

Das Verhalten fließfähiger Futtermischungen für Schweine beim Durchfluß durch Rohrleitungen

Buchstabenverzeichnis

D	s^{-1}	Geschwindigkeitsgradient
D_s	s^{-1}	Geschwindigkeitsgradient als Konsistenzveränderliche
d	m	Durchmesser der Rohrleitung
Eu	—	Euler-Kriterium
f	—	Reibungskoeffizient
g	ms^{-2}	Fallbeschleunigung
J	m	Höhenverlust
K	$kg\ m^{-1}\ s^{n-2}$	Konsistenz-Koeffizient
k	—	Richtungskoeffizient
l	m	Länge der Rohrleitung
n	—	Index des Nicht-Newton'schen Flusses
$\Delta p, \Delta p_t$	Nm^{-2}	Druckunterschied
R	m	Halbmesser der Rohrleitung
Re_{ow}	—	Reynolds-Kriterium für Nicht-Newton'sche Flüssigkeiten
Re''_{ow}	—	Modifiziertes Reynoldskriterium
Q_v	$m^3\ s^{-1}$	Durchflußmenge in der Zeiteinheit
T, T_I	$^{\circ}C$	Temperatur
u	ms^{-1}	Momentane Geschwindigkeit der Strömung in der Rohrleitung
\bar{u}	ms^{-1}	Durchschnittliche Geschwindigkeit der Strömung in der Rohrleitung
W	%	Feuchtigkeit
x, y	—	Gemessene Werte
z	—	Anzahl der Messungen
Φ, ψ	—	Bezeichnung der Funktion
μ	$Nm^{-2}s$	Dynamische Viskosität
μ_2	$Nm^{-2}s$	Scheinbare Viskosität
π_1, π_2	—	Bezeichnung der dimensionslosen Kriterien
ρ	$kg\ m^{-3}$	Dichte
τ	Nm^{-2}	Tangentialspannung
τ_s	Nm^{-2}	Tangentialspannung als Konsistenz-Veränderliche
t	h	Zeit

Aufgabenstellung

Mit der Verbreitung der Technologie der Massenproduktion für die Mästung von Schweinen mittels fließfähiger Mischungen und der Vergrößerung der Anzahl der Schweine pro Wärter wächst auch die Länge und Kompliziertheit des Rohrverteilungsnetzes in den Ställen. Dadurch erhöhen sich auch die Anforderungen nicht nur an den Betrieb, sondern auch an die Planung, wo — bei einer vorausgesetzten Anwendung der Automation des Betriebes — für den Planungsingenieur die Kenntnis des Verhaltens fließfähiger Futtermittel in Rohrleitungen unerlässlich ist.

Unter einer fließfähigen Futtermischung für Schweine verstehen wir eine Mischung von trockenen, meistens kombinierten Futtermitteln mit Wasser oder mit Molke von verschiedener Konsistenz oder unter Zugabe von verschiedenen Futtermittelabfällen.

Mit Rücksicht auf die Zusammenhänge, die sich aus dem Studium der einschlägigen Literatur ergeben, in welcher verschiedene Werte für verschiedene Zusammensetzungen der Mischung beschrieben werden, jedoch keine komplexe Analyse durchgeführt wird, wurden unsere Versuche daraufhin

abgestellt, einen Gesamtüberblick über das Verhalten von fließfähigen Mischungen in Abhängigkeit von Trockensubstanz und der Temperatur zu gewinnen. Aus dem gleichen Grunde wurde auch festgelegt, eine einzige Grundmischung mit unterschiedlicher Trockensubstanz und Temperatur zu verwenden. Diese Voraussetzung ermöglichte es, eine Reihe von unbekanntenen Faktoren auszuschließen, die in diesem Stadium der Versuche auf keine Weise beschrieben werden konnten.

Versuchsdurchführung

Den Hauptbestandteil der Mischung bildete das in verschiedenen Verhältnissen mit Wasser verdünnte Futtermittel „Biokrma“.

Zusammensetzung des Futtermittels Biokrma:

Weizen	19,7 %	Erbsen	5,0 %
Roggen	15,0 %	Eiweißkonzentrat P II	10,0 %
Gerste	29,0 %	Mineralfuttermittelzusatz MKP III	1,0 %
Hirse	20,0 %	Salz	0,3 %

Größen-Spektrum des Futtermittels Biokrma nach ČS-Norm

Größe der Teilchen in mm	< 0,2	0,2—2	2—2,8	> 2,8
Durchschnittl. Inhalt der Teilchen in %	23,5	73,2	2,2	1,1

Der Wassergehalt und die Temperatur der Mischung wurden im Verlauf der Versuche verändert, entsprechend den Bedürfnissen nach Einhaltung bestimmter, für die methodische Durchführung der Versuche notwendiger Verhältnisse.

Die Grenzwerte der Trockensubstanz betragen 9,5—25,9 %, die Grenzwerte der Temperatur 10 °C — 45 °C.

Aus der Literatur und aus den durchgeführten Messungen geht eindeutig hervor, daß ein fließfähiges Futtermittel für Schweine einen Nicht-Newton'schen Charakter hat. Bei diesen Flüssigkeiten läßt sich die allgemeine Funktionsabhängigkeit

$$\tau = \Phi(D)$$

wie auch

$$\tau = \mu D$$

nicht ausdrücken.

Bei Nicht-Newton'schen Flüssigkeiten ist daher das Verhältnis der Tangentialspannung zur Schubgeschwindigkeit nicht konstant. Für dieses Verhältnis wird die Bezeichnung „scheinbare Viskosität“ gebraucht. Zur vollständigen physikalischen Definition jeder Angabe zu dieser veränderlichen Größe ist es notwendig, die bezügliche Schubspannung oder den Gradient der Geschwindigkeit zu kennen. Die beste Charakteristik kann durch eine Messung der Fließkurve gewonnen werden. Eine Angabe der scheinbaren Viskosität, gemessen z. B. mit einem üblichen Viskosimeter ohne Angabe der Tangentialspannung oder des Gradienten der Geschwindigkeit stellt keine Materialkonstante dar und kann nur als Orientierung zum Vergleich mit einer gleichartigen Flüssigkeit dienen, die mit gleichen Apparaten und unter gleichen Bedingungen gemessen wurde. Da die Rheologie bisher keine allgemein gültige rheologische Gleichung des Durchflusses ausgearbeitet hat, ist es notwendig, mit experimentell bestimmten Fließkurven und mit empirisch aufgestellten Formeln zu arbeiten.

Aus dem oben Erwähnten geht hervor, daß die Messung an einem Gerät durchgeführt werden muß, welches in seinen

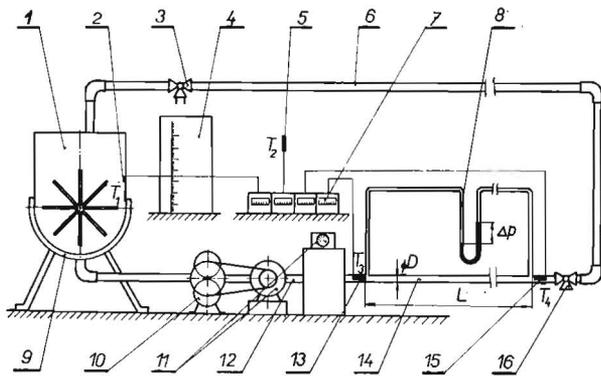


Bild 1: Versuchseinrichtung zur Messung des Druckverlustes beim Durchfluß durch Rohrleitungen (Schema)

- 1 = Mischer, 2 = Thermometerfühler, 3 = Dreiwegehahn, 4 = Maßgefäß, 5 = Thermometerfühler, 6 = Rückleitung, 7 = Punktregistrierapparate, 8 = Differenzdruckmesser, 9 = Anwärmer, 10 = Zahnradpumpe, 11 = Elektromotor mit regelbarer Drehzahl, 12 = Zahnradpumpe, 13 = Thermometerfühler, 14 = Meßrohrleitung, 15 = Thermometerfühler, 16 = Dreiwegehahn

Eigenschaften denjenigen Einrichtungen entspricht, die im Betrieb praktisch angewendet werden.

