

stungstechnische Variante vorzustellen, die mehrere Möglichkeiten der Anpassung an verschiedene standortspezifische Gegebenheiten und Realisierungsbedingungen zuläßt. Das betrifft sowohl die Güllezuführung als auch den Transport der abgetrennten schüttfähigen Feststoffe.

Wesentliche Voraussetzungen für das Erreichen optimaler Trennergebnisse sind eine ausreichende Homogenität für Gülle, die zum Entmischen neigt, und eine nur geringen Masseschwankungen ausgesetzte Zuführung zum Trennaggregat. Dies wird im Beschickungspumpwerk realisiert, das mit einer masseregulierbaren Beschickungseinrichtung, wie drehzahlregulierbare Schraubenpumpen oder Becherwerke bei Zulaufmassen bis etwa 20 t/h und Kreiselpumpen bei Zulaufmassen bis etwa 50 t/h, ausgerüstet ist sowie über eine Druckleitung zum Trennaggregat verfügt.

Die für die Förderung der Feststoffe aus dem Maschinenraum erforderlichen Öffnungen im Bauwerk sind so auszulegen, daß sowohl die Verwendung von Trogschneckenförderern als auch von Gurtbändern möglich ist. Der Abfluß der flüssigen Phase erfolgt in einem Kanal, der entsprechend den vorgegebenen Standortbedingungen mit freiem Ablauf zu einem Lagerbehälter führt.

Für die Bauhülle der Trennstation mit einer Bürstensiabschnecke sind eine Grundfläche von 2 m × 6 m und eine lichte Höhe von 3,50 m erforderlich. Beim Einsatz der Kombination Bürstensiabschnecke/Schnecken-

presse beträgt die Grundfläche 4,50 m × 9,50 m. Eine räumliche Trennung der Bürstensiabschnecke von der Schneckenpresse ist nicht erforderlich.

Beide Trennstationen sind gemäß Standard TGL 30130 mit einer Zwangslüftungsanlage mit Vorortabsaugung auszurüsten.

Die Bauwerke sind jeweils an den Stirnseiten mit Ein- und Ausgangstoren zu versehen.

Bei der Erzeugung einer verfütterungsfähigen Futtermittelkomponente ist der anfallende Feststoff sofort auf entsprechende Fahrzeuganhänger zu fördern. Bei der Gewinnung von organischer Substanz ist für die Zwischenlagerung der Güllefeststoffe eine befestigte Lagerplatte mit Drainage erforderlich. Die Dränflüssigkeit ist über ein Sedimentationsbecken dem Lagerbehälter für die flüssige Trennkomponente zuzuführen. Nach dem gegenwärtigen Stand der Untersuchungen kann die Dränung der Flüssigkeit aus dem Güllefeststoff durch ein einmaliges Umsetzen des Feststoffstapels verbessert werden. Dies kann entweder direkt auf der Lagerplatte oder mit Hilfe eines für den Transport des Mediums von der Trennstation zum nahegelegenen Lagerplatz eingesetzten Anhängers erfolgen.

#### Zusammenfassung

Mit der Bürstensiabschnecke wird ein Aggregat zur Fest-Flüssig-Trennung von Schweine- und Mastrindergülle vorgestellt, für das die Einsatzbedingungen in Schweinemastanlagen mit Spül- oder Fließkanalentmi-

stung, in Schweinezuchtanlagen sowie in Rindermastanlagen gegeben sind. Durch den Einsatz des Trennaggregats werden vor allem die Lagerbedingungen der flüssigen Trennkomponenten von behandelter Rinder- und Schweinegülle gegenüber ungetrennter Gülle verbessert, wodurch der Homogenisierungsaufwand in Abhängigkeit vom TS-Gehalt der Ausgangsgülle verringert bzw. völlig vermieden wird. Die Verstopfungsgefahr von Rohrleitungen, Pumpen, Verregnungsanlagen und Tankfahrzeugen durch Sedimentation wird für beide Güllearten beseitigt. Eine Schwimmschichtbildung wird bei der Lagerung von getrennter Mastrindergülle verhindert. Die Bürstensiabschnecke ersetzt die bisher in Trennstationen mit umbautem Raum eingesetzten Bogensiebe.

