

Matthias BOHNET

Institut für Verfahrens- und Kerntechnik
Technische Universität Braunschweig

AUSLEGUNG PNEUMATISCHER FÖRDERANLAGEN

1. Einführung

Die pneumatische Förderung von Feststoffen wird vielfältig eingesetzt. Sie überbrückt jedoch meist nur verhältnismässig kurze Entfernungen bis zu einigen 100 m. Dieses Fördersystem findet man in der Chemischen Industrie, der Lebensmittelindustrie und der Zementindustrie, um nur einige wenige Industrien zu nennen. Die pneumatische Förderung zeichnet sich durch leichte Verlegbarkeit der Förderrohre und durch Staubfreiheit aus. Zusätzlich lassen sich während des Förderns physikalische Prozesse, wie z.B. Trocknen, durchführen. Der Feststoff lässt sich falls erforderlich, auch mit einem Inertgas fördern. Die grössten Nachteile dieses Fördersystems sind der hohe spezifische Energieverbrauch, der Verschleiss der Förderrohre und der Abrieb oder die Zerkleinerung des geförderten Feststoffs. Diese Nachteile lassen sich am wirkungsvollsten bekämpfen, wenn die Gasgeschwindigkeit und damit auch die Feststoffgeschwindigkeit verringert wird. Diese Massnahme bewirkt jedoch meistens schwierigere Strömungsbedingungen und kann zu Verstopfungen der Rohrleitungen führen.

Betrachtet man die verschiedenen Förderzustände, die sich im Förderrohr einstellen können, nämlich

- Flugförderung
- Strähnenförderung
- Pfropfenförderung
- Schubförderung

so wird deutlich, dass die Auslegung pneumatischer Förderleitungen ausserordentlich stark von den Feststoffeigenschaften, der Partikelgrössenverteilung des Feststoffs und den Massenströmen von Gas und Feststoff abhängt. Die Vielzahl der Einflussparameter erlaubt derzeit noch keine absolut sichere Vorausberechnung der optimalen Gasgeschwindigkeit und des Druckverlustes für ein bestimmtes System. Trotzdem soll nicht übersehen werden, dass sich die Kenntnisse über die Vorgänge bei Gas/Feststoffströmungen in Rohren in den letzten Jahren bemerkenswert verbessert haben. An

den Universitäten hat man sich dabei vor allem mit der Bearbeitung von Strömungsproblemen befasst und bevorzugt das Gebiet der Flug- und Strähnenförderung behandelt. In der Industrie wurden erhebliche Anstrengungen unternommen, um zuverlässige Verfahren zur Pflöpfenförderung und zur Schubförderung zu entwickeln. Tab. 1 enthält zur Erläuterung einige charakteristische Daten der wichtigsten Förderzustände, Abb. 1 zeigt in der üblichen Form des Phasendiagramms die Lage der einzelnen Förderzustände.

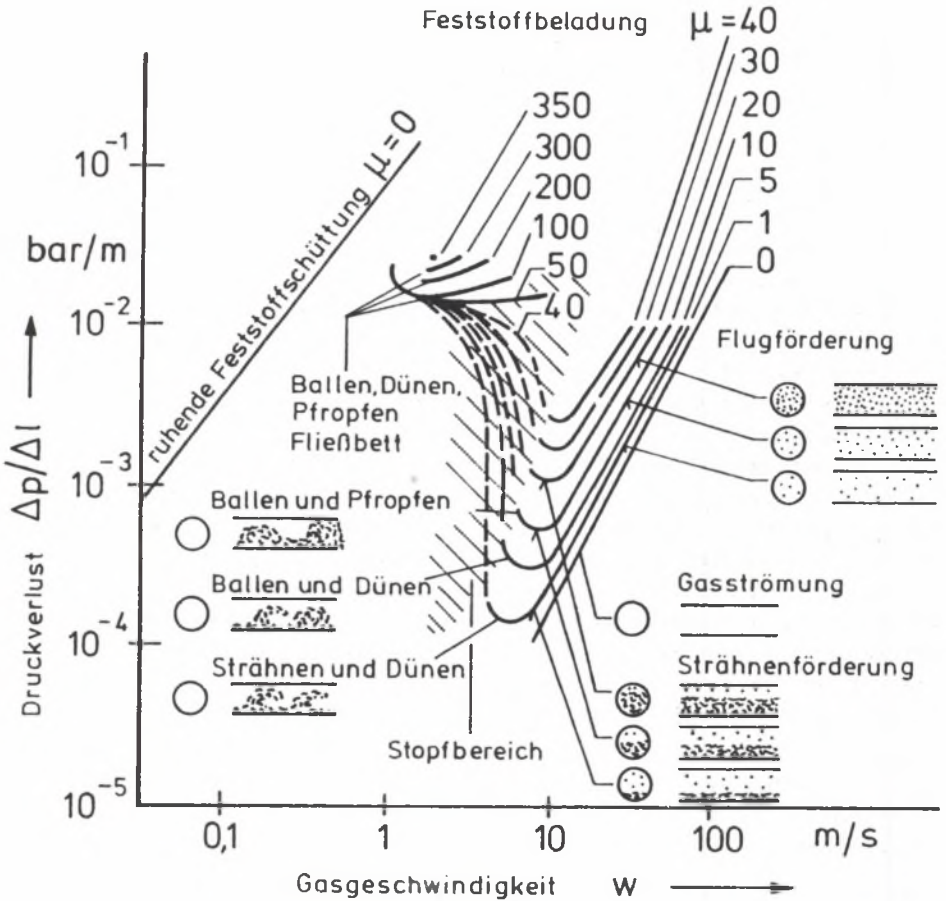


Abb. 1. Zustandsdiagramm der pneumatischen Förderung für rieselfähige Schlüttgüter nach W. KRAMBROCK [3] (Partikelgröße um 200 μm)

Tabelle 1

Daten wichtiger Strömungszustände (Rohrdurchmesser 100 mm)
nach E. MUSCHELKNAUTZ u. W. KRAMBROCK [1] bzw. G.W. SEGLER u. W. HUTT [2]

