

## Zur Bestimmung des Druckabfalls beim Fördern fließfähiger Futtermischungen

Dr.-Ing. M. TSCHIRSCHKE, KDT

Bisherige Arbeiten beschränkten sich infolge Fehlens geeigneter Viskosimeter im wesentlichen auf die experimentelle Ermittlung der Druckabfall-Durchsatz-Kurve für verschiedene Rohrdurchmesser und Futtermischungen [1]. Die Aufgabe der nachfolgend beschriebenen Versuche bestand darin, die Abhängigkeit zwischen der Fließkurve und der Druckabfall-Durchsatz-Kurve für verschiedene Futtermischungen zu untersuchen, wobei zur Konsistenzbestimmung ein Rotationsviskosimeter großer Spaltweite [2] und zur Ermittlung des Fließverhaltens im Rohr ein spezieller Versuchsaufbau [3] mit 2 Stahlrohren verschiedenen Durchmessers (NW 50 und NW 100) dienen.

Tafel 1 zeigt die zur Auswertung herangezogenen Versuche. In ihr gibt jede laufende Nummer einen Futtermischungsansatz an. Weiterhin zeigen die Spalten 2 bis 10 die Zusammensetzung der Mischung, den Trockensubstanzgehalt, die Dichte und die Temperatur während der Messung. Spalte 11 nennt das Alter des Futters für die zur Mittelwertbildung herangezogenen Versuchsreihen (gerechnet vom Zeitpunkt des Ansetzens der Futtermischung). Spalte 12 bis 17 zeigen die Ergebnisse der Versuche am Rotationsviskosimeter, wobei der Fließkurve die Formel  $\tau = k \cdot D^n$  [kp/m<sup>2</sup>] zugrunde gelegt und die Scherspannung  $\tau$  für das Schergefälle  $D$  im Bereich von 0,075 bis 19,2 s<sup>-1</sup> in 9 Stufen gemessen wurde. Im einzelnen sind in Spalte 12 die Anzahl der zur Mittelwertbildung herangezogenen Meßreihen (M), in Spalte 13 die Anzahl der insgesamt verrechneten Meßpunkte (N) und in Spalte 14 bis 17  $k$ ,  $n$ - und  $B$ -Werte einschließlich der statistischen Sicherung aufgeführt. Da die Thixotropie entsprechend früheren Versuchen [2] vernachlässigt werden kann, wurden zur Mittelwertbildung die aufwärts und abwärts gemessenen Punkte verrechnet. In Spalte 18 bis 27 sind die gleichzeitig ermittelten Versuchsergebnisse an der Rohrstrecke aufgeführt, denen die Formel  $\delta_p = a \cdot Q^b$  (kp/m<sup>2</sup> · m) zugeordnet wurde, wobei die Förderleistung  $Q$  in m<sup>3</sup>/h eingesetzt ist und im Versuch zwischen 0,8 und 38 m<sup>3</sup>/h lag. Alle Koeffizienten wurden nach der Methode der linearen Regression ermittelt, so daß das Bestimmtheitsmaß  $B$  angegeben werden konnte. Der in Spalte 17, 23 und 27 angeführten Sicherung des Bestimmtheitsmaßes liegen die  $B_p$ -Werte von LINDER [4] bei  $P = 95$ ; 99; 99,9% zugrunde. Die Tafel zeigt, daß alle  $B$ -Werte gut gesichert sind und somit die Darstellung der Fließkurve und der Druckabfall-Durchsatz-Kurven als Geraden zulässig ist.