Eine Fest-Flüssig-Trennung von Gülle in Schweinemastanlagen mit Spülentmischung ist bei einer weiteren Aufbereitung des abgetrennten Feststoffs mit Hilfe einer Schneckenpresse als Futtermittelkomponente für Mastrinder nur mit der Bürstensiabschnecke möglich.

Es werden Hinweise zu den speziellen Einsatzbereichen des Trennaggregats gegeben und auch Angaben über den Massenfluß sowie über TS-Konzentrationen und Konzentrationen anderer Inhaltsstoffe mit ihren Abscheidegraden gemacht. Für das Verfahren wird eine technisch-technologische Lösung dargestellt.

A 4486

## Das Fließverhalten von trockensubstanzreicher Schweinegülle

Dr.-Ing. M. Türk, KDT, Forschungszentrum für Mechanisierung der Landwirtschaft Schlieben/Bornim der AdL der DDR

#### Verwendete Formelzeichen

a, b		Konstanten
B		Bestimmtheitsmaß
d		Rohrinnendurchmesser
k	m	Konsistenzkoeffizient
l	Pa · s <sup>n</sup>	Förderlänge
n	m	Fließexponent
Δp	Pa, bar	Druckverlust
Δp/Δl	Pa/m	spezifischer Druckverlust
Re		Reynoldszahl
TS	%	Trockensubstanzgehalt, Massenkonzentration
$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /h	Volumendurchsatz
v	m/s	mittlere Fördergeschwindigkeit
$\dot{v}$	1/s	Schergeschwindigkeit
$\dot{v}_w$	1/s	Newtonsche Schergeschwindigkeit
$\eta_s$	Pa · s	Scheinviskosität
$\eta$	mPa · s	dynamische Newtonsche Viskosität
θ	°C	Temperatur
λ		Rohrreibungszahl
ρ	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
τ	Pa	Schubspannung
τ <sub>w</sub>	Pa	Wandschubspannung in der Förderrohrleitung
τ <sub>0</sub>	Pa	Fließgrenze

Grenze der Förderbarkeit erreicht werden kann. Die Projektierung der Förderanlagen muß daher mit äußerster Sorgfalt erfolgen, um Bemessungsfehler und Havarien zu vermeiden. Voraussetzung für hohe Betriebssicherheit sowie optimalen Werkstoff- und Energieeinsatz sind Bemessungsgrundlagen, die die relevanten Stoffkennwerte beinhalten und die Druckverlustberechnung mit einfachen Mitteln ermöglichen.

Die bekannte Druckverlusttabelle von Hörnig [1, 2] entsprechend dem Standard TGL 6466/03 ist auch weiterhin für den Bereich 3 % < TS < 8 % voll gültig. Mit steigendem TS-Gehalt über 8 % sind jedoch Plastizität (Fließgrenze τ<sub>0</sub>), Zeitabhängigkeit (thixotrope Strukturzerstörung) und Zusammensetzung der Gülle (Futtereinsatz) verstärkt zu berücksichtigen. Hierzu wurden vertiefende Untersuchungen vorerst mit TS-reicher Schweinegülle durchgeführt, die einschließlich ihrer Anwendung auf die Druckverlustberechnung nachfolgend beschrieben werden sollen.

#### Untersuchungsmethodik

Gülle besteht aus Kot, Harn, Wasser, Futterresten und Fremdstoffen und kann als biologische Suspension mit einem sehr breiten Teilchengrößenspektrum (vom kolloid- bis zum grobdispersen Bereich) sowie äußerst unterschiedlichen Teilchenformen (Körner, Spelzen, Halme, Haare, Sand usw.) gekennzeichnet werden. Grundvoraussetzung für rheometrische Messungen ist jedoch Quasihomogenität. TS-reiche Schweinegülle mit

TS > 8 % hat ein zeitabhängiges nichtlinearplastisches (quasiplastisches) Fließverhalten (eine Fließgrenze τ<sub>0</sub>), das mit dem Herschel-Bulkley-Potenzgesetz modellmäßig beschrieben werden kann:

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

Bei TS < 8 % kann die Fließgrenze vernachlässigt werden. Es liegt pseudoplastisches (strukturviskoses) Fließverhalten vor und das Ostwald-de Waele-Potenzgesetz ist anwendbar:

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad (2)$$

Die Haupteinflußgrößen auf das Fließverhalten von Schweinegülle werden zusammenfassend folgendermaßen geordnet:

- Konzentration (TS-Gehalt)
- Fütterung (Hauptfutterkomponenten)
- Zeitabhängigkeit des Fließverhaltens (thixotrope Strukturzerstörung bei Belastung)
- Temperatur
- Lagerdauer.

