

# Berechnung des Druckverlustes bei der Förderung konzentrierter landwirtschaftlicher Suspensionen in Rohrleitungen

Dr.-Ing. M. Türk, KDT, Institut für Mechanisierung Potsdam-Bornim der AdL der DDR

## 1. Problemstellung

Durch die Intensivierung der industriemäßigen Tierproduktion, besonders bei gezieltem Einsatz von Futtermischungen neuartiger Zusammensetzungen, gewinnen fundierte Berechnungs- und Auslegungsverfahren für den landtechnischen Anlagenbau zunehmend an Bedeutung. Voraussetzung ist vor allem die Kenntnis des Verhaltens und der Gesetzmäßigkeiten landwirtschaftlicher Stoffe bei den verschiedenen verfahrenstechnischen Prozessen. Oftmals handelt es sich um fluide Medien, die in ihrem mechanischen Verhalten Anomalien aufweisen. So ist zur Berechnung von Verteilanlagen für die fließfähige Fütterung in der industriemäßigen Schweineproduktion die Kenntnis der Druckverlustanteile von geraden Rohren und örtlichen Widerständen (Formstücke und Armaturen) notwendige Voraussetzung, d. h. das Reibungsverhalten des strömenden Fluids in diesen Bauteilen muß bekannt sein.

Grundlage dazu ist die Kenntnis des Fließverhaltens dieser nicht-Newtonschen Medien, wobei besonders trockensubstanzreiche Hackfruchtfuttermischungen als konzentrierte Suspensionen mit grobdisperssem Feststoffanteil ein äußerst kompliziertes Verformungsverhalten zeigen [1].

Mit Hilfe experimentell ermittelter Fließkurven können Reibungs- oder Fließgesetze abgeleitet und Durchsatz-Druckverlust-Abhängigkeiten für die laminare Strömung in kreisrunden Rohren berechnet werden, wobei grundsätzlich zwischen zwei Strömungsfällen unterschieden werden muß:

- Gültigkeit der Wandhaftungsbedingung  $v(R) = 0$
- Auftreten durchsatz erhöhender Wandgleiteffekte.

## Verwendete Formelzeichen

|                       |                            |   |
|-----------------------|----------------------------|---|
| a, b                  |                            | Konstanten der Regressionsfunktion $\beta_s = f(\tau_w)$              |
| $D_N$                 | 1/s                        | Newtonsches Schergefälle  |
| $D_w$                 | 1/s                        | korrigiertes Schergefälle nicht-Newtonscher Medien                    |
| d                     | m                          | Rohrinnendurchmesser  |
| Eu                    |                            | Euler-Zahl  |
| k                     | $N \cdot s^n / m^2$        | Konsistenzkoeffizient des Potenzgesetzes                              |
| m                     | $N \cdot s / m^0$          | Konstante der Regressionsfunktion $\Delta p / \Delta l = f(V)$        |
| n                     |                            | Fließexponent, Strukturziffer des Potenzgesetzes                      |
| $\Delta p / \Delta l$ | $N / m^2 \cdot m = Pa / m$ | spezifischer Druckverlust, bezogen auf 1 m Rohrlänge                  |
| R                     | m                          | Rohrradius  |
| r                     | m                          | Radius als laufende Koordinate  |
| $r_s$                 | m                          | Radius des Strömungskerns bei Wandgleitung                            |
| Re                    |                            | Reynolds-Zahl   |
| $Re'_n$               |                            | verallgemeinerte Reynolds-Zahl  |
| $Re_n$                |                            | modifizierte $Re_n$ -Zahl   |
| V                     | $m^3 / s$                  | Volumenstrom, Durchsatz   |
| v                     | m/s                        | Strömungsgeschwindigkeit  |
| $v_s$                 | m/s                        | Gleitgeschwindigkeit des Strömungskerns an der wandnahen Gleitschicht |
| $\beta_s$             | $m^4 / s \cdot N$          | Gleitkoeffizient  |
| $\eta$                | $N \cdot s / m^2$          | dynamische Viskosität Newtonscher Flüssigkeiten                       |
| $\eta_{sq}$           | $N \cdot s / m^2$          | Scheinviskosität  |
| $\lambda$             |                            | Rohrreibungszahl  |
| $\rho$                | $kg / m^3$                 | Dichte  |
| $\tau$                | Pa                         | Schubspannung   |
| $\tau_w$              | Pa                         | Wandschubspannung   |
| $\tau_s$              | Pa                         | Schubspannung an der Stelle $r = r_s$ bei Wandgleitung                |

In diesem Beitrag soll die Anwendung der Berechnungsgrundlagen auf konzentrierte Hackfruchtfuttermischungen dargestellt werden.

## 2. Rohrströmungsberechnung bei Wandhaftung

Die bei der Rohrförderung auftretende Flüssigkeitsreibung verursacht einen statischen Druckverlust, der von den Fließeigenschaften des Mediums, der Art und Form der Rohrleitung und der Strömungsgeschwindigkeit abhängig ist. Das Hauptanliegen der phänomenologischen Rheologie ist es daher, Fließfunktionen  $f(\tau)$  experimentell zu ermitteln und quantitativ zu beschreiben.