Das Schema des benützten Versuchsapparates ist auf Bild 1 und in wirklicher Ausführung auf Bild 2 dargestellt.

Er besteht aus einem Mischer mit Anwärmer, einer Zahnradpumpe mit Antrieb durch Elektromotor mit veränderlicher Drehzahl, einer gläsernen Rohrleitung mit Verbindungs- und Formstücken und der Meßvorrichtung. Zur Messung des Druckes und des Druckunterschiedes wurden offene Rohre von 15 mm Weite, welche mit der Rohrleitung durch Gummischläuche verbunden sind, verwendet. Der Druck wurde durch seitlich an der Rohrleitung angebrachte Öffnungen von 15 mm Durchmesser abgelesen. Vor und hinter der Stelle der Druckablesung wurden in die Rohrleitung Fühler von Widerstandsthermometern eingeschaltet. Weitere Fühler wurden im Mischer und im freien Raum des Laboratoriums angebracht. Die momentanen Temperaturen wurden direkt von der Skala der Punktregistrierapparate (Bild 2) abgelesen, welche die Möglichkeit einer graphischen Eintragung zum Beispiel für das Verfolgen der Abkühlung des Materials während der Zeit der Lagerung bieten. Die durchfließende Menge wurde durch Ableitung des Materials in einen Meßbehälter von 25 l Inhalt gemessen, wobei die benötigte Zeit mittels einer Stoppuhr festgelegt wurde.

Da in den angewandten Regionen der Fluß des Materials laminar ist und bei Einhaltung eines kleinen Temperaturunterschiedes bei den Versuchen als isothermisch betrachtet werden kann, so kann für die Bestimmung der einzelnen Punkte der Fließkurve auch für Nicht-Newton'sche Flüssig-

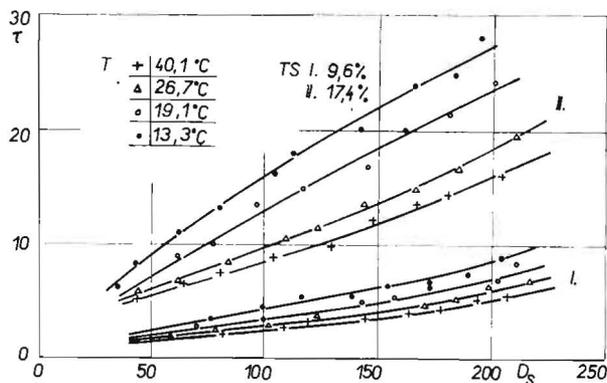


Bild 3: Fließkurven der Mischung Biokrma mit Wasser

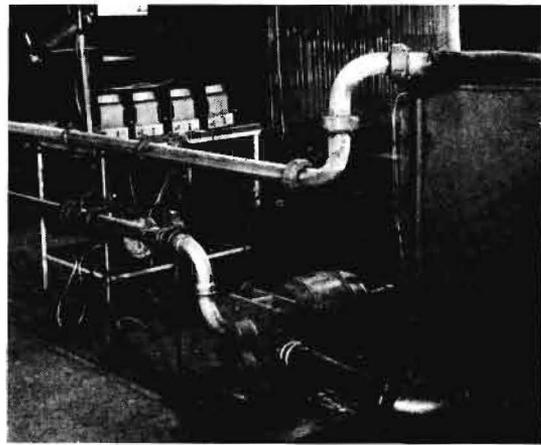


Bild 2: Darstellung der ausgeführten Meßeinrichtung zur Bestimmung des Druckverlustes beim Durchfluß durch Rohrleitungen

keiten die Beziehung zwischen dem Druckunterschied Δp und der Durchflußmenge Q_v angewendet werden:

$$\frac{\Delta p R}{2l} = \mu_z \frac{4 Q_v}{\pi R^3}$$

Die eigentliche Fließkurve erhalten wir durch die graphische Darstellung

$$\tau_s = \frac{\Delta p R}{2l} \text{ und } D_s = \frac{4 Q_v}{\pi R^3}$$

woraus mit Leichtigkeit μ_z festgestellt werden kann.

Die Mischung wurde direkt im Mischer zubereitet durch Einschüttung der erforderlichen Menge des Futtermittels Biokrma in Wasser von etwa 60 °C unter stetigem Umrühren. Mit den Versuchen wurde etwa 5 Minuten nach Beendigung der Mischvorgangs begonnen. Die einzelnen Versuche dauerten 10 bis 15 Minuten und folgten aufeinander immer in Abständen von etwa zwei Stunden.

Die Stoffdichte für die einzelnen Messungen wurde pyknometrisch aus den an der Meßstelle des Durchflußumfanges entnommenen Durchflußmustern festgestellt.

Die Trockensubstanz für die einzelnen Messungen wurde aus den Durchflußmustern bestimmt, welche an der Meßstelle laut ČS-Norm 46700 entnommen wurden.

Gemessene Werte und Art der Verarbeitung

Nach den angeführten Beziehungen wurden aus den gemessenen Werten des Druckunterschiedes Δp und des Durchflußmenge Q_v nach der Berechnung Δp (Pa) und Q_v [m³

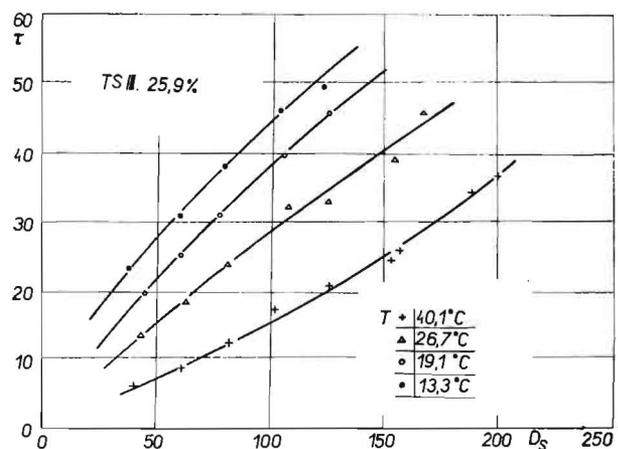


Bild 4: Fließkurven der Mischung Biokrma mit Wasser

s-1] die Werte der konsistenten Veränderlichen der Tangentialspannung τ_s und des Geschwindigkeitsgradienten D_s

für einzelne Trockensubstanzen und wechselnde Temperaturen der Mischung während der Zeit der Lagerung,

für einzelne Trockensubstanzen und eine konstante Temperatur der Mischung während der Zeit der Lagerung festgesetzt.

Graphisch sind die Abhängigkeiten τ_s, D_s in Bild 3 und 4 dargestellt.