Das Fließverhalten der Gülle wird hauptsächlich durch den TS-Gehalt und die Kotstruktur, d. h. durch die Fütterung, bestimmt.

In 12 verschiedenen Praxisanlagen wurden Kot- und Gülleproben gewonnen und stufenweise durch Wasserzugabe verdünnt. Die zeitabhängige Strukturzerstörung bei konstanter Belastung wurde beobachtet, und nach Erreichen eines stationären Zustands erfolgte die Aufnahme der Fließkurven in

mehrfacher Wiederholung. Auf diese Weise wurden rd. 200 auswertbare Einzelversuche im Bereich TS = 9...25 % durchgeführt. Als Standard-Meßgerät wurde das im Forschungszentrum für Mechanisierung der Landwirtschaft (FZM) Schlieben/Bornim entwickelte und gebaute Rotationsviskosimeter großer Spaltweite im Meßbereich von  $\dot{\gamma} = 0,13...70$  1/s eingesetzt. Ständige Parallelmessungen erfolgten mit dem Rotationsviskosimeter „Rheotest RV 2“ vom VEB Prüfgerätekombi Medingen und einem im FZM Schlieben/Bornim entwickelten Rohrviskosimeter. Durch diese Parallelmessungen und vereinzelt durchgeführte Förderversuche mit Praxisrohrstrecken wurde die Übertragbarkeit gesichert.

Zur Bestimmung der Fließgrenze  $\tau_0$  wurde eine kombinierte Meßmethodik [3] entwickelt. Alle Angaben beziehen sich auf Zeitstabilität und die Normtemperatur von  $\theta = 20$  °C.

### 3. Meßergebnisse

Die Konzentration ist die wichtigste beschreibende Größe zur technologischen Kennzeichnung der Gülle. Der TS-Gehalt wird oft

Tafel 1. Fließkennwerte von trockensubstanzreicher Schweinegülle bei Fütterung von Getreide (Güllegruppe 1)

Regressionsgleichungen:  
 $\tau_0 = 0,0374 \exp(0,2735 \text{ TS}); B = 0,5627$   
 $k = 0,1294 \exp(0,2383 \text{ TS}); B = 0,6606$   
 $n = 0,7397 \exp(-0,0292 \text{ TS}); B = 0,1680$

TS %	$\tau_0$ Pa	k Pa · s <sup>n</sup>	n
8	0,33	0,8707	0,5856
9	0,44	1,1050	0,5688
10	0,58	1,4024	0,5524
11	0,76	1,7797	0,5324
12	1,00	2,2586	0,5210
13	1,31	2,8664	0,5061
14	1,72	3,6377	0,4915
15	2,26	4,6166	0,4773
16	2,97	5,8588	0,4636
17	3,91	7,4354	0,4503
18	5,14	9,4362	0,4373
19	6,76	11,9754	0,4247
20	8,88	15,1978	0,4125
21	11,67	19,2834	0,4006
22	15,35	24,4775	0,3891
23	20,17	31,0641	0,3779
24	26,52	39,4231	0,3670
25	34,86	50,0315	0,3565

Tafel 2. Fließkennwerte von trockensubstanzreicher Schweinegülle bei Fütterung von gedämpften Kartoffeln und Getreide (Güllegruppe 2)

Regressionsgleichungen:  
 $\tau_0 = 0,00006 \exp(0,6807 \text{ TS}); B = 0,7391$   
 $k = 0,0550 \exp(0,3626 \text{ TS}); B = 0,8553$   
 $n = 0,5663 \exp(-0,0255 \text{ TS}); B = 0,1202$

TS %	$\tau_0$ Pa	k Pa · s <sup>n</sup>	n
8	0,01	1,0004	0,4620
9	0,03	1,4376	0,4504
10	0,05	2,0659	0,4391
11	0,11	2,9688	0,4280
12	0,21	4,2664	0,4173
13	0,42	6,1311	0,4068
14	0,83	8,8108	0,3966
15	1,63	12,6617	0,3866
16	3,22	18,1956	0,3769
17	6,36	26,1481	0,3674
18	12,57	37,5765	0,3582
19	24,83	53,9997	0,3492
20	49,05	77,6008	0,3404