	Gasgeschwindigkeit w [m/s]	Geschwindigkeitsverhältnis w_p/w	Partikelgrösse	Feststoffbeladung kg/kg
Flugförderung	15 - 35	0,3 - 0,7	grob	30
Strähnenförderung	5 - 20	0,1 - 0,5	fein	100
Pfropfenförderung	2 - 6	0,6 - 0,9	grob	50-100
Pfropfenförderung mit Bypass	3 - 10	0,2 - 0,8	fein	100-500
Pfropfenförderung mit gezielter Zufuhr von Sekundärgas	5 - 15	0,2 - 0,8	fein	100-500
Schubförderung	0,4 - 4	0,6 - 0,9	fein	400-800

2. Strömungsbedingungen

2.1. Gerade Rohrleitungen

Beobachtet man die Vorgänge in waagerechten und senkrechten pneumatischen Förderleitungen, so stellt man fest, dass abhängig von den Massenströmen des Feststoffs und des Gases unterschiedliche Strömungszustände auftreten. Abb. 2 zeigt für waagerechte Rohrleitungen unter a) den Zustand bei Flugförderung, der sich bei hohen Gasgeschwindigkeiten und geringer Feststoffbeladung einstellt. Die Feststoffbeladung ist dabei:

$$\mu = \dot{M}_p / \dot{M} \quad (1)$$

Für die Geschwindigkeit der Feststoffpartikel findet man Werte $w_p \approx (0,7 - 1,0)w$.

Verringert man den Gasmassenstrom, so führt dies bei konstant gehaltenem Feststoffmassenstrom zur Strähnenförderung b). Der Feststoff, der die maximale Feststoffbeladung μ_{1max} überschreitet, wird an der Rohrunterseite in Form einer Strähne mit einer Geschwindigkeit $w_{p2} \approx (0,1-0,3)w$ gefördert. Die Strähnenförderung über einer ruhenden Feststoffablagerung c) tritt bei weiterer Verringerung des Gasmassenstroms auf. Durch die Querschnittsverengung steigt die tatsächliche Gasgeschwindigkeit solange an, bis der Feststoff über der Ablagerung wieder vollständig gefördert wird. Die Strömungszustände der Pfropfenförderung sind meistens instabil. Durch Einsatz besonderer technischer Massnahmen konnten jedoch Systeme entwickelt werden, die sehr zuverlässig arbeiten (d, e, f). Die reine Schubför-

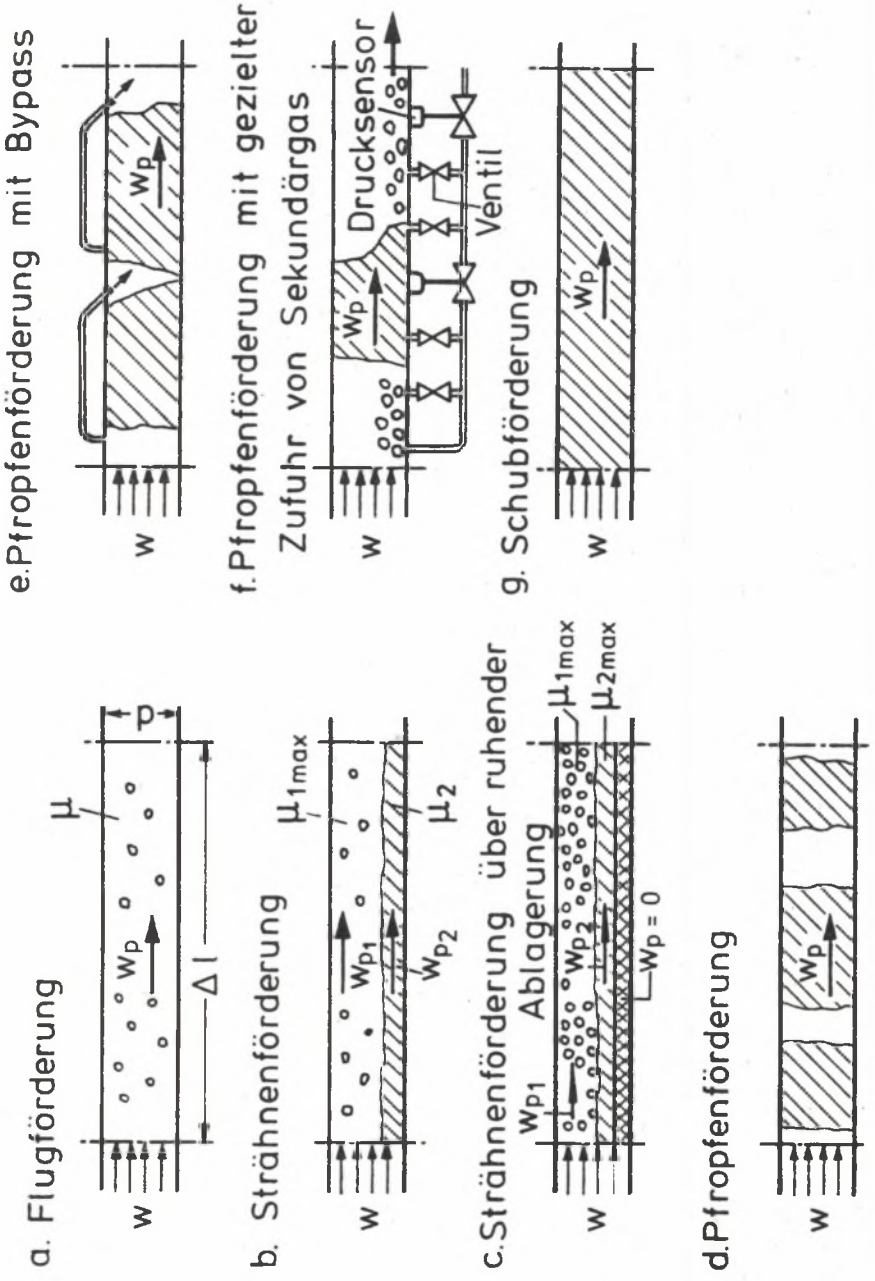


Abb. 2. Förderzustände bei unterschiedlichen Gas- und Feststoffmassenströmen

derung g), bei der das gesamte Rohr mit Feststoff gefüllt ist, lässt sich nur in Sonderfällen einsetzen. In senkrechten Rohrleitungen treten im wesentlichen die gleichen Förderzustände wie in waagerechten Rohrleitungen auf.

