine geschlossene Lösung der Gleichung mit dem Ziel, die notwendigen Kanalabmessungen bzw. Rohrdurchmesser zu bestimmen, nur sehr schwer möglich.

Eine Möglichkeit, aufgrund der aus den Untersuchungen ermittelten Stoffparameter dennoch zu einer Lösung zu gelangen, bieten die Dimensionsanalyse und Modellversuche.

#### 4. Anwendung der Dimensionsanalyse und Modellversuche

Die Anwendung der Dimensionsanalyse soll in groben Zügen am Beispiel der Rohrströmung für eine *Bingham*-Substanz erläutert werden. In die Bewegungsgleichung gehen dann insgesamt 7 Einflußgrößen ( $\Delta p$ ,  $d$ ,  $v$ ,  $l$ ,  $\tau_0$ ,  $\eta$ ,  $\rho$ ) ein. Die Funktion aus der Kombination dieser Größen muß gleich Null sein.

$$\Phi(\Delta p, d, v, l, \tau_0, \eta, \rho) = 0$$

Nach der Theorie der Dimensionsanalyse ergeben sich daraus aufgrund des *Buckingham*-Theorems 4 dimensionslose Kennzahlen, deren funktionaler Zusammenhang eine Beschreibung dieses speziellen Strömungsproblems gewährleistet. Die dimensionslosen Kennzahlen werden hierbei aus den 7 Einflußgrößen gebildet. Für den Fall der Rohrströmung sieht die Funktion  $\Phi$  folgendermaßen aus:

$$\Phi\left(\lambda, \text{Re}, \text{He}, \frac{l}{d}\right) = 0$$

$$\text{womit } \text{Re} = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\eta}, \quad \text{He} = \frac{\tau_0 \cdot d^2 \cdot \rho}{\eta^2}$$

$$\text{und } \lambda = f(\text{Re}, \text{Rohrrauigkeit}) \text{ ist.}$$

Es ist dabei vorausgesetzt, daß die Substanz im gesamten Beanspruchungsbereich tatsächlich nur die zwei Stoffkonstanten  $\tau_0$  und  $\eta$  zur Beschreibung benötigt, was in jedem Fall vorher rheometrisch zu prüfen ist.

Um aus diesen theoretischen Überlegungen heraus tatsächlich eine Berechnungsgrundlage zu schaffen, sind Modellversuche durchzuführen. Aus den sich hierbei ergebenden Abhängigkeiten der Kennzahlen voneinander sind Diagramme aufzustellen, mit denen sich die Grenzkriterien für ein einwandfreies Fließen des Flüssigmistes bestimmen lassen. Es kommt damit die Ähnlichkeitstheorie zur Anwendung, deren Aussage es ist, daß Modell und Hauptausführung in gleicher Weise von den Kennzahlen abhängen müssen. Die *Newtonsche* Flüssigkeit ist durch eine Stoffkonstante hinreichend charakterisiert. Im Gegensatz hierzu gehen in das Fließgesetz nicht-*Newtonscher* Substanzen mehrere Stoffkonstanten ein. Wegen der größeren Zahl von Stoffkonstanten müssen rheologische Probleme auch eine Abhängigkeit von einer größeren Zahl von Kennzahlen aufweisen. Dieses ist in dem angeführten Beispiel der Rohrströmung einer *Bingham*-Substanz auch der Fall, wo zweckmäßigerweise die genannten 4 Kennzahlen gebildet werden.

Bevor Modellversuche durchgeführt werden können, ist die Bedeutung der einzelnen Kennzahlen für das zu untersuchende Strö-

mungsproblem abzuschätzen; denn es ist nicht möglich, alle 4 Kennzahlen so zu variieren, daß sie für Modell und Hauptausführung den gleichen Wert haben. Die Ähnlichkeit zwischen Modell und Hauptausführung ist zwar nur dann vollständig, wenn alle in das Problem eingehenden dimensionslosen Kennzahlen im Modellversuch und in der Hauptausführung denselben Wert haben, man begeht aber nur einen kleinen Fehler, wenn eine Kennzahl aufgrund ihres abgeschätzten geringen Einflusses eliminiert wird. Leider ist auch dann oft die Ähnlichkeit zwischen Modell- und Hauptausführung nicht leicht zu erfüllen, so daß z.B. auf ein anderes Fluid zurückgegriffen werden muß. Das ist nur sinnvoll, wenn dieses Fluid gleiches Fließverhalten wie Flüssigmist aufweist, dem Betrage nach aber in einem anderen Bereich liegt.