Tafel 3. Fließkennwerte von trockensubstanzreicher Schweinegülle bei Fütterung von rohen Kartoffel-Schälabfällen und Getreide oder gedämpften Küchenabfällen und Getreide (Güllegruppe 3)

Regressionsgleichungen:  
 $\tau_0 = 0,0312 \exp(0,3142 \text{ TS}); B = 0,8777$   
 $k = 0,0603 \exp(0,2976 \text{ TS}); B = 0,9133$   
 $n = 0,6155 \exp(-0,0227 \text{ TS}); B = 0,1407$

TS %	$\tau_0$ Pa	k Pa · s <sup>n</sup>	n
8	0,39	0,6521	0,5133
9	0,53	0,8781	0,5018
10	0,72	1,1824	0,4905
11	0,99	1,5923	0,4795
12	1,35	2,1442	0,4687
13	1,85	2,8875	0,4582
14	2,54	3,8883	0,4479
15	3,48	5,2361	0,4379
16	4,76	7,0511	0,4280
17	6,51	9,4951	0,4184
18	8,92	12,7863	0,4090
19	12,21	17,2184	0,3999
20	16,72	23,1867	0,3909
21	22,89	31,2237	0,3821
22	31,35	42,0465	0,3735
23	42,92	56,6208	0,3652
24	58,76	76,2469	0,3570
25	80,45	102,6758	0,3490

als Äquivalent zum Fließverhalten verwendet, weil die Messung einfach und genau ist. Die erhaltenen Fließkennwerte des Potenzansatzes nach Gl. (1) wurden daher mit dem TS-Gehalt in Beziehung gesetzt und die in den Tafeln 1 bis 3 angegebenen Regressionsgleichungen berechnet.

Bei gleichem TS-Gehalt ergibt sich oft ein stark differenziertes Fließverhalten. Daher ist auch die Zusammensetzung der Gülle zu beachten. Kot und Harn sind Futterabprodukte beim Verdauungsvorgang, d. h. Kotstruktur, Kolloidanteil, Wassergehalt, Futterreste usw. sind primär von der Form und der Zusammensetzung des Futters abhängig. So konnten entsprechend den verabreichten Hauptfutterkomponenten die Güllegruppen zusammengefaßt werden (Tafeln 1 bis 3). Im Bild 1 ist die Abhängigkeit der Fließkennwerte vom TS-

Gehalt dargestellt. Für k (TS) und  $\tau_0$  (TS) zeigen sich ähnlich hochgesicherte Abhängigkeiten, während der Fließexponent n (TS) nur in geringem Maß von der Konzentration abhängig ist. Aufgrund der geringen Korngrößen kann bei Getreidefütterung eine relativ einheitliche Güllestruktur angenommen werden, und der Verformungswiderstand ist am geringsten.

Im Bild 2 sind die Fließkurven für die Güllegruppe 1 gezeigt. Der nichtlineare Einfluß des TS-Gehalts ist eindeutig erkennbar. Bei TS < 8 % ist eine Unterscheidung nach der Gülleart kaum noch möglich, die Fließgrenze kann vernachlässigt werden, und es sind im Bereich TS = 3...8 % die von Hörnig [1] angegebenen Regressionsfunktionen der Fließkennwerte des Potenzgesetzes nach Gl. (2) anzuwenden:

$$k = 0,0156 \exp(0,5060 \text{ TS}) \quad (3)$$

$$n = 0,7700 \exp(-0,0701 \text{ TS}) \quad (4)$$

Für TS < 3 % liegt nach Eckstädt [4] Newtonsches Fließverhalten vor, und die konstante dynamische Viskosität wird bei Annahme konstanter Dichte wie folgt errechnet:

$$\eta = 1,007 + 0,94 \text{ TS} \quad (5)$$

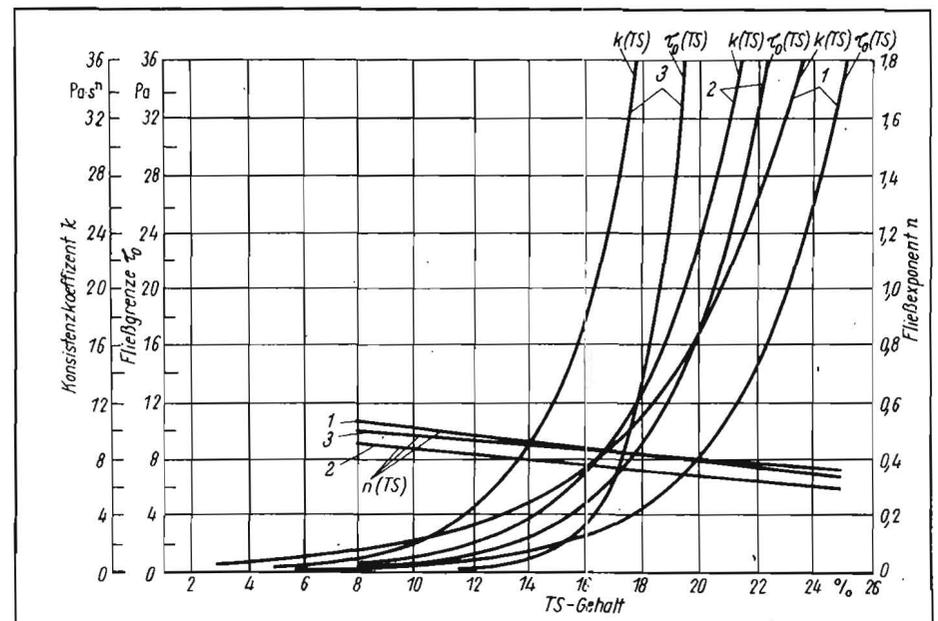
Die Grenze zwischen Newtonschem und pseudoplastischem Fließverhalten ist allerdings nicht eindeutig definierbar. Hier ist ggf. zu interpolieren, indem man die belastungsabhängige Scheinviskosität  $\eta_s$  nach Gl. (13) bestimmt und zur Druckverlustberechnung verwendet.

### 4. Druckverlustberechnung

Zumeist besteht die Aufgabe des Projektanten darin, in Abhängigkeit vom TS-Gehalt der Gülle, vom Rohrdurchmesser d, vom Durchsatz  $\dot{V}$  und von der Förderlänge l den zu erwartenden Druck an der Pumpe  $\Delta p$  zu errechnen.

Der weitaus größte Druckverlustanteil wird durch den Reibungsdruckverlust in geraden Rohren verursacht. Hierfür wird folgende Berechnungsmethodik vorgeschlagen. Mit dem nach der Darcy-Weißbach-Gleichung zu berechnenden Druckverlust

Bild 1. Fließkennwerte von Schweinegülle in Abhängigkeit vom TS-Gehalt; Güllegruppen: 1 Getreidefütterung; 2 Kartoffel- und Getreidefütterung; 3 Fütterung von rohen Kartoffel-Schälabfällen oder Küchenabfällen und Getreide