### 2.1. Rheologische Grundlagen der laminaren Strömung

Bei laminarer und stationärer Strömung eines homogenen Mediums im kreisrunden Rohr ergibt sich ein linearer Schubspannungsverlauf in Abhängigkeit vom Radius und eine maximale Wandschubspannung

$$\tau_w = \frac{\Delta p R}{\Delta l 2} \quad (1)$$

Wird das allgemeine Reibungsgesetz

$$-\frac{dv}{dr} = f(\tau) \quad (2)$$

integriert, erhält man bei Berücksichtigung der Wandhaftungsbedingung  $v(R) = 0$  den Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit im Rohr, und mit der Kontinuitätsgleichung ergibt sich durch nochmalige Integration die allgemeine Gleichung der stationären und laminaren Rohrströmung für  $\tau_0 = 0$

$$\left( -\frac{dv}{dr} \right)_R = \frac{4 V}{\pi R^3} = \frac{4}{\tau_w^3} \int_0^R \tau^2 f(\tau) d\tau \quad (3)$$

Diese Gleichung kann numerisch oder analytisch durch Einsetzen spezieller Fließgesetze  $f(\tau)$  gelöst werden, und man erhält die gesuchte Durchsatz-Druckverlust-Abhängigkeit  $\dot{V}(\Delta p)$  [2]. Mit dem Newtonschen Ansatz

$$f(\tau) = \frac{dv}{dr} = \frac{\tau}{\eta} \quad (4)$$

ergibt sich damit beispielsweise das bekannte Hagen-Poiseuille-Gesetz

$$\dot{V}(\Delta p) = \frac{\Delta p \pi R^4}{\Delta l 8 \eta} \quad (5)$$

Das Problem besteht nun bei nicht-Newtonschen Medien in der Auswahl einer geeigneten Fließfunktion  $f(\tau)$  und der reproduzierbaren experimentellen Bestimmung der Fließkenngrößen. Landwirtschaftliche fließfähige Medien (Gülle, Futtersuspensionen u. a.) haben zumeist pseudoplastisches oder linearplastisches (Bingham-plastisches) Fließverhalten (Bild 1). Für den realen Bereich der Schergeschwindigkeiten bei der Rohrförderung kann auch für konzentrierte Suspensionen vereinfachend  $\tau_0 = 0$  angenommen werden [1], so daß grundsätzlich das Reibungsgesetz von Prandtl und Eyring sowie das Potenzgesetz von Ostwald und de Waele für pseudoplastische Fluids anwendbar sind (Bild 1). Aufgrund der einfacheren Handhabung für ingenieurmäßige Berechnungen wird das Potenzgesetz in der Praxis zumeist angewendet.

### 2.2. Bestimmung der Fließkurven

Zur experimentellen Ermittlung der Fließkurven sind grundsätzlich Rotations- und Rohrviskosimeter geeignet, die eine ein-dimensionale Scherströmung erzeugen. Dabei müssen die maxi-

| Rheologisches Gesetz   | Geschwindigkeitsverlauf $v=f(r)$   | Volumendurchsatz $\dot{V}=f(\Delta p)$   | Fließkurvenverlauf | Modellsubstanzen  | $\tau_0$ |
|--|--|--|--------------------|---|----------|
| $\tau = \eta \frac{dv}{dr}$<br>Newtonsches Reibungsgesetz für Newtonsche Medien  | $v(r) = \frac{\Delta p}{4\eta \Delta l} (R^2 - r^2)$   | $\dot{V}(\Delta p) = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot \Delta l}$ Hagen - Poiseuille - Gesetz   |                    | Wasser, Glycerin, pflanzliche Öle                                     | 0        |
| $\tau = k \left(\frac{dv}{dr}\right)^n$<br>Potenzgesetz von Ostwald und de Waele für pseudoplastische Medien                             | $v(r) = \left(\frac{\Delta p}{\Delta l \cdot 2k}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} \left(R^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}}\right)$                        | $\dot{V}(\Delta p) = \pi \frac{n}{3n+1} \left(\frac{\Delta p}{\Delta l \cdot 2k}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{3n+1}{R}$<br>Beziehung nach Übrecht und Milschka   |                    | Silikon, Staufferfell, Gülle (Lam. Strömung), landw. Futtermischungen | 0        |
| $\tau = A_1 \operatorname{arsinh} \left(\frac{dv}{dr} / C_1\right)$<br>Reibungsgesetz von Prandtl und Eyring für pseudoplastische Medien | $v(r) = \frac{2C_1 A_1 \Delta l}{\Delta p} \left[ ch \left(\frac{\Delta p R}{2A_1 \Delta l}\right) - ch \left(\frac{\Delta p r}{2A_1 \Delta l}\right) \right]$ | $\dot{V}(\Delta p) = \frac{2\pi C_1 R^2}{\alpha_1} \left[ \frac{1}{2} ch \alpha_1 R - \frac{1}{2\alpha_1 R} sh \alpha_1 R + \frac{1}{\alpha_1^2 R^2} (ch \alpha_1 R - 1) \right]$<br>$\alpha_1 = \frac{\Delta p}{\Delta l \cdot 2A_1}$   |                    | Pech, Polyäthylene, Glasschmelze, Beton, landw. Futtermischungen      | 0        |
| $\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \left(\frac{dv}{dr}\right)$<br>Reibungsgesetz von Bingham für linearplastische Medien                         | $v(r) = \frac{1}{\eta_{pl}} \left[ \frac{R^2 - r^2}{4\Delta p} \Delta p - \tau_0 (R-r) \right]$  | $\dot{V}(\Delta p) = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 \eta_{pl} \Delta l} \left[ 1 - \frac{8}{3} \frac{\tau_0 \Delta l}{R \Delta p} + \frac{1}{3} \left(\frac{2\tau_0 \Delta l}{R \Delta p}\right)^4 \right]$<br>Reiner - Buckingham - Gleichung<br>$\left(\frac{\Delta p}{\Delta l}\right) = \frac{32 \nu \eta_{pl}}{d^2} + \frac{16}{3} \frac{\tau_0}{d}$ |                    | Anstrichfarben, Zahnpasta, landw. Futtermischungen                    | > 0      |