Aus den Bildern läßt sich abschätzen, daß sich die Fließkurven der Mischung Biokrma mit Wasser bei verschiedenen Temperaturen nicht gleich verhalten. Es ist ersichtlich, daß die Tangentialspannung sowohl mit dem Geschwindigkeitsgradienten als auch mit der sinkenden Temperatur und der anwachsenden Trockensubstanz ansteigt. Aus der Form der Fließkurven läßt sich schließen, daß für den analytischen Ausdruck der Abhängigkeit der Schubgeschwindigkeit von der Tangentialspannung potenzierte Funktionen angewendet werden können. Die am häufigsten angewandte Formel ist die Formel von OSTWALD und WAELE

$$\tau = K \left(\frac{du}{dy} \right)^n$$

oder

$$\tau = K \left(\frac{d\tau}{dy} \right)^{n-1} \cdot \left(\frac{du}{dy} \right)$$

wo der Wert $K \left(\frac{du}{dy} \right)^{n-1}$ die scheinbare Viskosität der Nicht-Newton'schen Flüssigkeit darstellt. Die Größen K und n sind Stoffparameter, welche die Eigenschaften des Durchflusses charakterisieren.

Wenn wir also die gemessenen Werte der Tangentialspannung mit dem Geschwindigkeitsgradienten in einer logarithmischen Staffel veranschaulichen, erhalten wir den linearen Verlauf der Abhängigkeit und können mit Leichtigkeit durch die graphisch-mathematische Berechnungsmethode die gesuchten Größen K und n festsetzen. Auf Bild 5 sind z. B. Fließkurven für die Trockensubstanz 25,9% angeführt.

Um eine bessere Beurteilung des Verhaltens der Flüssigkeit in Abhängigkeit von verschiedenen Temperaturen und für verschiedene Trockensubstanzen zu ermöglichen, wurden

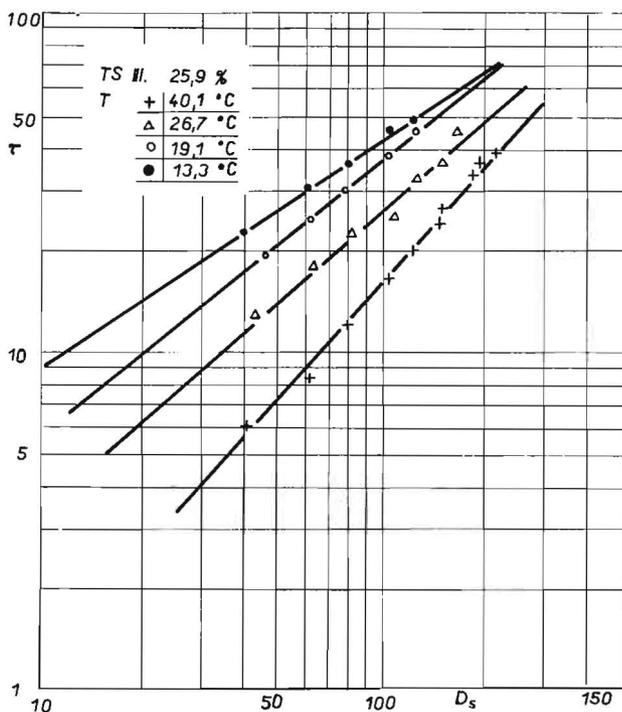


Bild 5: Fließkurven in Logarithmenstaffel

noch Darstellungen der Veränderung der scheinbaren Viskosität mit dem Geschwindigkeitsgradienten (Bild 6) zusammengestellt.

Es ist ersichtlich, daß eine Mischung mit einer Trockensubstanz von 9,6% für die geprüften Temperaturen überwiegend einen linearen, sehr mäßigen Anstieg der Scheinviskosität beibehält, so daß gesagt werden kann, daß sie sich dilatant verhält. Allerdings bei einer groben Annäherung ist ihre Nicht-Newton'sche Abweichung minimal.

Die Kurven für die Trockensubstanz 17,4% und 25,9% haben einen gänzlich abweichenden Charakter. Alle beide Kurvensysteme zeigen bei höherer Temperatur ein Ansteigen der scheinbaren Viskosität mit dem Gradienten der Geschwindigkeit, so daß in dieser Phase das Verhalten des fließfähigen Futtermittels als dilatant betrachtet werden kann; bei sinkender Temperatur findet augenscheinlich ein Übergang über die Phase des rein Newton'schen Charakters statt, wobei die scheinbare Viskosität mit dem Gradienten der Geschwindigkeit konstant bleibt und schließlich im Laufe der weiteren Abkühlung in die pseudoplastische Phase übergeht, in welcher die scheinbare Viskosität mit dem Gradienten der Geschwindigkeit abnimmt.

Auch wenn die Anwendung des Begriffes der scheinbaren Viskosität nicht die Möglichkeit einer weiteren mathematischen Verarbeitung gewährt, ist auf Bild 7 zwecks näherer Erläuterung die Abhängigkeit der scheinbaren Viskosität von der Trockensubstanz der Mischung angeführt. Zur Veranschaulichung wurden Gradienten der Geschwindigkeit 50 und 200 als äußerste gemessene Werte ausgewählt. Es ist ersichtlich, daß im Bereich der angewandten Temperaturen und Geschwindigkeitsgradienten die Abhängigkeit einen ähnlichen Charakter haben. Mit sinkender Temperatur haben die Kurven einen steileren Verlauf und es kann gesagt werden, daß man die ungünstigsten Werte der scheinbaren Viskosität bei kühlen Mischungen mit maximaler Trockensubstanz erhält.

Der Durchfluß der Futtermischung durch Rohrleitungen

Für die Berechnung der Druckverluste beim Durchfluß des Futtermittels durch Rohrleitungen ist es wichtig, die Beziehung zwischen der Fließgeschwindigkeit und dem Druckgefälle derart auszudrücken, daß dieselbe leicht anwendbar ist und dabei nichts an ihrer Allgemeinheit verliert. Dieser Forderung entspricht sehr gut die Beziehung zwischen dem dimensionslosen Argument von REYNOLDS und EULER, wobei die Funktion der Reynold'schen Zahl den Reibungskoeffizienten ausdrückt.

Als geeignet kann folgender Vorgang der Berechnung betrachtet werden:

Die Gleichungen des isothermen Durchflusses werden vorerst nach dem Analogieverfahren oder nach der Maßanalyse gelöst, damit die zugehörigen dimensionslosen Kriterien gefunden werden können. Die analytische Lösung dieser Gleichungen wird dann mit Hilfe der gefundenen Kriterien in eine Formel gebracht, die für einen schnellen graphischen oder mathematischen Vorgang der Berechnung der Druckverluste geeignet ist.

Für die Potentialgleichung des Durchflusses, welche zur Veranschaulichung der Fließkurven angewandt wurde, genügen nach π -Theorem der Maßanalyse vier dimensionslose Kriterien, um die Kriterialequation auszudrücken.

$$\pi_1 = \frac{\Delta p_l}{\rho u^2} = Eu; \pi_2 = \frac{d^u u^{2-n}}{K} = Re_{ow}$$

$$\pi_3 = \frac{d^n u^{2-n}}{nK} = Re''_{ow}; \pi_4 = \frac{l}{d}$$

Da sich die Argumente π_2 und π_3 nur durch den Koeffizienten unterscheiden, vereinfacht sich das System der Kriterien, wenn wir anstatt π_2 oder π_3 deren Anteil

$$\pi_2 = \pi_3 = n$$

anwenden.

Die Kriteriale Gleichung für fließfähige Futtermischungen wird dann die Form

$$Eu = \Phi \left(Re_{ow}, \frac{l}{d}, n \right)$$

haben.