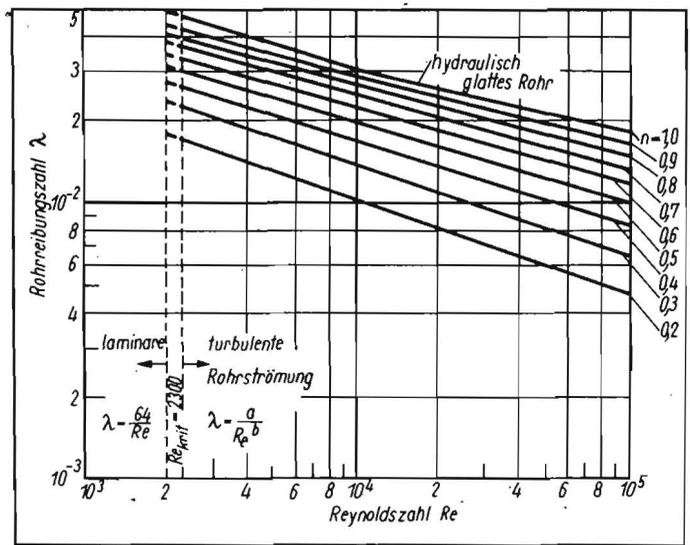
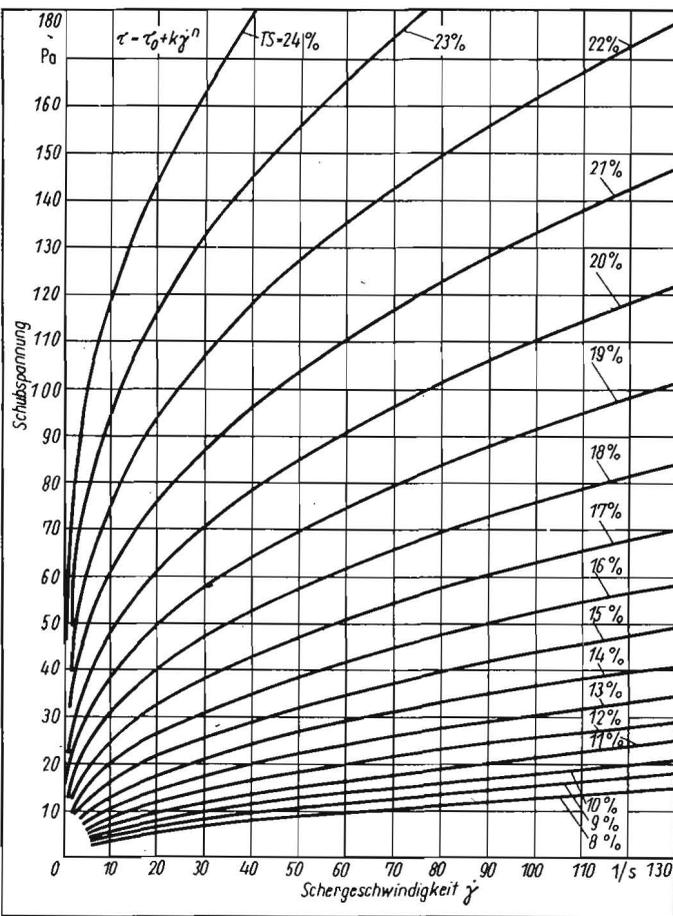


Bild 3  
Widerstandsverhalten bei der Rohrströmung pseudoplastischer Flüssigkeiten

Bild 2  
Fließkurven  $\tau(\dot{\gamma})$  von trockensubstanzreicher Schweinegülle bei Getreidefütterung (Güllegruppe 1)

- Zeitabhängigkeit des Fließverhaltens bei Belastung
- Temperatur.

Mit Hilfe verschiedener Rotationsviskosimeter erfolgten systematische Fließkurvenmessungen im Bereich  $TS = 9 \dots 25\%$ . Die erhaltenen Fließkennwerte des Herschel-Bulkley-Potenzgesetzes  $\tau_0$ ,  $k$  und  $n$  wurden in Abhängigkeit vom  $TS$ -Gehalt modellmäßig dargestellt.

Drei verschiedene Güllegruppen konnten in Abhängigkeit von der Futterzusammensetzung unterschieden werden. Die angegebenen Fließkennwerte beziehen sich auf Zeitstabilität und die Normtemperatur von  $20^\circ C$ . Die allgemeine Grundgleichungen zur Druckverlustberechnung wurden angegeben. Der Einfluß von Temperatur und Belastungszeit auf das Fließverhalten von Schweinegülle wird in weiteren Beiträgen behandelt.

Über die aktualisierten Projektierungsgrundlagen wurde im Jahr 1984 auf einem Anwenderseminar [6] berichtet, und das dazu zusammengestellte Arbeitsmaterial [4] kann im FZM Schlieben/Bornim, Betriebsteil Potsdam-Bornim, angefordert werden.

$$\frac{\Delta p}{\Delta l} = \lambda \frac{\rho v^2}{2d} \quad (6)$$

und der allgemeingültigen Reynoldszahl

$$Re = \frac{v d \rho}{\eta_s(\tau_w)} \quad (7)$$

gilt bei Laminarströmung im Bereich  $Re < 2300$  das Widerstandsgesetz

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (8)$$

Im Turbulenzbereich  $Re > 2300$  ist das Widerstandsgesetz von Metzner/Dodge [4] für pseudoplastische Medien anzuwenden (Bild 3):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{2}{n^{0,75}} \lg \left[ Re \left( \frac{\lambda}{4} \right)^{1 - \frac{n}{2}} \right] - \frac{0,1973}{n^{1,2}} \quad (9)$$