2.2. Krümmer

Bedingt durch die hohe Massenträgheit der Feststoffpartikel findet in den Krümmern entsprechend Abb. 3 eine Entmischung von Feststoff und Gas statt mit der Folge, dass der Feststoff auf die Aussenseite des Krümmers prallt und an der Aussenwand durch den Krümmer gleitet. Die Reibung zwischen den Partikeln und der Krümmerwand führt zu einer erheblichen Verzögerung des Feststoffs. Dieser muss nach Verlassen des Krümmers wieder auf seine ursprüngliche Geschwindigkeit beschleunigt werden. Der Druck-

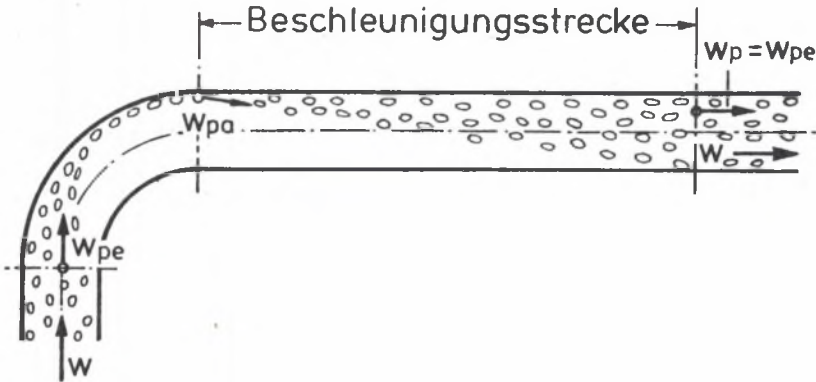


Abb. 3. Abbremsung und Beschleunigung des Feststoffs in einem Krümmer bei Umlenkung in einer waagerechten Ebene

verlust selbst entsteht nicht im Krümmer, sondern dahinter. Es ist ein reiner Beschleunigungsverlust. Im Gegensatz zur Gasströmung hat die Lage des Krümmers und die Strömungsrichtung wesentlichen Einfluss auf die Abbremsung der Partikel und damit auf den Druckverlust. Bei der Auslegung ist zu beachten, dass die Feststoffpartikel nicht vollständig abgebremst werden, weil dies zu einer Verstopfung des Förderstems unmittelbar hinter dem Krümmer führt. Weiter ist bei der Bemessung zu bedenken, dass Krümmer besonders kritisch gegen Verschleiss des Rohrwandmaterials durch Prall und Reibung sind.

2.3. Rohrverzweigungen

Viele technische Anwendungen erfordern eine gleichmäßige Verteilung von Gas und Feststoff auf verschiedene Strömungskanäle. Besonders ausgefeilte Verteilungssysteme werden beispielsweise für die Beschickung der Brenner von Kohlenstaubfeuerungen eingesetzt. Als sehr einfache Verzweigungen haben sich Hosenrohre und Y- sowie T-Verzweigungen, wie sie Abb. 4 zeigt, bewährt [4, 5]. Die T-Verzweigung ohne Anordnung eines Trennbleches hat ein selbstregelndes Verhalten. In dem Augenblick, in dem zu viel Feststoff in die eine Verzweigungsleitung strömt, steigt dort der Druckverlust an. Im nächsten Augenblick strömt deshalb Feststoff bevorzugt in die andere Verzweigungsleitung. Dieser Mechanismus erzwingt eine weitgehend gleichmäßige Verteilung des Feststoffs auf die beiden Verzweigungsleitungen.

3. Bewegungsgleichung für Gas-Feststoffströmungen

3.1. Gerade Rohrleitungen

Bezieht man den Strömungswiderstand der Feststoffpartikel auf ihre Masse und führt als Mass für den Strömungswiderstand der Feststoffpartikel ihres Sinkgeschwindigkeit w_s ein, so erhält man nach einem Vorschlag von W. BARTH [6]

$$F_w = M_p g \left(\frac{w-w_p}{w_s} \right)^{2-\alpha} \quad (2)$$

Mit ausreichender Genauigkeit kann dabei im Gültigkeitsbereich des Stokes'schen Widerstandsgesetzes für $Re_p < 4\alpha = 1$, bei Gültigkeit des Newton'schen Widerstandsgesetzes für $652 < Re_p < 2 \cdot 10^5 \alpha = 0$ und im Übergangsgebiet $4 < Re_p < 652 \alpha = 0,5$ gesetzt werden. Für die Reynoldszahl gilt dabei

$$Re_p = \frac{(w-w_p)d_p \rho}{\eta} \quad (3)$$

Setzt man die Reibungsschubspannung zwischen den Feststoffpartikeln und der Rohrwand proportional den Massenträgheitskräften der Partikel, so erhält man für den Reibungswiderstand:

$$F_R = M_p \cdot \frac{w^2 \lambda^*}{2 \cdot d} \quad (4)$$

mit λ_p^* als dem Wandreibungskoeffizienten, der wesentlich von der Beschaffenheit der Rohrwand und vom Feststoff abhängt.