Mathematisch kann diese Gleichung folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$Eu = \psi(n) \frac{1}{Re_{ow}} \frac{l}{d}$$

Für den Gefälleverlust J [m] gilt

$$J = \frac{\Delta p_t}{\rho g} = \frac{2 \psi(n)}{Re_{ow}} \frac{\bar{u}^2}{2g} \frac{l}{d}$$

und wenn wir die übliche Form der Gleichung Darcy-Weissbach beibehalten, dann wird

$$J = f \frac{\bar{u}^2}{2g} \frac{l}{d}$$

$$\text{wobei } f = \frac{2 \psi(n)}{Re_{ow}} = \frac{2 \Delta p_t \cdot d}{\rho \bar{u}^2 l}$$

Graphisch kann diese Funktion, welche die allgemeine Kriteriale Gleichung ausdrückt, als Funktion der drei Veränderlichen veranschaulicht werden, wobei der Fließindex n als Parameter auftritt.

Die Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten f vom Fließindex n und vom Reynold'schen Kriterium Re_{ow} ist für die gemessenen Trockensubstanzen auf Bild 8, 9 und 10 veranschaulicht. Gleichzeitig sind hier auch die Werte des Gefälleverlustes J aufgetragen, welche die Verhältnisse bei unseren Messungen anschaulich zeigen.

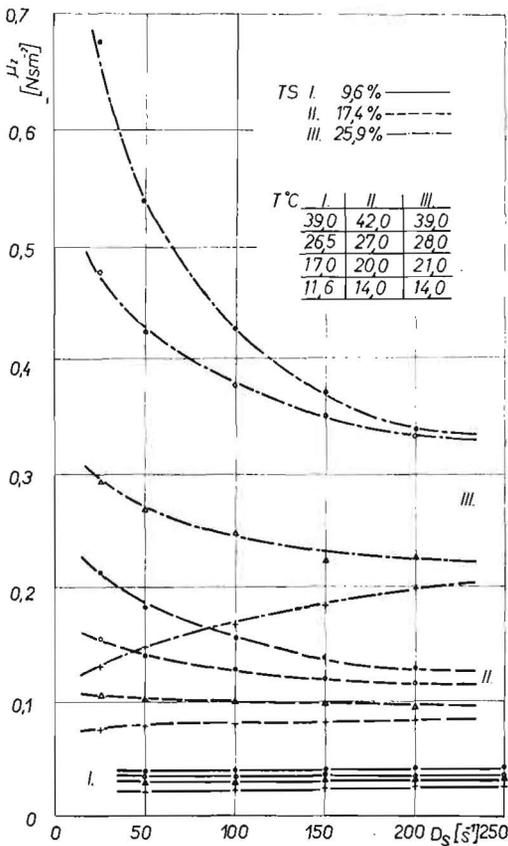


Bild 6: Abhängigkeit der scheinbaren Viskosität vom Gradienten der Geschwindigkeit

Die Verallgemeinerung hat hauptsächlich den Vorteil, daß aufgrund der durchgeführten Messungen lichte Weiten von Rohrleitungen aller Arten, daher nicht nur diejenigen der angewendeten Rohrleitungen berechnet werden können. Wenn weiterhin noch zwei wichtige Bedingungen eingehalten werden, nämlich wenn es nicht zur Ausscheidung von Wasser an den Wänden der Rohrleitung kommt und wenn der Durchfluß laminar ist, so ist es möglich, die Ergebnisse auch auf Rohrleitungen aus anderem Material als demjenigen der Versuchsrohrleitung anzuwenden.

Es ist daher ersichtlich, daß aufgrund der Kenntnis von K , n , ρ , d , l und der Abhängigkeit f , Re_{ow} der Durchfluß in der Rohrleitung vollständig beschrieben und der Leistungsbedarf für das Pumpen der Futtermischung mit Leichtigkeit festgesetzt werden kann.

Zwecks leichterer Orientierung in den Werten des Koeffizienten der Konsistenz K und des Fließindex n wurde eine Darstellung ihrer Abhängigkeit von der Trockensubstanz der Futtermischung zusammengestellt (Bild 11). Als Parameter wird hier die Temperatur der Mischung angewendet. Wir sehen, daß sich K bei einer warmen Mischung (ca. 40 °C) um 0,1 bewegt und mit der Abkühlung der Mischung und mit dem zunehmenden Prozent der Trockensubstanz stark ansteigt bis auf 2,0 und mehr. Demgegenüber bewegt sich n bei einer warmen Mischung um 1,1 bis 1,3 und sinkt bei Abkühlung der Mischung und wachsender Trockensubstanz bis auf 0,6 ab.

Wenn wir die auf Bild 8, 9 und 10 graphisch veranschaulichten, gemessenen Werte des Reibungskoeffizienten f einer Analyse unterziehen, sehen wir, daß die einzelnen Geraden für ähnliche n ohne Rücksicht auf die Trockensubstanz der Mischung ähnliche Koordinaten haben. Deshalb wurde eine Interpolation durchgeführt, nach welcher die Gerade für $n = 1$ und die gegenseitige Entfernung der Geraden in aufsteigender und absteigender Linie für 0,1 n bestimmt wurde. Die so erhaltenen Geraden sind auf Bild 12 dargestellt, die auch voll den Werten entsprechen, welche auch durch eine theoretische Lösung der allgemeinen Kriteriale Gleichung festgesetzt werden können. Es ist daher ersichtlich, daß die Werte f , welche für die Berechnung der Verhältnisse bei der Beförderung von fließfähigen Futtermitteln für Schweine notwendig sind, für die einzelnen n direkt aus der Darstellung abgelesen werden können.