Bild 1. Reibungsgesetze und Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung des Widerstandsverhalten bei der Rohrströmung nicht-Newtonscher Medien

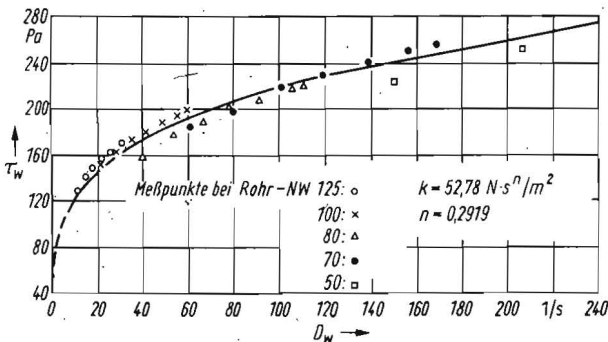


Bild 2. Fließkurve  $\tau_w = f(D_w)$  einer Zuckerrüben-Futtermischung;  
Futterzusammensetzung:  
— Zuckerrüben: Trockenmischfutter 1:1  
— Futtermischung: Wasser 1:1,35  
— Trockensubstanzgehalt 23,34 %

male Schergeschwindigkeit  $dv/dr$  und die entsprechende Schubspannung  $\tau_w$  eindeutig erfassbar sein. Bekannte Rotationsviskosimeter [3] [4] erfüllen diese Voraussetzung bei konzentrierten grobdispersen Suspensionen nur ungenügend, da Entmischungsvorgänge und Gleichschichtbildung während des Meßvorgangs beobachtet wurden [1] und die ermittelten Fließkennwerte nicht zur Rohrströmungsberechnung verwendbar sind. Zur Sicherung der Übertragbarkeit der Meßergebnisse wird für die vorliegenden Medien ein Rohrviskosimeter vorteilhafter verwendet [1] [4], wobei zur Bestimmung der gesuchten Fließfunktion  $f(\tau)$  der Volumenstrom  $\dot{V}$  und die statische Druckdifferenz  $\Delta p$  bei definierter Rohrlänge  $\Delta l$  benutzt wird. Dabei müssen die folgenden Voraussetzungen gegeben sein [1] [2]:

- Stationäre, isotherme Laminarströmung im Meßrohr
- Abhängigkeit der Axialgeschwindigkeit nur vom Radius
- keine Eintritts- und Austrittsverluste
- Wandhaftung  $v(R) = 0$
- konstante Temperatur
- keine Sedimentation während des Fließvorgangs
- Unabhängigkeit des Fließverhaltens des Mediums im untersuchten Meßbereich vom Druck

- Inkompressibilität des Mediums
- gleicher Bereich des Schergfalles im Viskosimeter und in der Originalrohrleitung.

Wenn diese Bedingungen erfüllt sind, ergeben die Fließkurven verschiedener Rohrdurchmesser einen geschlossenen Kurvenzug (Bild 2), d. h. die Fließkennwerte sind von den Rohrdurchmessern unabhängig. Zur Ermittlung der Fließfunktion  $f(\tau)$  geht man wiederum von der allgemeinen Gleichung der Rohrströmung (3) aus und erhält durch Differentiation nach  $\tau_w$  und Einsetzen des Newtonschen Schergfalles,  $D_N$  die sogenannte Rabinowitsch-Gleichung

$$D_w = \left(-\frac{dv}{dr}\right)_w = \frac{3}{4} D_N + \frac{1}{4} D_N \frac{d(\lg D_N)}{d(\lg \tau_w)} \quad (6)$$

Da bei den landwirtschaftlichen pseudoplastischen Medien über große Bereiche des Schergfalles gilt

$$\frac{1}{n'} = \frac{d(\lg D_N)}{d(\lg \tau_w)} = \text{konst.} \quad (7)$$

wird nach [2]

$$D_w = \left(\frac{3n' + 1}{4n'}\right) D_N \quad (8)$$

So ist es möglich, das für nicht-Newtonsche Medien stets berechenbare, aber nicht exakte Newtonsche Geschwindigkeitsgefälle  $D_N$  für die Ermittlung des tatsächlichen Geschwindigkeitsgefalles an der Rohrwand  $D_w$  zu benutzen, ohne daß die Fließfunktion  $f(\tau)$  bekannt sein muß.