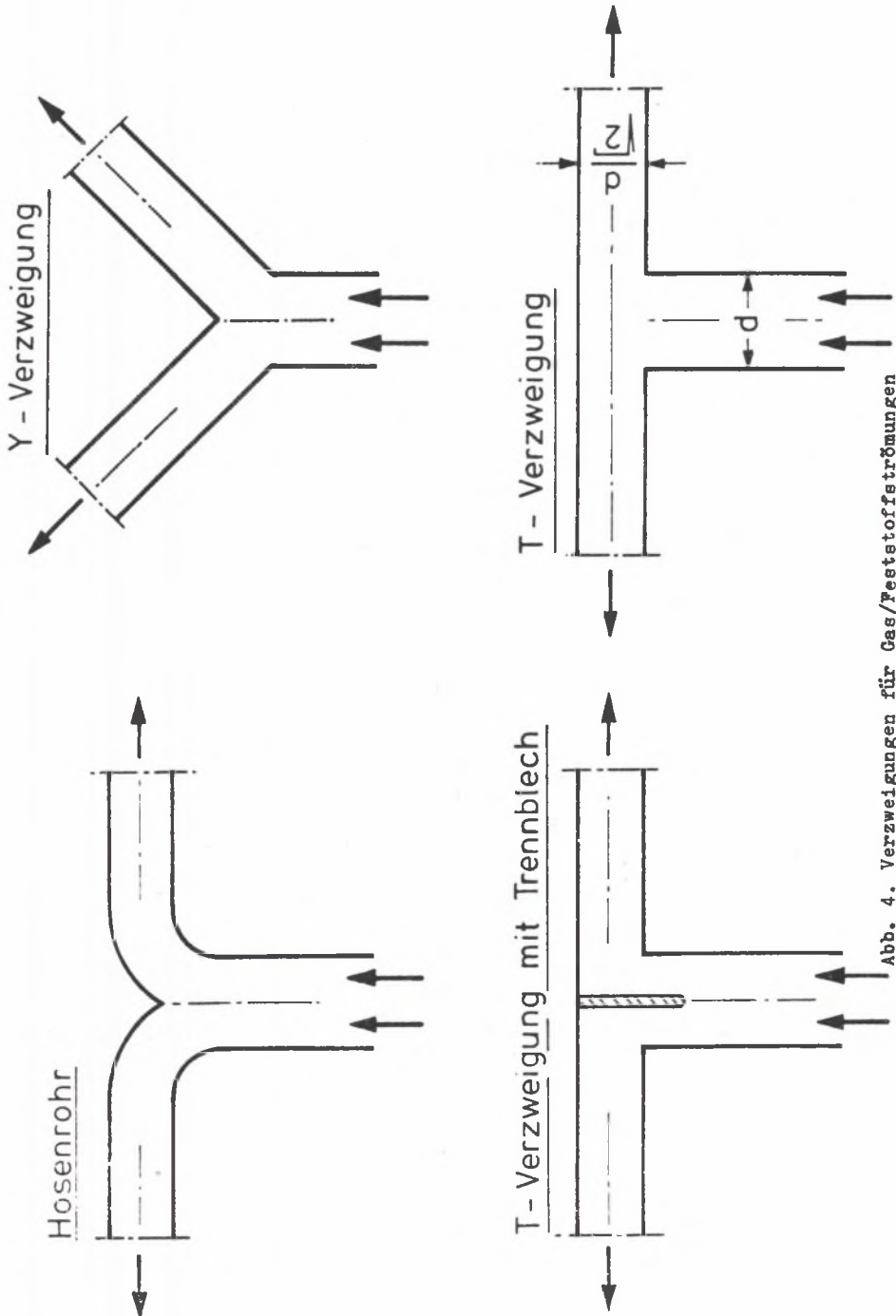


Abb. 4. Verzweigungen für Gas/Feststoffströmungen

Der durch die Schwerkraft verursachte Widerstand wir gemäss

$$F_S = M_p \cdot g \cdot \beta \quad (5)$$

proportional der Feststoffmasse gesetzt. Der Schwerkraftkoeffizient β hängt dabei hauptsächlich von der Bewegungsart (gleitend, springend) der Feststoffpartikel ab.

Für den Beschleunigungswiderstand gilt:

$$F_B = M_p \cdot \frac{dw_p}{dt} \quad (6)$$

Mit

$$F_W - F_R - F_S - F_B = 0 \quad (7)$$

folgt für die Bewegungsgleichung nach Einführen von $w_p = dl/dt$:

$$\left(\frac{w-w_p}{w_s}\right)^{2-\beta} - \frac{w_p^2}{2g \cdot d} - \beta - \frac{w_p \cdot dw_p}{g \cdot dl} = 0 \quad (8)$$

Nach Einführen folgender Kennzahlen:

$$Fr = \frac{w^2}{gd} \quad Fr^* = \frac{w^{2-\beta} \cdot w_p}{g \cdot d}$$

$$L^* = \frac{l \cdot g}{w_s^{2-\beta} \cdot w_p} \quad W_p^* = \frac{w_p}{w}$$

erhält man aus Gl. (8):

$$dL^* = \frac{W_p^* \cdot dW_p^*}{(1-W_p^*)^{2-\beta} - Fr^* \cdot \frac{W_p^*}{2} W_p^{*2} - \frac{Fr^*}{Fr} \cdot \beta} \quad (9)$$