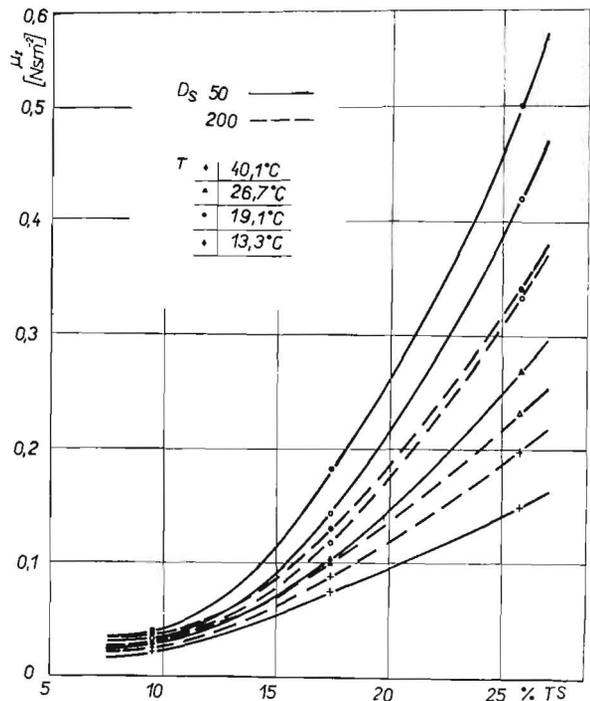


Bild 7: Abhängigkeit der scheinbaren Viskosität von Trockensubstanz

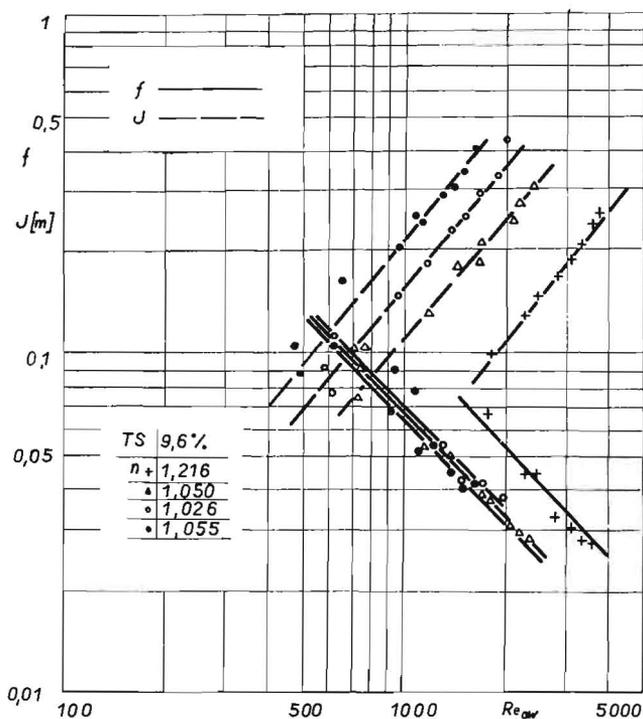


Bild 8: Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten f und der Druckverluste J von Füllindex n und Re_{ow} bei Trockensubstanz 9,6 %

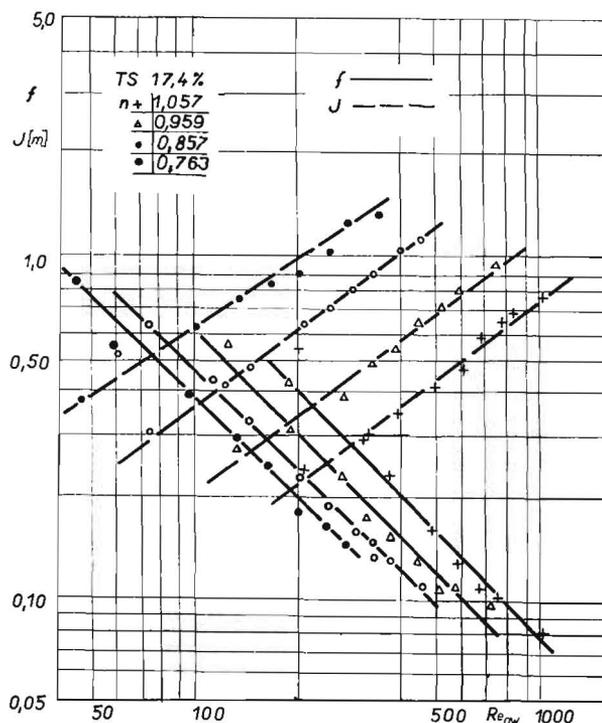


Bild 9: wie Bild 8, jedoch Trockensubstanz 17,4 %

Eine weitere, für die Berechnung der Einrichtung erforderliche Größe ist die Stoffdichte der fließfähigen Futtermittel. Bei unseren Messungen wird die Stoffdichte aus den Durchflußmustern bestimmt und die durch Messung gewonnenen Werte sind in Abhängigkeit von der Trockensubstanz auf Bild 13 angeführt. Es ist klar, daß es sich um eine lineare Abhängigkeit handelt, wobei die Trockensubstanz (bezeichnet als 100—W), welche gleich 0 ist, die Stoffdichte in kg m^{-3} annähernd gleich 1000 ist. Den Richtungskoeffizienten dieser Geraden, welche einen Punkt der Koordinaten 100—W = 0, $\rho = 1000$ durchschneidet, können wir mittels der Methode der kleinsten Quadrate festsetzen, wodurch sich der mathematische Ausdruck auf

$$k = \frac{\sum y - 1000}{\sum x}$$

vereinfacht.

Für die Durchführung der Berechnung ist dann das Stoffgewicht

$$\rho = 1000 + 3,43 (100 - W) \text{ [kg m}^{-3}\text{].}$$

Bei den beschriebenen Messungen des Durchflusses von Futtermittelmischungen durch Rohrleitungen wurden Abhängigkeiten im Zusammenhang mit der fortschreitenden Abkühlung der Mischung verfolgt. Die interessante Frage nach den Veränderungen im Verhalten der Mischung während der Zeit der Lagerung bei Erhaltung einer annähernd konstanten Temperatur wurde nicht untersucht.

Deshalb wurde ein weiterer Versuch folgendermaßen angestellt:

Bei einer Temperatur des Wassers von etwa 60 °C wurde die bezügliche Trockensubstanz gemischt und nach einem etwa 5 Minuten andauernden Mischen und nach Anwärmen der Rohrleitung, in welcher die Temperatur auf etwa 45 °C gesunken war, wurde mit der Messung begonnen. Beim Mischen wurde ein Anwärmemantel eingeschaltet, und die Temperatur wurde nach Beendigung des Versuches ständig auf 40 bis 45 °C gehalten. Dreimal, immer je nach zwei Stunden wurde die Messung wiederholt, dann ließ man die Mischung abkühlen, nach 24 Stunden wurde sie wiederum angewärmt, und es wurden weitere Messungen vorgenom-

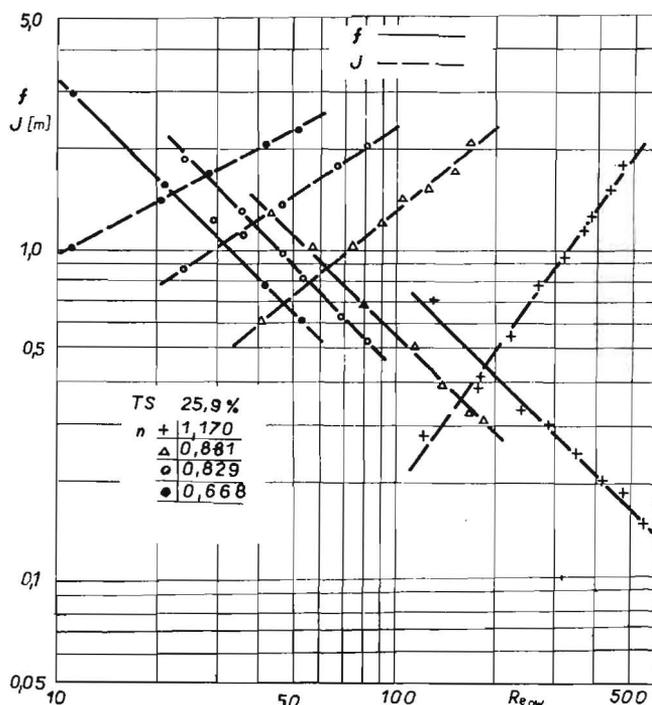


Bild 10: wie Bild 8, jedoch Trockensubstanz 25,9 %

men. Für die Beurteilung des Verhaltens der Mischung wurde als Kriterium die scheinbare Viskosität angenommen. Ihre Veränderungen für verschiedene Geschwindigkeitsgradienten sind auf Bild 14 veranschaulicht.