Zur Testung der Abhängigkeit zwischen dem Rotationsviskosimeter und der Rohrstrecke wurde die dimensionslose Darstellung  $\lambda = f(\text{Re})$  gewählt. Hierzu wurde die verallgemeinerte Reynoldssche Zahl

$$\text{Re}_n = \frac{d^n \cdot w^{2-n} \cdot \rho}{k \cdot g_N} \quad \text{bzw.} \quad \frac{d^n \left( \frac{Q \cdot 4}{d^2 \cdot \pi} \right)^{2-n} \cdot \rho}{k \cdot g_N}$$

- mit  $d$  Rohrdurchmesser in m
- $w$  mittlere Fließgeschwindigkeit im Rohr in m/s
- $\rho$  Dichte (Spalte 9 von Tafel 1) in kg/m<sup>3</sup>
- $g_N$  Umrechnungsfaktor in kg · m/kp · s<sup>2</sup>
- $k$  Steigung der Fließkurve (Spalte 14 von Tafel 1) in kp · s/m<sup>2</sup>
- $n$  Krümmung der Fließkurve (Spalte 15 von Tafel 1)
- $Q$  Durchsatz in m<sup>3</sup>/s

aus den mit dem Viskosimeter bestimmten Werten errechnet und dem Rohrreibungswert  $\lambda$  nach der Darcy-Weißbachschen Formel

$$\lambda = \frac{\delta_p \cdot d^5 \cdot g_N \cdot \pi^2}{8 \cdot \rho \cdot Q^2}$$

mit  $\delta_p$  = spezifischer Druckabfall im Rohr in kp/m<sup>2</sup> · m aus den an der Rohrstrecke gemessenen Werten gegenübergestellt. Hierzu diente diese Formel unter Verwendung der Beiwerte der Regressionslinie (Spalte 20; 24 und 21; 25 von Tafel 1) in der Form

$$\lambda = \frac{a^* \cdot d^5 \cdot g_N \cdot \pi^2}{8 \cdot \rho \cdot Q^{2-b}}$$

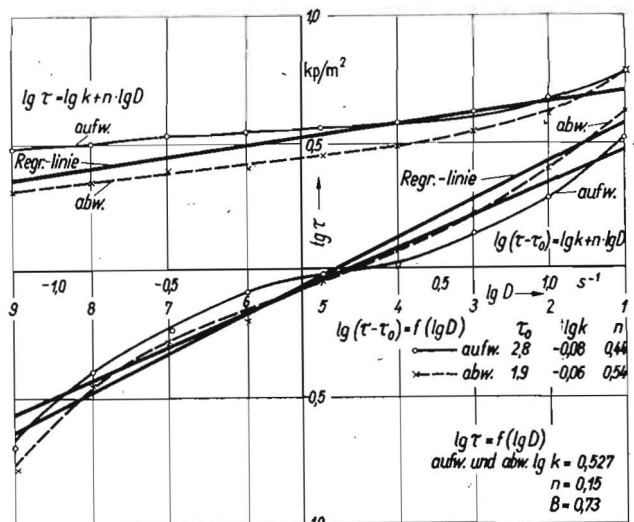
Das Ergebnis der Berechnung ist für 3 Durchflußmengen in Tafel 2 zusammengefaßt. Da die Reynoldsschen Zahlen aller Meßreihen weit unter der kritischen Reynoldszahl ( $\text{Re}_{\text{krit.}}$  für Wasser = 2320) liegen, ist generell laminare Strömung anzunehmen. Unter dieser Voraussetzung können die Ergebnisse mit dem von ULBRECHT [5] angegebenen Ansatz für laminares Fließen Nicht-Newtonscher Flüssigkeiten

$$\lambda = \frac{2 \Psi(n)}{\text{Re}_n} \quad \text{mit} \quad \Psi(n) = 4 \left[ \frac{2(3n+1)}{n} \right]^n$$

verglichen werden. Tafel 2 zeigt diese Rechnung in der letzten Spalte. Danach kann die Formel von ULBRECHT für die beiden kleineren  $Q$ -Werte benutzt werden, während für die größte der Rechnung zugrunde gelegte Fördermenge von 30 m<sup>3</sup>/h die nach ULBRECHT berechneten Werte generell kleiner sind. Bei dieser Fördermenge sollte deshalb bei der Berechnung von  $\lambda$  aus den Koeffizienten der Fließkurve für die Druckabfallberechnung etwa der doppelte Wert angenommen werden.