Das Potenzgesetz von Ostwald und de Waele

$$\tau_w = k D_w^n \quad (9)$$

oder mit Gleichung (8)

$$\tau_w = k \left(\frac{3n' + 1}{4n'}\right)^n D_N^{n'} D_N = \eta_{a0} D_N \quad (9.1.)$$

hat logarithmiert die Form

$$\lg \tau_w = \lg k + n \lg D_w \quad (9.2.)$$

so daß sich mit Gleichung (7) die Identität  $n' = n$  ergibt. Mit  $\eta_{a0}$  wird eine scheinbare oder äquivalente Viskosität bezeichnet,

welche als Rechengröße nur für einen bestimmten Punkt der Fließkurve Gültigkeit hat.

Wird die Gleichung (9) in Gleichung (3) eingesetzt, so erhält man als Lösung [2]

$$\frac{\Delta p}{\Delta l} = \frac{2k}{R} \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^n \left( \frac{4\dot{V}}{\pi R^3} \right)^n \quad (10)$$

und logarithmiert

$$\lg \frac{\Delta p}{\Delta l} = \left[ \lg \frac{2k}{R} + n \lg \left( \frac{3n+1}{4n} \right) + n \lg \frac{4}{\pi R^3} \right] + n \lg \dot{V} \quad (10.1)$$

$$\lg \frac{\Delta p}{\Delta l} = \lg m + n \lg \dot{V} \quad (10.2)$$

Wegen  $m = \text{konst.}$  zeigt sich bei Vergleich mit Gleichung (9.2.), daß bereits aus der Darstellung der Meßgrößen  $\dot{V}$  ( $\Delta p$ ) des Rohrviskosimeters mit dem Anstieg der Geraden (10.1.) der Fließexponent  $n$  bekannt ist. Wird bei einer statistischen Auswertung Gleichung (10.2.) mit Hilfe linearer Regression bestimmt, läßt sich der Konsistenzkoeffizient  $k$  wie folgt errechnen:

$$k = \frac{m}{2} R^{3n+1} \left( \frac{\pi n}{3n+1} \right)^n \quad (11)$$

Damit können auf rationelle Weise bereits aus der experimentell bestimmten Abhängigkeit  $\Delta p/\Delta l = f(\dot{V})$  die Fließkennwerte  $k$  und  $n$  des Potenzgesetzes nach Gleichung (9) bestimmt werden.

### 2.3. Rohrströmungsberechnung

Mit der gezeigten Berechnungsmethodik kann bei nunmehr bekannten Fließkennwerten  $k$  und  $n$  mit Gleichung (10) punktweise der gesuchte Druckverlust in Abhängigkeit vom Durchsatz errechnet werden. Eine verallgemeinerungsfähige Darstellung wird erreicht, indem mit Hilfe der Dimensionsanalyse eine Beziehung zwischen den dimensionslosen Kennzahlen nach Reynolds und Euler abgeleitet wird [5], die für verschiedene geometrische Verhältnisse und für Fluids mit unterschiedlichen Fließeigenschaften Gültigkeit hat. Die Darstellung des Widerstandsverhalten pseudoplastischer Medien bei der Rohrströmung läßt sich in der Form  $\lambda = f(Re_n)$  auf der Grundlage der Kennzahlengleichung (12) ermöglichen [5]:

$$Eu = \varphi(n) \frac{\Delta l}{d Re_n} = 4 \left[ \frac{2(3n+1)}{n} \right]^n \frac{\Delta l}{d Re_n} \quad (12)$$

Mit der Rohrreibungszahl

$$\lambda = \frac{2 Eu d}{\Delta l} = \frac{2 \Delta p d}{\rho \Delta l v^2} \quad (13)$$