Setzt man weiter als Wandreibungsparameter

$$R^* = Fr^* \cdot \frac{W_p^*}{2}$$

und als Schwerkraftparameter

$$S^* = \frac{Fr^*}{Fr} \cdot \beta$$

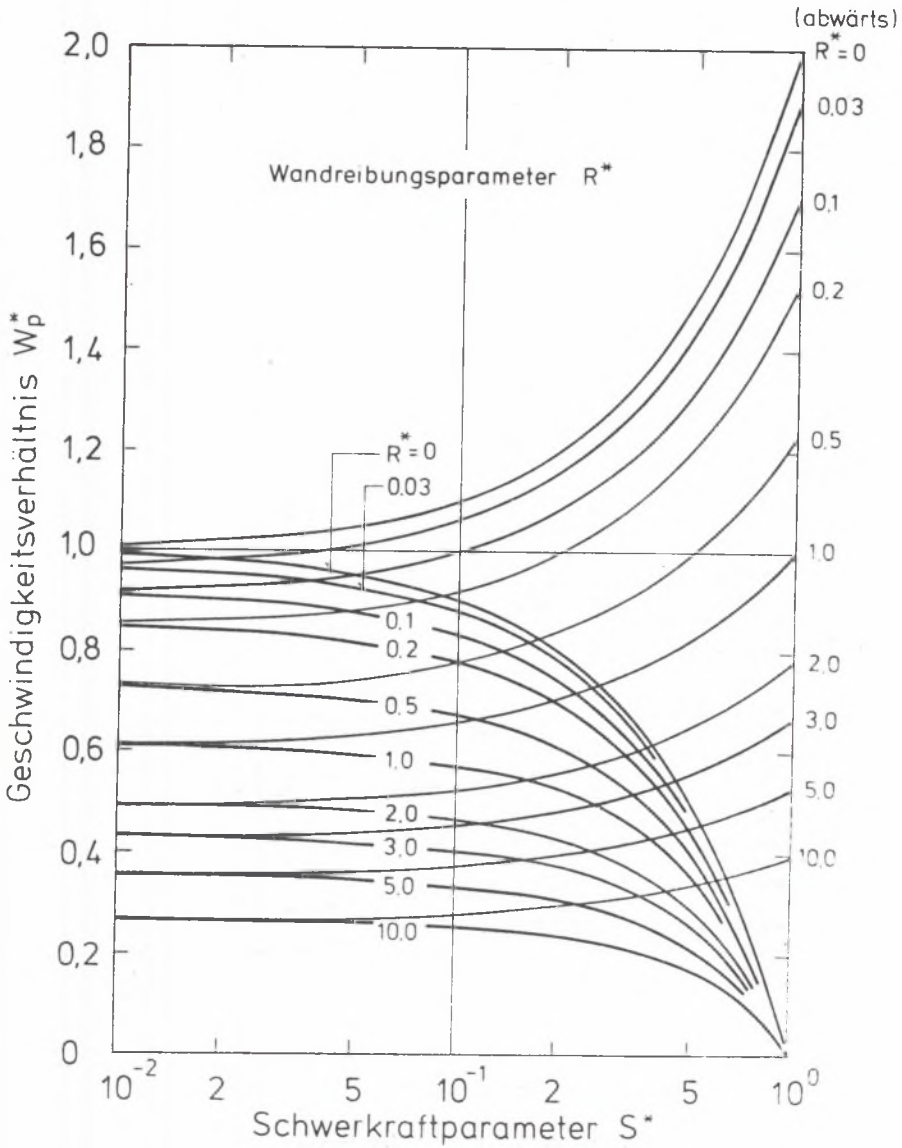


Abb. 5. Diagramm zur Bestimmung der Feststoffgeschwindigkeit nach Abschluss der Beschleunigung in Abhängigkeit von Wandreibungs- und Schwerkraftparameter für $\varphi = 1$

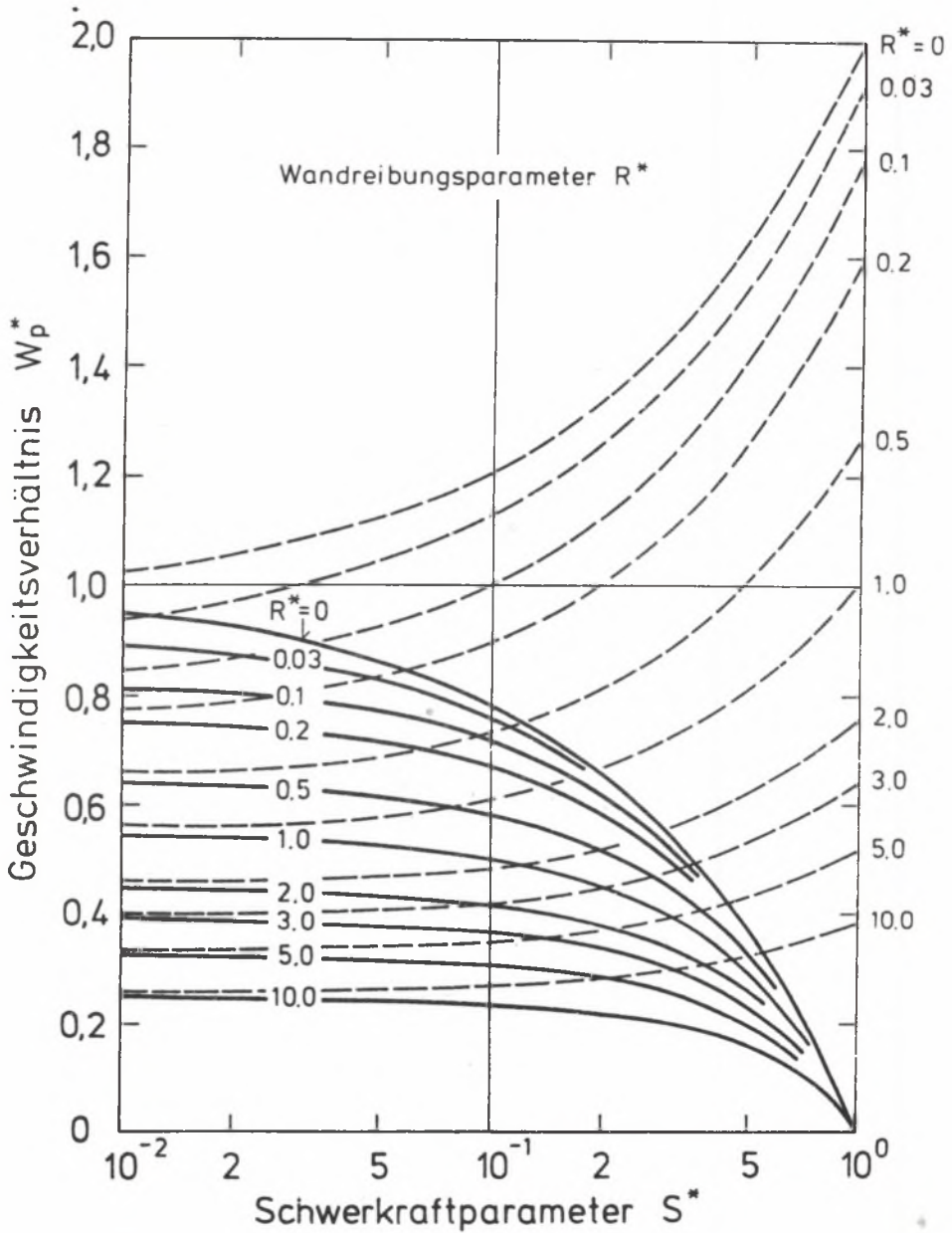


Abb. 6. Diagramm zur Bestimmung der Feststoffgeschwindigkeit nach Abschluss der Beschleunigung in Abhängigkeit von Wandreibungs- und Schwerkraftparameter für $\mu = 0,5$