Bei kleineren Gradienten findet zunächst ein Absinken der scheinbaren Viskosität statt, die aber dann einen konstanten Wert beibehält oder mäßig ansteigt. Bei Gradienten höherer Schnelligkeiten ist zuerst ein Anstieg, dann ein Absinken und wiederum ein mäßiger Anstieg zu verzeich-

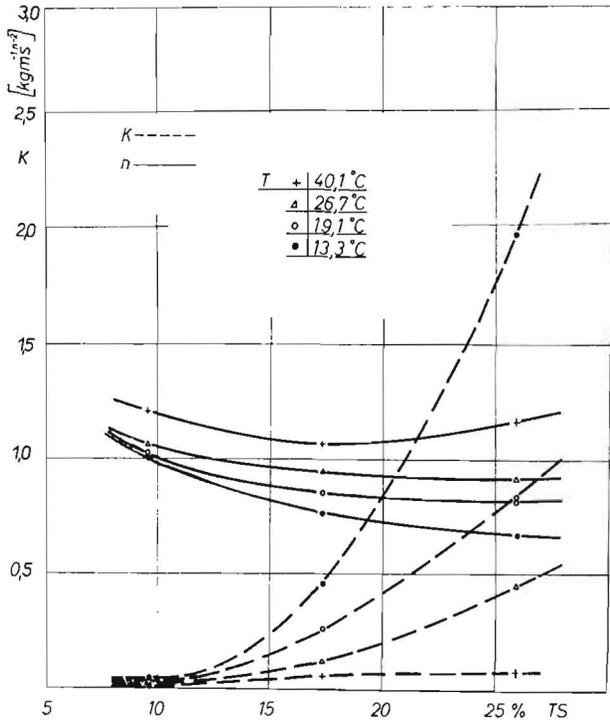


Bild 11: Abhängigkeit des Konsistenz-Koeffizienten K und des Fließindex n von der Trockensubstanz

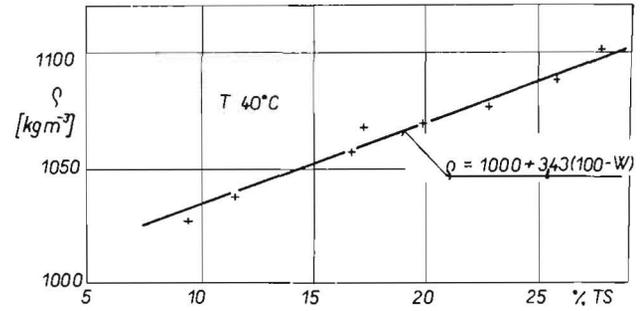


Bild 13: Abhängigkeit der Stoffdichte von der Trockensubstanz

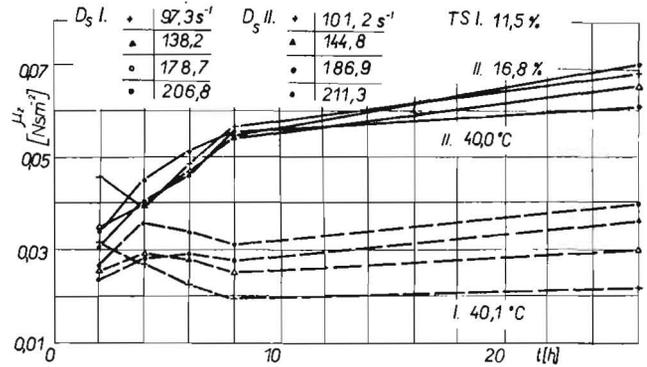


Bild 14: Veränderungen der scheinbaren Viskosität mit der Zeit der Lagerung

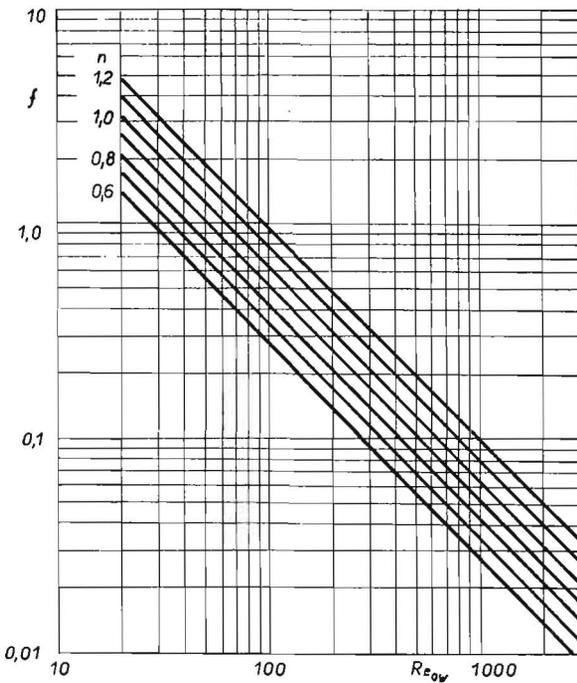


Bild 12: Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten f von Fließindex n und Re_{ov}

nen. Bei einer Trockensubstanz 16,8 % ist ein ständiges Steigen zu bemerken. Insgesamt kann gesagt werden, daß die Veränderungen im Laufe der Zeit der Lagerung nicht groß sind.

Zusammenfassung

Aufgrund des Studiums der zugänglichen Literatur wurde festgestellt, daß die publizierten Ergebnisse nicht in irgendein System eingereiht werden können, aus dem es möglich wäre, die Unterschiede in den Ergebnissen zu erklären. Die veröffentlichten Messungen müssen daher als einzelne Teil-

abschnitte betrachtet werden, aus denen keine allgemeinen Schlüsse gezogen werden können. Unsere Versuche waren daher darauf gerichtet, einen Gesamtüberblick über das Verhalten von fließfähigen Futtermitteln in Abhängigkeit von der Trockensubstanz und der Temperatur der Mischung zu gewinnen. Als Grundmischung wurde das Futtermittel Biokrma plus Wasser in Trockensubstanzen von etwa 10 bis 30 % und bei Temperaturen von etwa 10 °C bis 45 °C gewählt.

Diese Mischung verhält sich beim Durchfluß durch Rohrleitungen wie eine Nicht-Newton'sche Flüssigkeit, welche in Abhängigkeit von der Temperatur bei höheren Temperaturen (um 40 °C) einen mäßig dilatanten Charakter hat, beim Sinken der Temperatur geht sie über den Newton'schen Charakter bis in den pseudoplastischen Charakter über. Die scheinbare Viskosität bewegt sich in den Grenzen von etwa 0,02 bei einer Temperatur um 40 °C und einer Trockensubstanz von 10 % bis zu 0,6 bei einer Temperatur um 10 °C und einer Trockensubstanz von 26 %. Bei einer Fließgeschwindigkeit in der Rohrleitung von 1,3 ms⁻¹ ist die Veränderung der scheinbaren Viskosität schon gering und die scheinbare Viskosität kann weiterhin als konstant betrachtet werden.

Zur Veranschaulichung der Fließkurven wurde die Potentialgleichung des Durchflusses angewendet und die Funktion, welche die allgemeine Kriterial-Gleichung ausdrückt, wurde als Abhängigkeit dreier Veränderlichen mit dem Fließindex als Parameter graphisch veranschaulicht. Aus dieser Darstellung läßt sich für verschiedene Fließindices, welche in einer anderen Darstellung in Abhängigkeit von der Temperatur und der Trockensubstanz der Mischung veranschaulicht werden, der Reibungskoeffizient bestimmen, dessen Kenntnis für die Berechnung des Druckverlustes in Rohrleitungen unumgänglich notwendig ist. Wenn wir also den Koeffizienten der Konsistenz K (die Abhängigkeit des Konsistenz-Koeffizienten von der Temperatur und von der Trockensubstanz der Mischung wird graphisch veranschaulicht), ferner den Durchmesser der Rohrleitung und deren Länge kennen, ist es möglich, den Durchfluß des Futtermittels voll zu beschreiben und auch den für das Pumpen erforderlichen Leistungsbedarf zu ermitteln.