<sup>1</sup> Da  $Q$  in dieser Formel in m<sup>3</sup>/s entgegen der Tafel 1 (m<sup>3</sup>/h) eingesetzt wird, muß  $a$  in  $a^*$  nach der Formel  $\lg a^* = \lg a + n \cdot \lg 3600$  umgerechnet werden

Bild 1. Darstellung der Fließkurve einer Futtermischung im doppelt-logarithmischen System mit und ohne Annahme einer Fließgrenze



Tafel 1. Versuche an Rotationsviskosimeter und Rohrstrecke (Parameter und Koeffizienten)

Nr.	Zusammensetzung										Rotations-Viskosimeter										Rohrstrecke																																																	
	Trockenmischfutter					Wasser					Futter-Wasser-Verh.					Tr. %					ρ kg/m³					θ °C					Alter min					M, N					k, n					B					Sieb. B → Bp					M, N					a, b					Sieb. B → Bp				
	frisch gedämpft	Silage roh gemust	Kartoffeln	Masse-%		Wasser	Futter-Wasser-Verh.		Tr. %	ρ kg/m³	θ °C	Alter min	M	N	k	n	B	Sieb. B → Bp	M	N	a	b	Sieb. B → Bp	M	N	a	b	Sieb. B → Bp	M	N	a	b	Sieb. B → Bp	M	N	a	b	Sieb. B → Bp																																
1	28,6	-	-	-	-	71,4	1:2,5	24,0	-	17,4...20,4	15...100	2	36	3,74	0,015	0,66	++	2	20	58	0,88	0,82	++	2	14	98	0,60	0,99	++	2	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27																														
2	8,0	-	47,5	-	-	44,5	1:0,8	16,8	1060	11,2...15,2	230...350	2	35	5,64	0,017	0,67	++	2	42	525	0,24	0,86	++	2	66	332	0,33	0,83	++	2	59	550	0,23	0,26	++	2	55	589	0,28	0,96	++	2	113	0,40	0,23	++																								
3	8,0	-	47,5	-	-	44,5	1:0,8	16,3	1030	13,2...15,2	4150...1640	2	36	4,47	0,007	0,86	++	2	66	332	0,33	0,83	++	2	59	550	0,23	0,26	++	2	55	589	0,28	0,96	++	2	113	0,40	0,23	++																														
4	8,0	47,5	-	-	-	44,5	1:0,8	-	801	14,8...16,2	2850...2925	2	36	5,13	0,011	0,93	++	2	32	282	0,22	0,73	++	2	54	178	0,26	0,71	++	2	83	246	0,51	0,85	++	2	155	0,31	0,60	++																														
5	-	-	-	-	100	-	1:0	23,1	770	13,0...17,0	2000...4470	3	54	2,88	0,15	0,66	++	3	83	246	0,51	0,85	++	3	83	246	0,51	0,85	++	3	83	246	0,51	0,85	++	3	83	246	0,51	0,85	++																													

Tafel 2. Dimensionsloser Vergleich der Meß- und Rechenwerte für 3 Durchflusmengen