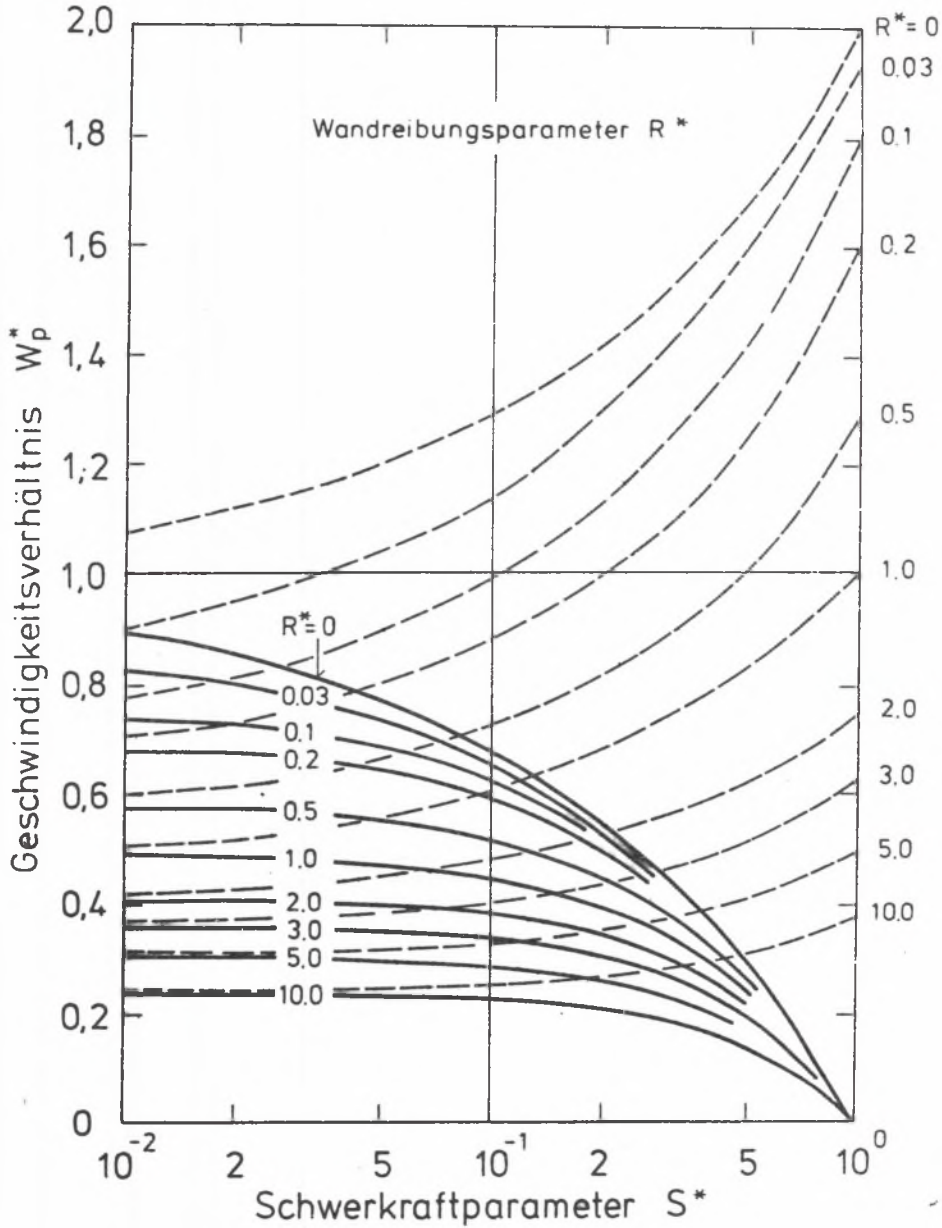


Abb. 7. Diagramm zur Bestimmung der Feststoffgeschwindigkeit nach Abschluss der Beschleunigung in Abhängigkeit von Wandreibungs- und Schwerkraftparameter für $\alpha = 0$

so lautet die allgemeine Bewegungsgleichung für Gas/Feststoffströmungen:

$$\frac{dW_p^*}{dL^*} = \frac{1}{W_p^*} \left[1(1-W_p^*)^{2-\alpha} - R^*W_p^{*2} - S^* \right] \quad (10)$$

Wird der Feststoff abwärts gefördert, so ist das Vorzeichen des Schwerkraftparameters zu ändern. Bewegt sich bei Abwärtsströmung der Feststoff schneller als das Gas, ($W_p^* > 1$) so ist für den Widerstandsterm $-|1-W_p^*|^{2-\alpha}$ zu setzen.

Gl. (10) lässt sich für den Fall konstanter Geschwindigkeit des Strömungsmittels leicht integrieren, in anderen Fällen mit dem Rechner gut auswerten.

Die sich im Beharrungszustand nach Beendigung der Partikelbeschleunigung einstellende Partikelgeschwindigkeit berechnet sich wegen $dW_p^*/dL^* = 0$ zu:

$$(1-W_p^*)^{2-\alpha} - R^*W_p^{*2} - S^* = 0 \quad (11)$$

Für unterschiedliche Betriebsbedingungen und die verschiedenen Widerstandsgesetze kann man diese Geschwindigkeit aus den Abb. 5, 6 und 7 entnehmen. Bei der Abwärtsförderung ist zu beachten, dass bei Annäherung der Partikelgeschwindigkeit an die Gasgeschwindigkeit die Relativgeschwindigkeit immer kleiner wird und für Werte um $W_p^* = 1$ in jedem Fall das Stokes'sche Widerstandsgesetz gilt. Für die Fälle $\alpha = 0,5$ (Abb. 6) und $\alpha = 0$ (Abb. 7) wurde dies für die Abwärtsförderung berücksichtigt. Die abgeschätzten

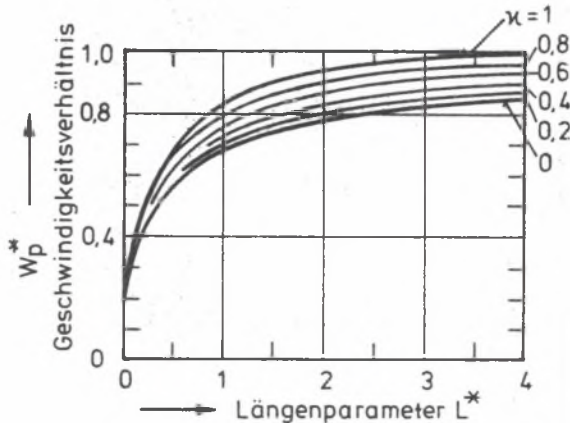


Abb. 8. Diagramm zur Bestimmung der Feststoffgeschwindigkeit bei Beschleunigung im waagerechten Rohr für verschiedene Widerstandsgesetze bei Vernachlässigung der Wandreibung

Kurvenverläufe sind gestrichelt gezeichnet. Zur Abschätzung der Beschleunigungsstrecke dient das Diagramm der Abb. 8, das unter Vernachlässigung der Wandreibung und des Schwerkrafteinflusses berechnet wurde.