Schrifttum:

- [1] BLAŽEK J.: Použití pneumatického principu při dopravě mokrého krmiva pro prasata. Zpráva VSZ Praha, 1962
(Anwendung des pneumatischen Prinzips bei der Beförderung von nassen Futtermitteln für Schweine. Bericht der Landwirtschaftlichen Hochschule Prag, 1962)
- [2] HERUM F.L., ISAACS G.W., PEART R.M.: Flow Properties of Highly Viscous Organic Pastes and Slurries. Transactions of the ASAE 1, 1966
- [3] LEITGEB S.: Mikrobiální pochody v tekutém krmí vu pro prasata, Sborník ČSAZV Praha, 1961, č.12
(Mikrob. Vorgänge in flüssigen Futtermitteln für Schweine. Sammlung der Tschechoslowakischen Akademie der landwirtschaftl. Wissenschaften Prag, 1961, Nr. 12)
- [4] LICHACEV F. S.: Pneumatičeskij transport kormov na svinovodičeskich fermach, Materialy naučne-metodičeskogo sověščenija po probleme "razrabotka metodov mehanizacii i avtomatizacii proizvodstvennyh procesov v životnovodstve i pticovodstve", Moskva 1965
(Pneumatische Beförderung von Futtermitteln auf Schweinemastfarmen, wissenschaftlich-methodische Dokumente der Konferenz über das Problem „Ausarbeitung von Methoden über die Mechanisierung und Automatisierung von Erzeugungsprozessen in der tierwirtschaftlichen Produktion und in der Geflügelzucht“, Moskau 1965)
- [5] LICHACEV F.S.: Transportyrovanije žitkyh i pastoobraznyh kormovyh směsej potrubam pri pomošči sžatogo vozducha, Elektrifikacija selskogo chozajstva, Moskva 1965
(Beförderung von flüssigen und pastenähnlichen Futtermischungen durch Rohrleitungen mit Hilfe von Druckluft, Elektrifizierung der Landwirtschaft, Moskau 1965)
- [6] TSCHIERSCHE M.: Das Verhalten fließfähiger Futtermischungen beim Durchfluß durch horizontale Rohrleitungen, Archiv für Landtechnik, DAL 1963/64, Heft 3
- [7] ULBRECHT J., MITSCHKA P.: Chemické inženýrství nenewtonských kapalin, CSAV Praha 1965
(Chemisch-technisches Verhalten Nicht-Newton'scher Flüssigkeiten, Tschechoslowakische Akademie der Wissenschaften Prag 1965)
- [8] VENKREBEC L.: Mechanizace výkrmu prasat. Metodiky pro zavádění výsledků výzkumu do praxe, ÚVTI Praha 1963, č.8
(Mechanisierung der Schweinemast. Methoden für die Einführung der Forschungsergebnisse in die Praxis. Zentrale wissenschaftlich-technischer Informationen Prag 1963, Nr. 8)

Résumé

J. Fiala: "The Behaviour of Viscous Food Mixtures for Pigs when Flowing through Pipes"

In studying the available literature it was found that the results published cannot be assigned to some system by means of which it would be possible to explain the various differences of the results. Therefore, the measurements published have to be considered as individual partial sections, from which no general conclusions can be drawn. Thus, our experiments were aimed at obtaining a total view of the behaviour of viscous foodstuffs in relation to the dry matter content and temperature of the mixture. The food Biokrma plus water was chosen as basal mixture, the dry matter content being about 10—30% and the temperature approximately 10—45° C.

When flowing through pipes this mixture behaves like a non-Newton fluid which shows a moderately dilatant character at higher temperatures (approx. 40° C). When temperature decreases, the mixture passes the Newton character up to the pseudoplastic character. The apparent viscosity ranges from about 0,02 at a temperature of 40° C and a dry matter content of 10% to 0,6 at a temperature near 10° C and 26% dry matter content. With a flow speed of 1,3 m/sec in the pipes, the apparent viscosity changes little and can be considered further as constant.

For demonstrating the flow curves, the potential equation of the flow was applied, and the function expressing the general criterion equation was shown graphically with the flow index as parameter in relation to three variables. From this graph the coefficient of friction can be determined for various flow indices, which are shown by another representation in relation to temperature and dry matter content of the mixture. This knowledge is absolutely necessary for calculating the pressure loss in the pipes. Thus, if we know the coefficient of consistence K (the dependence of the coefficient of consistence on temperature and dry matter of the mixture is shown graphically) as well as the diameter of the pipes and their length, it is possible to describe in detail the flow of the food and to determine also the power required for pumping.

J. Fiala: L'écoulement dans les tuyauteries de transport de mélanges dilués destinés à l'alimentation de porcs.

En étudiant la littérature spéciale, l'auteur a constaté que les résultats publiés sur l'écoulement de mélanges d'aliments ne peuvent être classés dans un système dont on pourrait déduire une explication des différences des résultats. Les mesures publiées doivent donc être considérées comme des cas isolés dont on ne peut tirer des conclusions générales. Les recherches de l'auteur ont eu pour but d'obtenir une connaissance générale sur le comportement dans les tuyauteries de transport de mélanges dilués en fonction de leur teneur en matière sèche et de leur température. Comme mélange prototype, l'auteur avait choisi le produit Biokrma mélangé à l'eau dans une proportion de 10 à 30% de substance sèche et dont la température peut varier entre 10 et 45° C.

Ce mélange se comporte pendant l'écoulement dans les tuyauteries de transport comme un liquide non-newtonien qui montre un caractère faiblement dilatant à des températures élevées (à environ 40° C). Quand la température abaisse, il passe par un caractère newtonien pour aboutir à un état pseudo-plastique. La viscosité apparente se situe dans les limites d'environ 0,02 à une température d'environ 40° C et à une teneur en matière sèche de 10% et de 0,6 à une température de 10° C et à une teneur en matière sèche de 26%. A une vitesse d'écoulement de 1,3 m/sec. dans la tuyauterie de transport, la variation de la viscosité apparente est déjà infime et elle peut être considérée comme constante quand la vitesse d'écoulement dépasse cette valeur.

Afin de représenter les courbes d'écoulement, l'auteur a appliqué l'équation potentielle de l'écoulement et la fonction qui exprime l'équation critique générale, a été représentée graphiquement en dépendance de trois variables avec l'indice d'écoulement comme paramètre. Grâce à ce diagramme on peut déterminer pour différents indices d'écoulement qui sont représentés par un autre diagramme en fonction de la température et de la teneur en matière sèche du mélange, le coefficient de frottement dont la connaissance est nécessaire en vue du calcul de la perte de charge dans la tuyauterie. Quand on connaît le coefficient de la consistance K (la dépendance du coefficient de consistance K de la température et de la teneur en matière sèche du mélange est reproduite par un diagramme), ainsi que le diamètre de la tuyauterie et sa longueur, il est possible de décrire l'écoulement du mélange et de déterminer en outre la puissance absorbée par le pompage.

J. Fiala: El comportamiento a su paso por tuberías de mezclas deslizables de piensos para ganado porcino

A base del estudio de la literatura disponible se precisó que los resultados publicados no pueden ser incluidos en ningún sistema a partir del cual sea posible aclarar las distintas diferencias en los resultados. Las mediciones publicadas han de ser consideradas, por tanto, como secciones parciales sueltas de las que no se pueden sacar conclusiones generales. Nuestras pruebas estaban dirigidas, por consiguiente, a obtener una vista de conjunto en torno al comportamiento de piensos deslizables en razón de la sustancia seca y de la temperatura de la mezcla. Como mezcla base se eligió el pienso Biokrma más agua en sustancias secas de aprox. un 10 a un 30% y temperaturas de unos 10° C a 45° C.