Nr.	Alter min	Q m³/h	Rohr NW 100		Rohr NW 50			
			nach Messung	nach [5]	nach Messung	λ	nach [5]	
1	15...100	0,5	-	-	0,13	66	66	
		4,0	-	-	8,2	0,7	1,1	
		30,0	-	-	450	0,06	0,02	
3100	0,5	-	-	0,68	13,1	22,3		
	4,0	-	-	26,3	0,8	0,6		
	30,0	-	-	906	0,05	0,02		
2	230...350	0,5	0,006	1034	1363	0,09	93	100
		4,0	0,38	27	23	5,4	2,4	1,6
		30,0	20,6	0,7	0,4	295	0,06	0,03
1150...1640	0,5	0,008	667	1054	0,1	56	76	
	4,0	0,48	15,2	17,5	7,0	1,7	1,2	
	30,0	26,6	0,4	0,3	389	0,06	0,02	
3	1520...1620	0,5	0,006	1311	1520	0,08	100	108
		4,0	0,34	50	25,3	4,9	2,6	1,7
		30,0	18,6	2,0	0,5	271	0,07	0,03
2850...2925	0,5	0,007	521	1245	0,1	106	89	
	4,0	0,41	19	21	5,9	3,0	1,4	
	30,0	22,5	0,7	0,4	327	0,09	0,03	
4	80...100	0,5	-	-	0,3	68	29	
		4,0	-	-	18,6	1,1	0,5	
		30,0	-	-	1016	0,04	0,01	
1150...1370	0,5	-	-	0,4	42	21		
	4,0	-	-	25,4	1,1	0,3		
	30,0	-	-	1418	0,03	0,006		
5	2000...4470	0,5	0,012	985	1038	0,13	48	99
		4,0	0,53	29	23,6	5,9	2,2	2,1
		30,0	22,5	0,9	0,55	246	0,1	0,06

Abschließend sei noch bemerkt, daß bei früheren Fließkurvendarstellungen die Fließgrenze  $\tau_0$  angegeben wurde [2] [6]. Diese rheologisch exakte Darstellung ließ sich jedoch nicht zur Berechnung der verallgemeinerten Reynoldsschen Zahl verwenden, weshalb für den hier beschriebenen Vergleich zwischen Rotationsviskosimeter und Rohrstrecke anstelle einer pseudoplastischen Flüssigkeit nur Strukturviskosität angenommen wurde. Diese Annahme ist möglich, wie die hohen B-Werte in Tafel 1 zeigen. Die zugehörige graphische Darstellung der Fließkurve mit und ohne Annahme einer Fließgrenze zeigt zur Veranschaulichung Bild 1 für eine Messung der unter Nr. 1 in Tafel 1 angegebenen Futtermischung.

Es wird die Abhängigkeit zwischen der Fließkurve, gemessen mit einem Rotationsviskosimeter großer Spaltweite, und der Druckabfall-Durchsatz-Kurve von Stahlrohren für verschiedene fließfähige Futtermischungen aufgezeigt. Hierbei wurde für die Flüssigkeiten reine Strukturviskosität angenommen. Ein Vergleich mit den von ULBRECHT [5] angegebenen Beziehungen ergab verhältnismäßig gute Übereinstimmung im Bereich niedriger Durchflusmengen, während bei höheren Durchflusmengen der nach ULBRECHT aus der Fließkurve errechnete Reibungskoeffizient verdoppelt werden sollte.

Literatur

[1] TSCHERSCHKE, M.: Das Verhalten fließfähiger Futtermischungen beim Durchfluß durch horizontale Rohrleitungen. Archiv für Landtechnik 4 (1963/64) H. 3, S. 177  
 [2] TSCHERSCHKE, M.: Zur Bestimmung der Viskosität fließfähiger Futtermischungen. Deutsche Agrartechnik 18 (1968) H. 4, S. 190  
 [3] -: Eigenschaften von Suspensionen, insbesondere Futtermischungen. Forschungsabschlußbericht 1968 des IML Potsdam-Bornim (unveröffentlicht)  
 [4] LINDER, A.: Statistische Methoden für Naturwissenschaftler, Mediziner und Ingenieure, 3. Aufl., Birkhäuser-Verlag Basel/Stuttgart 1960  
 [5] ULBRECHT, J. / P. MITSCHKA: Nicht-Newton'sche Flüssigkeiten. Beiträge zur Verfahrenstechnik, VEB Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig 1967  
 [6] TSCHERSCHKE, M.: Rotationsviskosimeter für grobdisperse Suspensionen. Archiv für Landtechnik 7 (1968) H. 1, S. 91 A 7369