und der verallgemeinerten Reynoldszahl

$$Re_n = \frac{d^n v^{2-n} \rho}{k} \quad (14)$$

wird

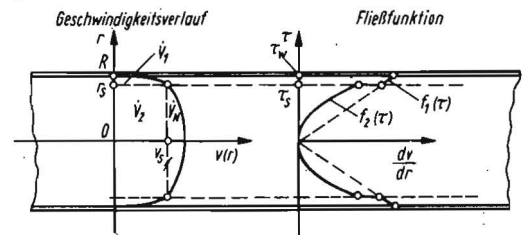
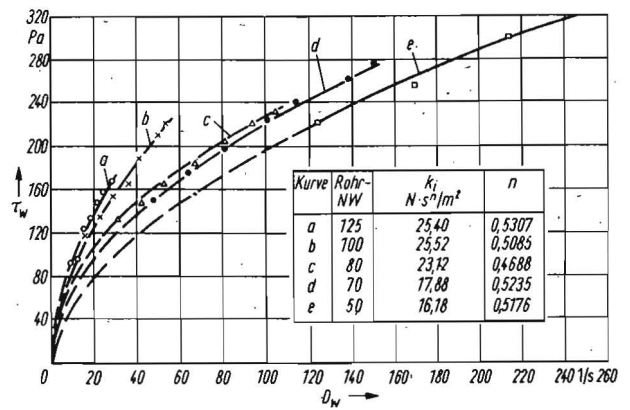
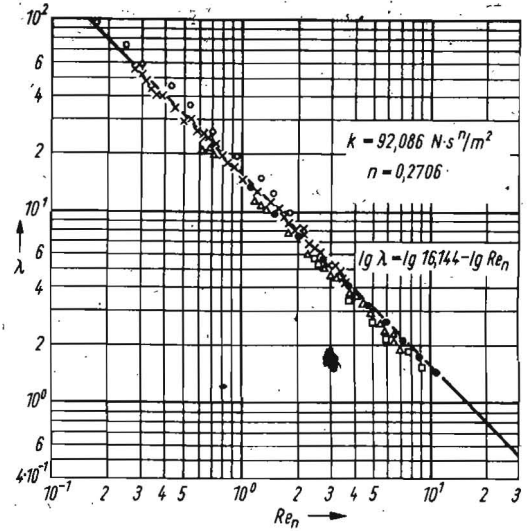
$$\lambda = \frac{2 \varphi(n)}{Re_n} = \frac{8 \left( \frac{6n+2}{n} \right)^n}{d^n v^{2-n} \rho} \quad (15)$$

Bei doppelt-logarithmischer Darstellung erhält man für verschiedene Fluids mit unterschiedlichem Fließverhalten Geraden mit dem Fließexponenten  $n$  als Parameter. Im Bild 3 ist die Gerade der angegebenen Futtermischung dargestellt. Wird analog zur Hagen-Poiseuilleschen Gleichung

$$\lambda = \frac{64}{Re_s} \quad (16)$$

geschrieben, so gelingt die Darstellung des Widerstandsverhaltens der Laminarströmung durch eine einzige Gerade, so daß eine Interpolation von  $n$  möglich wird. Dabei bestimmt man die modifizierte  $Re_n$ -Zahl

$$Re_s = \frac{8 Re_n}{\left( \frac{6n+2}{n} \right)^n} \quad (17)$$



indem die äquivalente Viskosität  $\eta_{\text{äq}}$  nach Gleichung (9.1.) in die für Newtonsche Medien bekannte Reynoldszahl

$$Re = \frac{v d \rho}{\eta}$$

anstelle der Newtonschen Viskosität  $\eta$  eingesetzt wird.

### 3. Rohrströmungsberechnung bei Gleitschichtbildung

Bei einigen nicht-Newtonschen Substanzen, wie z. B. Lösungen von Hochpolymeren, Seifen, Ton-, Kreide- und z. T. auch Futtersuspensionen, ist die Haftungsbedingung an der Rohrwand  $v(R) = 0$  nicht mehr erfüllt und es zeigen sich bei den mit dem Rohrviskosimeter bestimmten Fließkurven in Abhängigkeit vom Rohrradius charakteristische Unterschiede (Bild 4). Es wird angenommen, daß in Wandnähe Entmischungsvorgänge erfolgen und sich an der Rohrwand (begünstigt durch die Rohrrauigkeit) eine dünne Schmierschicht des Dispersionsmittels anlagert. An dieser wandnahen Schicht gleitet die Suspension, so daß zwei Fließfunktionen Gültigkeit haben (Bild 5).

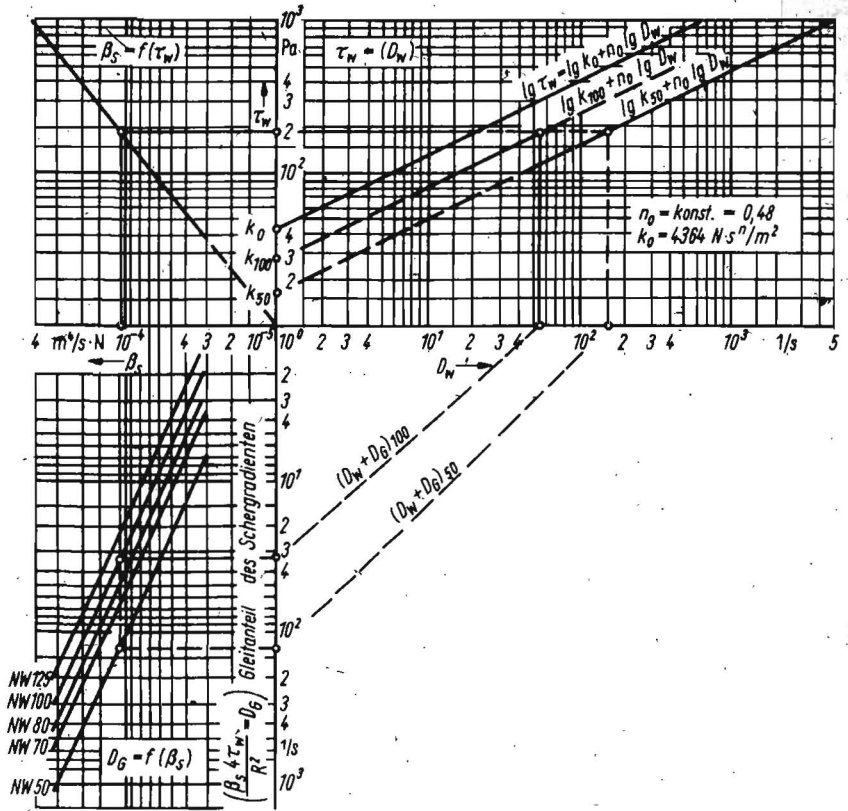
Zur Ermittlung dieser Strömungsanomalien sind radienabhängige Fließkurven notwendig. Auf der Grundlage des von Pfannschmidt