Esta mezcla se comporta al pasar por tuberías como un líquido "no newtoniano" que, en dependencia de la temperatura, tiene a temperaturas más bien elevadas (alrededor de los 40° C) un carácter moderadamente dilatante y que, al disminuir la temperatura, pasa por el carácter "newtoniano" hasta el pseudoplástico. La viscosidad aparente se mueve en los límites de aprox. 0,02 a una temperatura de alrededor de los 40° C y un porcentaje del 10% de sustancia seca hasta 0,6 a una temperatura de alrededor de 10° C y un

porcentaje del 26 % de sustancia seca. Para una velocidad de deslizamiento por la tubería de 1,3 m/seg. resulta ya pequeña la modificación de la viscosidad aparente, pudiéndose seguir considerando ésta como constante. Para mostrar las curvas de deslizamiento se empleó la ecuación potencial del paso, y la función que expresa la ecuación criterial general se demostró gráficamente como parametro como dependencia de tres variables con el índice de fluidez. Partiendo de esta representación es posible determinar para diferentes índices de fluidez, que en otra

representación son explicados en función de la temperatura y de la sustancia seca de la mezcla, el coeficiente de fricción, cuyo conocimiento es completamente indispensable para el cálculo de la pérdida de presión en las tuberías. Así, pues, si conocemos el coeficiente de la consistencia K (la dependencia del coeficiente de consistencia de la temperatura y de la sustancia seca de la mezcla se representa gráficamente) y, además, el diámetro del conducto y su longitud, es posible describir plenamente el paso del pienso y también determinar la potencia de bombeo requerida.

Fred W. Bakker-Arkema, W. G. Bickert und R. V. Morey:

Gekoppelter Wärme- und Stoffaustausch während des Trocknungsvorgangs in einem Behälter mit Getreide ¹⁾

Agricultural Engineering Department, Michigan State University East Lansing, Michigan, USA

Zeichenerklärung

D	cm ² /h	Diffusionskoeffizient
G	kp/h · cm ²	Spezifischer Luftdurchsatz
H	—	Spezifische Luftfeuchtigkeit (kp H ₂ O/kp trockene Luft)
H''	—	Spezifische Luftfeuchtigkeit in der Grenzschicht
\bar{M}	—	Durchschnittlicher Feuchtigkeitsgehalt, bezogen auf trockenen Stoff in %
M	—	Feuchtigkeitsgehalt bezogen auf trockenen Stoff in %
d	cm	Durchmesser der im Behälter befindlichen Teilchen
p_{atm}	kp/cm ²	Atmosphärischer Druck
p_{sat}	kp/cm ²	Sättigungsdampfdruck
RH	—	Relative Luftfeuchtigkeit
S	cm ²	Fläche des Behälterquerschnitts
T	°C	Lufttemperatur
v_a	cm/h	Vertikale Luftgeschwindigkeit
a	cm ² /cm ³	Verhältniszahl von Oberfläche des Füllgutes zum Behältervolumen
c_a	kcal/kp · °C	Spezifische Wärme der Luft
c_g	kcal/kp · °C	Spezifische Wärme des Füllgutes
α	kcal/h · cm ² · °C	Wärmeübergangszahl
r	kcal/kp	Verdampfungswärme
m	—	Index des Weges „x“ im Behälter
n	—	Index der Zeit „t“
o	—	Zeitnullpunkt oder Lagenullpunkt
t	h	Zeit
x	cm	Koordinate der Entfernung vom Luft-eintrittspunkt
Δx	cm	Entfernungszuwachs im Behälter
Δt	h	Zeitzuwachs
θ	°C	Temperatur des Füllgutes
μ	kp/cm · h	Absolute Viskosität
ε	—	Durchlässigkeit des Füllgutes, dezimal
ρ_a	kp/cm ³	Dichte der Luft
ρ_g	kp/cm ³	Dichte des Füllgutes
σ	kp/cm ² · h · H	Austauschkoeffizient der strömenden Masse (kp H ₂ O/cm ² · h · ΔH)
Re	—	Reynoldsche Zahl
Sc	—	Schmidtsche Zahl

Einleitung

In einer Serie von Arbeiten [1, 2, 3, 4, 5] haben die Autoren eine analytische Beschreibung der Wärme- und/oder Stoffaustauschvorgänge bei verschiedenen landwirtschaftlichen Produkten in Behältern gegeben. Zwei der Arbeiten [1, 5] befaßten sich ausschließlich mit dem Wärmeaustausch in Behältern und stützten sich auf die einschlägige Arbeit von SCHUMANN [6]. Die Produkte, die bei diesen Untersuchungen verwendet wurden, waren Zuckerrüben und Erbsen. Die dritte Untersuchung betraf den isothermischen Stoffaustausch in einem Behälter mit wieder angefeuchteten Bohnen. Diese Arbeit stützte sich auf Anregungen von MEEL in dessen Arbeit über Trocknung [7]. In den letzten beiden Arbeiten wandten die Autoren die Theorie des gleichzeitigen Wärme- und Stoffaustausches auf das Kühlen eines Großbehälters mit Kirschkernen an. Zuerst wurde der Fall mit konstanten Luftströmungsbedingungen und einheitlichen Anfangstemperaturen im Behälter behandelt [3]. Anschließend wurde das Problem der Kühlung eines Großbehälters mit landwirtschaftlichen Produkten bei unterschiedlichen Luftströmungsbedingungen (z. B. Eintrittslufttemperatur, spezifische Feuchtigkeit, Luftströmungswert) und nicht einheitlichen Anfangstemperaturen im Behälter gelöst [4].

Kirschkerne, das landwirtschaftliche Produkt, das in den beiden letzten Untersuchungen [3, 4] verwendet wurde, haben einen viel höheren Feuchtigkeitsgehalt unmittelbar nach der Ernte als Getreide. Während der Trocknungswert bei Getreide im Laufe der Trocknungsperiode abnimmt, weisen Kirschkerne während des größten Teils ihrer Trocknungszeit einen konstanten Trocknungswert auf. In der Analyse wird gezeigt werden, daß bei Produkten mit abfallendem Trocknungswert das Problem der Trocknung im Großbehälter mathematisch viel schwieriger darzustellen ist als Probleme, die das Trocknen von Produkten mit konstantem Wert, wie z. B. Kirschkernen, betreffen.

Das meiste veröffentlichte Material über Wärme- und Stoffaustauschvorgänge bei landwirtschaftlichen Produkten befaßte sich mit dem Trocknen von dünnen Schichten [8, 9, 10]. Kürzlich haben Forscher erstmals die Austauschvorgänge in einem Großbehälter mit durchströmten landwirtschaftlichen Produkten mathematisch simuliert. KRISCHER [11] hat in seinem Standardwerk über Trocknungsvorgänge in beschränktem Umfang Angaben über das Trocknen von Getreide in Großbehältern gemacht. Die Anzahl von Voraussetzungen, die in Krischers Analyse benötigt werden, verhindern jedoch die häufige praktische Verwendung seiner Methoden. KLAPP [12] gab einen bedeutenden theoretischen Beitrag zu der Untersuchung von gekoppelten Wärme- und Stoffaustauschvorgängen in nicht-isothermischen Behälter-

¹⁾ s. a. Michigan Agricultural Experiment Station Journal Article No. 4243