Da es außer Flüssigmist weitere *Bingham*-Substanzen gibt, die ähnliches Verhalten zeigen, ist ein Modellversuch mit Flüssigmistkanälen möglich. Eine Möglichkeit, die Abhängigkeit von einer weiteren Kennzahl zu eliminieren, ist durch die Variation des Maßstabfaktors und Extrapolation der ermittelten Werte auf den Maßstab 1 : 1 hin gegeben.

Bei allen Modellversuchen ist zu bedenken, daß sie keineswegs immer vollständige Aussagen über das Verhalten der Großausführung liefern, da man bei einem Modellversuch sich nur an einem Punkt der Abhängigkeit befindet. Dennoch ist es möglich, mit Modellversuchen für die Praxis anwendbare Ergebnisse zu liefern, nach denen Flüssigmistkanalanlagen als auch Zwangsfördereinrichtungen funktionssicher gebaut werden können.

#### 5. Zusammenfassung

Die zunehmende Entsorgung mittels Flüssigmistverfahren im Bereich der tierischen Produktion erfordert eine umfassende theoretische Betrachtung des Problemkreises. Ausgehend von den allgemeinen Gleichungen der Erhaltung der Masse und des Impulssatzes wurde die Notwendigkeit rheometrischer Versuche und Modellversuche dargelegt. Die Ergebnisse der Rheometrie wiederum bilden die Grundlage für theoretische Ansätze. Aufgrund der durchgeführten Versuche läßt sich der Flüssigmist als eine strukturviskose Substanz mit einer Fließgrenze  $\tau_0$  charakterisieren, wobei dieses Verhalten für den nachgewiesenen Beanspruchungsbereich gilt. Die mathematische Beschreibung dieses Verhaltens wird durch den *Bingham*-Ansatz bzw. *Casson*-Ansatz erreicht. Diese Ansätze sind die Basis für weitergehende Betrachtungen wie die Dimensionsanalyse und Modellversuche. Beispielhaft ist die Dimensionsanalyse für die Rohrströmung einer *Bingham*-Substanz erläutert worden. Mit den noch anstehenden Modellversuchen, deren Durchführung und Auswertung ist dann die theoretische Grundlage für eine Entsorgung mittels Flüssigmistverfahren bei der tierischen Produktion vollständig verfügbar.

#### Verwendete Formelzeichen

D	Schergefälle
d	Rohrdurchmesser
$\vec{g}$	Vektor äußerer Kräfte
He	Hedström-Zahl
l	Rohrlänge
p	hydrostatischer Druck
Re	Reynolds-Zahl
t	Zeit
$\vec{v}$	Geschwindigkeitsvektor
$\eta$	dynamische Viskosität
$\lambda$	Rohrreibungskoeffizient
$\rho$	Dichte
$\sigma$	Spannungstensor
$\tau_0$	Grenzscherubspannung
$\tau$	Scherubspannung
$\nabla$	Nabla-Operator

## Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [ 1 ] *Lommatzsch, R.*: Fließkundliche Untersuchungen an Rindergülle. Deutsche Agrartechnik Bd. 21 (1971) Nr. 12, S. 558/59.
- [ 2 ] *Seufert, H.*: Funktion und Bauausführung verschiedener Stallbereiche in Liegeboxenlaufställen unter Berücksichtigung neuerer Flüssigentmischungsverfahren. Diss. Univ. Gießen 1975.

- [ 3 ] • *Oesterle, K.M.*: Zur Frage der Erfassung thixotroper Eigenschaften von Anstrichstoffen. Schweizer Archiv, März 1963.
- [ 4 ] *Heinz, W.*: Zur Gültigkeit des Fließgesetzes nach Casson bei Suspensionen der Anstrichmitteltechnik. Materialprüfung Bd. 1 (1959) Nr. 9, S. 311/16.
- [ 5 ] *Rautenbach, R.*: Grundlage der Rheologie. Vorlesungsmanuskript an der TH Aachen, August 1970.

# Untersuchung des Verhaltens von Schlepperkupplungen bei dynamischer Belastung

Von Gheorghe Bratucu, Braşov\*)

DK 631.372:681.332

Die Untersuchung des Verhaltens der Fahrkupplung von Radschleppern bei dynamischem Betrieb hat nicht nur große Bedeutung für die Dimensionierung der Kupplung selbst, sondern auch wegen ihres Einflusses auf andere Schlepperbauteile.

Die mathematische Berechnung läßt sich mit Hilfe eines Digitalrechners durchführen, wenn der wirkliche Kupplungsvorgang so genau wie möglich dargestellt wird. Die theoretische Studie wurde mit einer experimentellen Untersuchung verglichen und mit den Ergebnissen der letzteren verbessert.