3.2. Krümmer

Besonders kritische Stellen in Bezug auf das Verstopfen pneumatischer Förderleitungen stellen die Krümmer dar. Bedingt durch die Entmischung von Gas und Feststoff aufgrund der in der Umlenkung auftretenden Zentrifugalkräfte, wird der nun bevorzugt an der aussenliegenden Wand des Krümmers gleitende Feststoff abgebremst. Ist die Abbremsung so stark, dass der Feststoff im Krümmer zur Ruhe kommt, so kommt es zum Verstopfen der Rohrleitung. G. WEIDNER [7] hat die Abbremsung des Feststoffs in Krümmern unter Vernachlässigung des auch im Krümmer wirkenden Antriebs der Feststoffpartikel durch den Strömungswiderstand berechnet. Die Rechenergebnisse geben also die Feststoffgeschwindigkeit am Austritt aus dem Krümmer wieder, die mit Sicherheit nicht unterschritten wird. Man liegt dann bei der Auslegung immer auf der sicheren Seite. Für den Fall der Umlenkung aus der Waagerechten nach oben in einer senkrechten Ebene berechnet sich das Kräftegleichgewicht an der Feststoffsträhne entsprechend Abb. 9 zu:

$$-F_B = F_S + F_{RS} + F_{RZ} \quad (12)$$

Darin bedeuten F_S den der Bewegung entgegengerichteten Anteil der Schwerkraft, F_{RS} die durch die Schwerkraft und F_{RZ} die durch die Zentrifugalkraft bedingte Wandreibungskraft. Es ist:

$$-M \frac{dw_D}{dt} = Mg \sin \varepsilon + Mg \beta \cos \varepsilon + M \frac{w_D^2}{R} \beta \quad (13)$$

oder mit $w_p = R d\varepsilon/dt$ für die Geschwindigkeitsänderung:

$$\frac{w_D}{g \cdot R} \frac{dw_D}{d\varepsilon} + \sin \varepsilon + \beta \cdot \cos \varepsilon + \frac{w_D^2}{g \cdot R} \beta = 0 \quad (14)$$

Abb. 10 zeigt im unteren Diagramm die mit Gl. (14) berechnete und mit der Eintrittsgeschwindigkeit dimensionslos gemachte Geschwindigkeit des Feststoffs im Krümmer für unterschiedliche Krümmerparameter

$$K^* = \frac{w_D^2}{g \cdot R}$$

In Abb. 11 ist die bezogene Feststoffgeschwindigkeit am Krümmersaustritt für 2 Krümmerwinkel in Abhängigkeit vom Krümmerparameter und vom Reibungskoeffizienten aufgetragen.

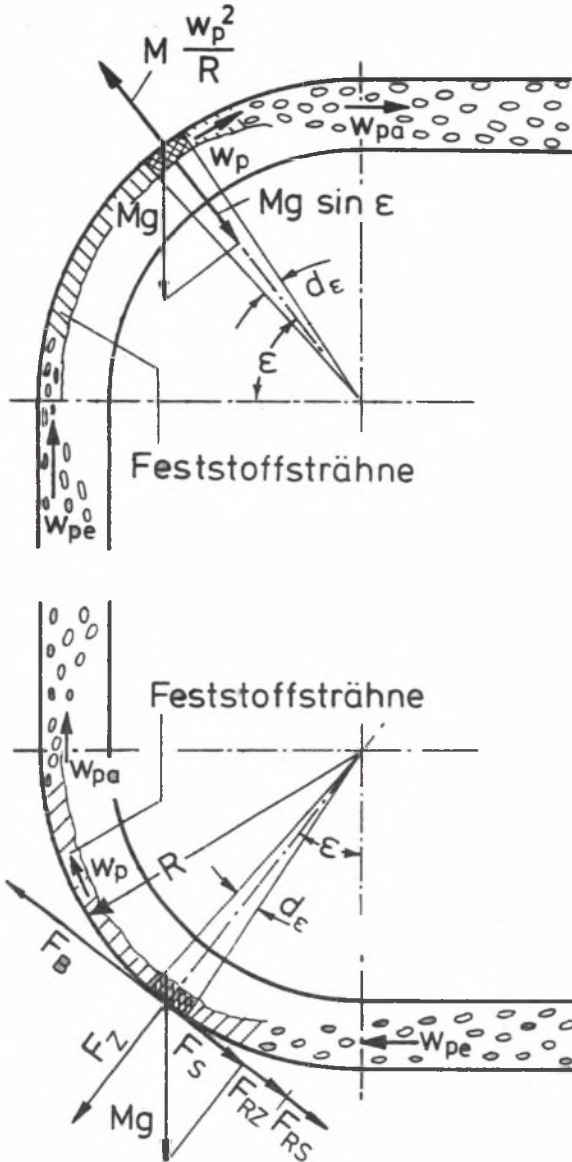


Abb. 9. Kräftegleichgewicht an Feststoffsträhnen in Krummern bei Umlenkung von der Waagerechten in die Senkrechte nach oben bzw. von der Senkrechten nach oben in die Waagerechte