Als gute Näherung kann angenommen werden

$$\lambda = \frac{a}{Re^b} \quad (10)$$

mit den von  $n$  abhängigen Konstanten  $a$  und  $b$ :

$$a = 0,3126 n^{0,1107} \quad (11)$$

$$b = 0,2514 n^{-0,2118} \quad (12)$$

Für Gülle ist kennzeichnend, daß der Übergang zur turbulenten Rohrströmung allmählich erfolgt, da laminare wandnahe Schichten und turbulente Strömungsanteile zugleich auftreten. Die Rohrrauigkeit ist bis zu sehr hohen  $Re$ -Zahlen daher ohne Einfluß, und die vom Fließverhalten abhängigen Rohrreibungszahlen  $\lambda$  sind stets geringer als bei Newtonschen Flüssigkeiten in hydraulisch glattem Rohr.

Grundsätzlich ist zuerst die Reynoldszahl nach Gl. (7) zu errechnen. Diese ist vom verwendeten Fließgesetz unabhängig und somit

für Newtonsche und nicht-Newtonsche Fördermedien gleichermaßen gültig. Durch die Einführung einer vom Fließgesetz und über Belastungshöhe abhängigen Scheinviskosität wird gesichert, daß auch das Widerstandsgesetz nach Gl. (8) allgemein anwendbar ist. Die Scheinviskosität der Rohrströmung ist wie folgt definiert:

$$\eta_s = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_N} = \frac{\tau_w}{\left( \frac{8v}{d} \right)} \quad (13)$$

Hier sind für  $\tau_w$  die Fließfunktionen nach Gl. (1) oder (2) einzusetzen. Für das Ostwald-de Waele-Potenzgesetz ergibt sich demnach

$$\eta_s = k \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^n \left( \frac{8v}{d} \right)^{n-1} \quad (14)$$

und für den Herschel-Bulkley-Ansatz in guter Näherung [5]

$$\eta_s = \frac{\tau_0 d}{2\pi v} + k \left( \frac{2\pi v}{d} \right)^{n-1} \quad (15)$$

### 5. Zusammenfassung

Zur Druckverlustberechnung beim Rohrtransport von trockensubstanzreicher Schweinegülle sind Kenntnisse des Fließverhaltens in Abhängigkeit von der Konzentration erforderlich. Das Tabellenwerk von Hörnig [1] ist für Gülle bis  $TS = 8\%$  entsprechend dem Standard TGL 6466/03 weiterhin gut anwendbar. Mit der Erhöhung der Konzentration auf  $TS > 8\%$  gewinnen jedoch Plastizität, Thixotropie und die Güllezusammensetzung an Einfluß. Daher wurden im FZM Schlieben/Bornim Untersuchungen folgender Haupteinflußgrößen auf das Fließverhalten durchgeführt:

- Konzentration
- Zusammensetzung (Hauptfutterkomponenten)

### Literatur

- [1] Hörnig, G.: Druckverlusttabelle für das Fördern von Rinder- und Schweinegülle in Druckrohrleitungen. Institut für Mechanisierung der Landwirtschaft Potsdam-Bornim, Institutsbericht Nr. 24, 1971.
- [2] Türk, M.: Berechnung der Druckverluste beim Fördern von Rinder- und Schweinegülle in Gölledruckrohrleitungen. agrartechnik, Berlin 32 (1982) 1, S. 23-26.
- [3] Türk, M.: Bestimmung der Fließgrenze von Gülle. agrartechnik, Berlin 35 (1985) 10, S. 472-474.
- [4] Türk, M.; Hörnig, G.; Eckstädt, H.: Bemessung von Gölledruckrohrleitungen. Arbeitsmaterial zum Anwenderseminar „Projektierung von Rohrleitungen für trockensubstanzreiche Schweinegülle“ am 23. Okt. 1984 in Berlin. FZM Schlieben/Bornim der AdL der DDR, 1984.
- [5] Giesekus, M.; Langer, G.: Die Bestimmung der wahren Fließkurven nicht-Newtonscher Flüssigkeiten und plastischer Stoffe mit der Methode der repräsentativen Viskosität. Rheologica Acta, Darmstadt 16 (1977) 1, S. 1-22.
- [6] Hörnig, G.; Türk, M.: Anwenderseminar „Projektierung von Rohrleitungen für trockensubstanzreiche Gülle“. agrartechnik, Berlin 35 (1985) 2, S. 90.