## 1. Einleitung

In der Praxis muß die Schlepperkupplung zuverlässig arbeiten, große Lebensdauer haben, leicht einstellbar sein, bequem zu bedienen sein usw. Aus der Analyse dieser Anforderungen ergibt sich eine Reihe von Widersprüchen, die eine optimale Berechnung der Kupplung erschweren [1]: kleine Trägheit für leichtes Einkuppeln, aber auch großes Volumen wegen thermischer Belastungen; sensibel zu schalten trotz der für das Einkuppeln notwendigen starken Federn; gute Abdichtung gegen Staub, aber auch gute Belüftungsmöglichkeit usw.

Die Grundlage für die Dimensionierung der Schlepperkupplung ist die Gleichung:

$$M_{k\max} = \beta M_n = \mu F_k R_m z \quad (1)$$

Der Sicherheitskoeffizient  $\beta$  hat Werte zwischen 2 und 3,5 in Abhängigkeit vom Schleppertyp [2]. Diese Werte werden unter Berücksichtigung der statischen Belastungsverhältnisse gewählt, wobei die Entlastung des Kupplungspedals mäßig schnell erfolgt, die Zapfwellen nicht eingekuppelt sind, die Werkzeuge der Arbeitsmaschinen nicht angetrieben werden.

Die Analyse von Schäden an Teilen der Kupplung und des Getriebes zeigt, daß diese Methode nicht sicher genug ist und daß man die Werte für  $\beta$  aus dem dynamischen Betrieb ermitteln muß. In der Literatur bezeichnet man  $\beta$  im ersten Fall mit  $\beta_s$  und im zweiten Fall mit  $\beta_d$  [3]. Für  $\beta$  ist ein Wert anzunehmen, der sich aus der schwersten Belastung der Kupplung ergibt.

Zusammen mit dem Getriebe stellt die Kupplung ein Schwingungssystem von großer Komplexität dar, bestehend aus Reibungskupplungen, Drehmassen und elastischen Verbindungen, mit Störfaktoren von außen wie: Drehmoment des Motors, Fahrwiderstand, Schlupf zwischen Schlepperrifen und Boden usw. [4]. Andere Einflüsse mit instationärem Charakter können sich aus eventuellem Spiel im Getriebe oder zwischen Schlepper und Landmaschinen sowie aus ungenauer Einstellung der Kupplung ergeben. Diese sind aber nur zufällig und können nicht bei der allgemeinen Berechnung der Kupplung berücksichtigt werden.

Die motor- und getriebeseitigen Trägheitsmomente  $J_M$  und  $J_G$  ändern sich, wenn gleichzeitig mit dem Anfahren des Schleppers auch die Werkzeuge der Arbeitsmaschine durch die Zapfwelle betrieben werden.

Z.B. erhält man beim Einkuppeln der Motorzapfwelle:

$$J_M = J_m + \sum_1^n \frac{J_{xma}}{i_x^2} + \sum_1^n \frac{J_{xz}}{i_x^2} + \sum_1^n \frac{G_{xma}}{g} \cdot \frac{r_x^2}{i_x^2} \quad (2)$$

oder, wenn die Wegzapfwelle eingekuppelt wird, ergibt sich:

$$J_G = \frac{G_{\text{tot}}}{g} \cdot \frac{r_m^2}{i_x^2} + \sum_1^n \frac{J_{xt}}{i_x^2} + \sum_1^n \frac{J_{xma}}{i_x^2} + \sum_1^n \frac{G_{xma}}{g} \cdot \frac{r_x^2}{i_x^2} \quad (3)$$

Beim Anfahren des Schleppers ohne Arbeitsmaschine verbleiben in Gleichung (2) nur der erste Summand und in Gleichung (3) die beiden ersten Summanden.

## 2. Theoretische Untersuchung der Schlepperkupplung bei dynamischer Belastung

### 2.1 Das dynamische Modell des Einkuppelns

Nach einer Optimierung des Modells durch fortwährenden Vergleich zwischen theoretischen und experimentellen Ergebnissen entstand das Modell für das Einkuppeln, welches in **Bild 1** dargestellt ist, wobei die Trägheitsmomente  $J_1 \dots$ , die Federsteifigkeiten  $c_{x,x+1}$ , die Dämpfungskonstanten  $k_{x,x+1}$  und die Drehmomente  $M_r, M_z, M_k$  auf die Kupplungswelle reduziert wurden.

\*) *Dipl.-Ing. Gheorghe Bratucu ist Wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Kraftfahrzeuge, Schlepper und Landmaschinen der Universität Braşov (Rumänien). Er war vom 1.10.1975 bis 31.7.1976 Gastwissenschaftler im Institut für Landmaschinen (Direktor: o.Prof. Dr.-Ing. W. Söhne) der TU München.*