**Bild 3.** Widerstandsverhalten  $\lambda = f(Re_n)$  von Stahlrohren bei der Strömung einer Zuckerrüben-Futtermischung;  
 Futtermischungszusammensetzung:  
 - Zuckerrüben: Trockenmischfutter 1:1  
 - Futtermischung: Wasser 1:1,2  
 - Trockensubstanzgehalt 25%  
 Bedeutung der Meßpunkte wie im Bild 2

**Bild 4.** Fließkurven  $\tau_w = f(D_w)$  einer Zuckerrüben-Futtermischung bei Gleitschichtbildung;  
 Zusammensetzung:  
 - Zuckerrüben: Trockenmischfutter 3:1  
 - Futtermischung: Wasser 1:1,07  
 - Trockensubstanzgehalt 18,79%

**Bild 5.** Schematische Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufs und der Fließfunktion im Rohr bei Gleitschichtbildung

**Bild 6.** Grafische Ermittlung von abmessungsabhängigen Fließkurven unter Berücksichtigung des Wandeffektes am Beispiel einer Zuckerrüben-Futtermischung;  
 Trockensubstanzgehalt 18,8%



[6] entwickelten Zweischichtenmodells kann man die von den Gleiteigenschaften unabhängige Fließkurve ermitteln. Es wird dabei für das Dispersionsmittel eine Newtonsche Viskosität  $\eta$  und für das Fördermedium nicht-Newtonisches Fließverhalten angenommen. Der Gesamtdurchsatz durch das Rohr setzt sich zusammen aus

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \quad (18)$$

mit  $\dot{V}_1$  als Durchsatz der flüssigen Phase im Ringraum  $r_s \leq r \leq R$ , der nach Gleichung (5) berechnet werden kann und  $\dot{V}_2$  als Durchsatz der Kernströmung im Bereich  $0 \leq r \leq r_s$ , der sich mit der Randbedingung  $v(r_s) = v_s$  wie folgt errechnet:

$$\dot{V}_2 = \pi v_s r_s^2 + \frac{\pi R^3}{\tau_w} \int_0^{r_s} \tau^2 f_2(\tau) d\tau \quad (19)$$

$\dot{V}_2 = \dot{V}_2 + \dot{V}_N$   
 $\dot{V}_2$  stellt einen Pfropfen mit der konstanten Gleitgeschwindigkeit  $\dot{v}_s$  und  $\dot{V}_N$  den durch die Scherdeformation verursachten Durchsatz dar. Für den Gesamtdurchsatz ergibt sich daher

$$\dot{V} = \pi v_s \left( R^2 - \frac{\Delta l 2 \eta v_s}{\Delta p} \right) + \frac{\pi R^3}{\tau_w} \int_0^{r_s} \tau^2 f_2(\tau) d\tau \quad (20)$$

Wird ein Wandgleitkoeffizient

$$\beta_s = \frac{v_s}{\tau_w} \left( R - \frac{\Delta l 2 \eta v_s}{\Delta p R} \right) \quad (21)$$

definiert, erhält man aus Gleichung (20)

$$\frac{\dot{V}}{\pi R^3 \tau_w} = \frac{\beta_s}{R^2} + \frac{1}{\tau_w} \int_0^{r_s} \tau^2 f_2(\tau) d\tau \quad (22)$$

Bei den zumeist geringen Gleitschichtdicken kann  $r_s = R$  und  $\tau_s = \tau_w$  angenommen werden und bei  $\tau_w = \text{konst.}$  wird  $\beta_s(\tau_w)$  als Anstieg der Geraden aus Gleichung (22) grafisch ermittelt, wenn

$$\frac{\dot{V}}{\pi R^3 \tau_w} = f\left(\frac{1}{R^2}\right) \quad (23)$$

dargestellt wird. Mit Hilfe des Gleitkoeffizienten  $\beta_s$  kann der gesuchte Volumenstrom der Scherströmung  $\dot{V}_N$  aus Gleichung (22) berechnet werden:

$$\dot{V}_N = \dot{V} - \pi \beta_s \tau_w R \quad (24)$$

Mit  $\dot{V}_N$  sind entsprechend Gleichung (9) die Schergradienten zu korrigieren, so daß sich mit den Wertepaaren  $\tau_w = f(D_w)$  aus Messungen mit Rohren verschiedener Durchmesser eine gemeinsame, abmessungsunabhängige Fließkurve ergibt. Bei Anwendung des Potenzgesetzes können die Fließkennwerte  $k_0$  und  $n_0$  ermittelt werden, die die reine Scherdeformation des Mediums beschreiben.

Zur Rohrströmungsberechnung bei auftretenden Wandgleitwirkungen sind die beiden Funktionen

$$\beta_s = a \tau_w^b \quad (25)$$

$$\tau_w = k_0 \left( \frac{dv}{dr} \right)_w^{n_0}$$

zu ermitteln, so daß damit der Druckverlust in Rohren mit beliebigem Durchmesser analytisch oder grafisch bestimmt werden kann, indem abmessungsabhängige Fließkennwerte  $k_i$  und  $n_i$  errechnet werden. Aus experimentellen Untersuchungen mit Zuckerrüben-Futtermischungen [1] ergab sich ein konstanter Wert der Fließexponenten  $n_0 = n_i$ , so daß die Aufgabe nun in der Berechnung von  $k_i = f(k_0, d, \tau_w, \beta_s)$  besteht. Die gesuchten Fließfunktionen (Bild 6) sind um einen berechenbaren Gleitanteil  $\lg D_G$  parallelverschobene Geraden:

$$D_G = \frac{4 \beta_s \tau_w}{R^2} \quad (26)$$

Bei  $\lg D_w = 0$  ergibt  $\lg \tau_w = \lg k$ , folglich wird

$$\lg k_i - \lg k_0 = n_0 \lg D_G \quad (27)$$

und nach Einsetzen von  $D_G$  und  $\beta_s$  erhält man

$$k_i = k_0^{1-n_0(1-b)} \left( \frac{d_i^2}{16 a} \right)^{n_0} \quad (28)$$



Mit dieser Berechnung ist es möglich, auftretende Wandgleiteneffekte bei konzentrierten landwirtschaftlichen Futtermischungen zur Rohrleitungsberechnung mit genügender Sicherheit zu berücksichtigen. Bild 6 zeigt die grafische Korrektur, so daß mit Gleichung (10) die realen Druckverluste ermittelt werden können. Wie aus Gleichung (26) zu erkennen ist, nimmt die Wandgleitung mit wachsendem Rohrradius ab, so daß bei der Förderung von Futtermischungen in Rohren mit  $d \geq 80$  mm kaum noch ein Einfluß nachzuweisen ist [1].

#### 4. Zusammenfassung

Es sind keine ausreichenden Grundlagen zur Berechnung des Widerstandsverhaltens schwer fließfähiger konzentrierter Suspensionen mit grobdisperssem Feststoffanteil (z. B. Hackfrucht-Futtermischungen in der Schweineproduktion) beim Fördern durch Rohrleitungen bekannt. Zur Beschreibung des pseudoelastischen Fließverhaltens kann das Potenzgesetz von Ostwald und de Waele zweckmäßig angewendet werden. Entsprechend der Vielzahl der das Fließverhalten beeinflussenden Faktoren ist zur reproduzierbaren Ermittlung von Fließkurven ein Rohrviskosimeter am besten geeignet, das eine direkte Übertragung auf die praktische Rohrförderung ermöglicht. Die abmessungsunabhängigen Fließkennwerte können direkt aus den Meßwerten  $\dot{V}(\Delta p)$  ermittelt werden. Bei nachgewiesener Wandhaftung  $v(R) = 0$  kann das Widerstandsverhalten beim Strömen durch gerade Rohre in dimensionsloser Form  $\lambda = f(Re_n)$  abmessungsunabhängig dargestellt werden.

Bei grobdispersen Suspensionen (Zuckerrüben- und Kartoffel-Futtermischungen) treten oftmals durchsatz erhöhende Wand-

gleiteneffekte auf, die zur fehlerhaften Bemessung von Rohrleitungen mit kleinerem Durchmesser ( $d < 80$  mm) führen können. Ausgehend von einem bekannten Korrekturverfahren [6] wird eine Berechnungsmethode abgeleitet, mit der auf Grundlage der bekannten Fließfunktion  $\tau_w = f(dv/dr)_w$  und einer das Gleitverhalten kennzeichnenden Funktion  $\beta_s = f(\tau_w)$  Rohrleitungen mit beliebigem Durchmesser berechnet werden können. Die außerdem zur Bemessung notwendigen Widerstandszahlen von Armaturen und Formstücken sind aufgrund der komplizierten Strömungsverhältnisse derzeit mit Hilfe der Fließkennwerte nicht direkt berechenbar und müssen experimentell bestimmt werden.

#### Literatur

- [1] Türk, M.: Beitrag zum Berechnen horizontaler Rohrleitungssysteme für konzentrierte fließfähige Hackfruchtfuttermischungen unter besonderer Berücksichtigung des Zuckerrübenansatzes. Universität Rostock, Sektion Landtechnik, Dissertation 1975 (unveröffentlicht).
- [2] Reher, E.-O.; Pfannschmidt, P.: Mechanische Verfahrenstechnik Lehrbrief für das HS-Fernstudium Nr. F 63/1.
- [3] Tschierschke, M.: Rotationsviskosimeter für grobdisperse Suspensionen. Archiv für Landtechnik, Berlin 7 (1968) H. 1, S. 91—100.
- [4] Lichačev, F. S.: Pneumatischer Futtertransport in Schweineproduktionsanlagen. Moskva: Izd. Mašinostroenie 1967.
- [5] Ulbrecht, H.; Mitschka, P.: Nicht-Newton'sche Flüssigkeiten. Strömungsvorgänge und Wärmeübertragung. Beiträge zur Verfahrenstechnik. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1967.
- [6] Pfannschmidt, P.; Reher, E.-O.: Zur Ermittlung der Fließeigenschaften nicht sedimentierender nicht-Newton'scher Suspensionen mit Wandeffekten in Kapillaren. Plaste und Kautschuk 19 (1972) H. 7, S. 502—507.

A 1303

## Zur planmäßigen Einordnung der vorbeugenden Instandhaltung in die Pflanzenproduktion

Dipl.-Ing. K. Kühnast/Dipl.-Agr.-Ing. G. Stegemann, KDT, Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg

### 1. Problemstellung

Die vorbeugende Instandhaltung hat für die Gewährleistung geforderter Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitswerte eine große Bedeutung. Durch eine ordnungsgemäße Durchführung dieser Arbeiten wird der Instandsetzungsanfall verringert [1] [2]. Nach [2] betragen die Grenznutzungsdauerunterschiede zwischen Traktorenhauptbaugruppen mit gutem bzw. schlechtem Pflegeniveau bis zu 25%.

Die vorbeugende Instandhaltung umfaßt nach [3]

- Pflege und Wartung
- Technische Diagnostik (Überprüfungen)
- Abstellung.

Es handelt sich also um Maßnahmen, die weitgehend kampagnegebunden durchgeführt werden und deshalb bei der Ausarbeitung der Kampagnepläne bzw. Verfahrensprojekte [4] der Pflanzenproduktion berücksichtigt und in diese Planungsdokumente hinsichtlich Kapazität und Organisation eingeordnet werden müssen. Im folgenden werden einige Schwerpunkte der Planung und Organisation der vorbeugenden Instandhaltung behandelt und ein einfaches Verfahren der Bedarfsermittlung vorgestellt.

### 2. Zur Jahresplanung der vorbeugenden Instandhaltung

Der Jahresplan der vorbeugenden Instandhaltung ist ein wesentliches Leitungsinstrument und muß als Bestandteil des Betriebsplanes erarbeitet werden. Damit wird eine Art Planrechtssituation geschaffen, und dieser Plan wird den übrigen Planteilen des Betriebs de facto gleichgestellt. Er dient im wesentlichen der

- Bedarfsabsicherung und Planung der Kapazitätsauslastung der Pflegeeinrichtungen (Arbeitskräfte, Schichtregime u. a.)
- Sicherung der materiell-technischen Versorgung (Schmierstoffe, Konservierungsmittel, spezielle Ersatz- und Verschleißteile u. a.)

— Kostenermittlung und Vorgabe von Wettbewerbsnormativen. Er ist die Grundlage der Organisation dieser Maßnahmen und deren Einordnung in die Kampagnepläne. Weil für einen Jahresplanzeitraum die Festlegung konkreter Terminpläne für die vorbeugende Instandhaltung nicht möglich ist, beinhaltet die Bedarfsermittlung lediglich die Bestimmung der wesentlichen Parameter. Hierzu sind in [5] bereits grundsätzliche Ausführungen enthalten. In [6] wird ein entsprechendes Rechenprogramm zur Planausarbeitung für den Kleinrechner SER 2d vorgestellt. Nachstehend soll ein einfaches Berechnungsverfahren erläutert werden. Bedingt durch den diskontinuierlichen Bedarfsanfall ist eine Einteilung des Jahres in Bezugszeiträume erforderlich, was zweckmäßig auf Monatsbasis geschieht (Bild 1).

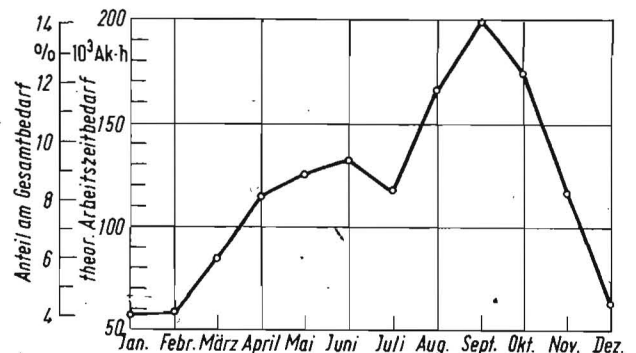


Bild 1. Erforderliche Kapazität für die Pflege und Wartung der mobilen landtechnischen Arbeitsmittel im Durchschnitt des Bezirkes Dresden [7]