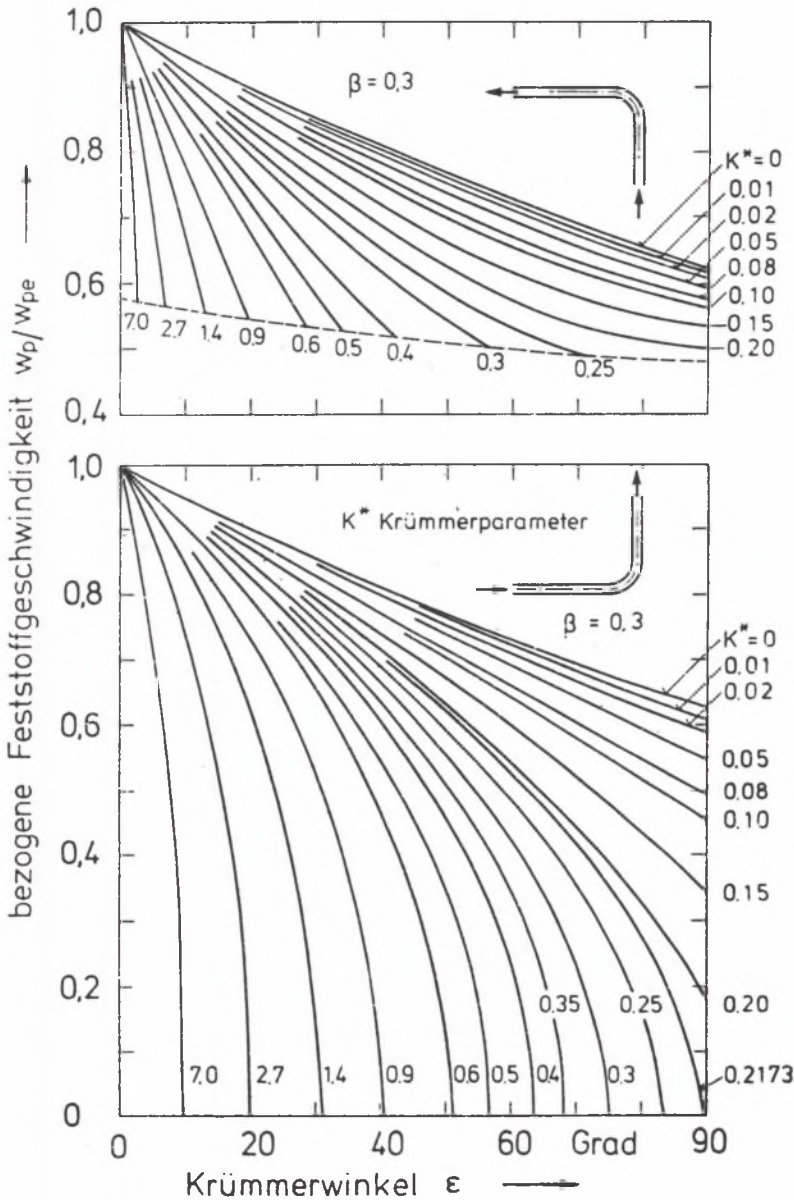


Abb. 10. Diagramm zur Bestimmung der Feststoffgeschwindigkeit in einem Krümmer in Abhängigkeit vom Krümmerwinkel für verschiedene Krümmerparameter ($\beta = 0,3$)

oben: Umlenkung von der Senkrechten nach oben in die Waagerechte, unten: Umlenkung von der Waagerechten in die Senkrechte nach oben

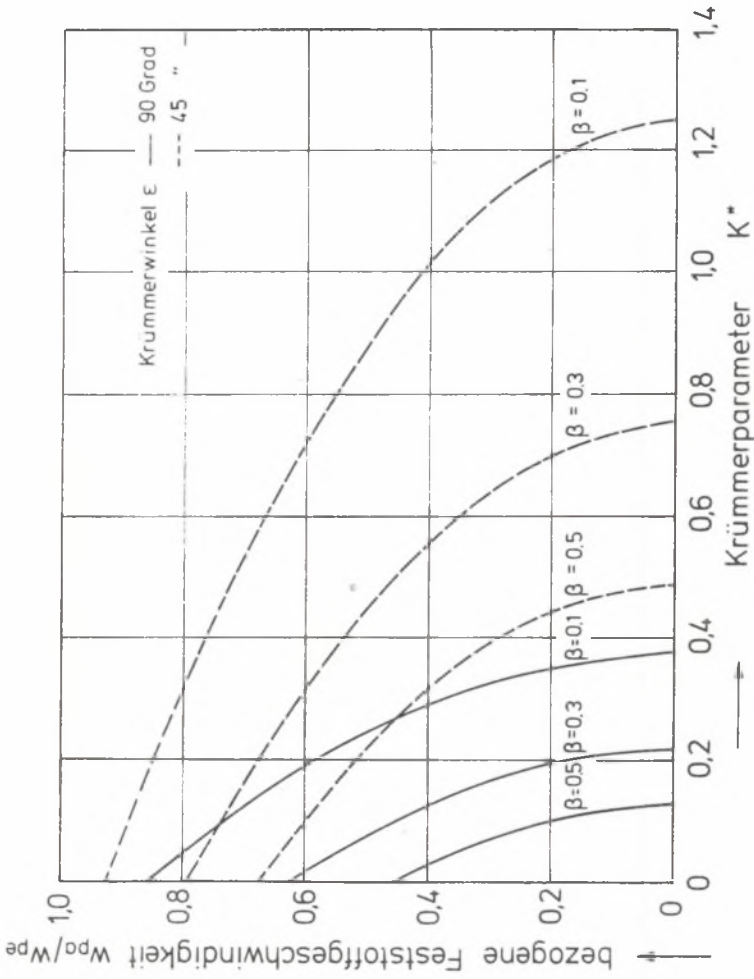


Abb. 11. Diagramm zur Bestimmung der Feststoffgeschwindigkeit am Austritt aus dem Krümmer für verschiedene Krümmwinkel und Reibungskoeffizienten in Abhängigkeit vom Krümmerparameter

Für eine Umlenkung von der Senkrechten nach oben in die Waagerechte erhält man für die Geschwindigkeitsänderung:

$$\frac{w_D dw_D}{g \cdot R \cdot d\epsilon} - \cos \epsilon - \beta \sin \epsilon + \frac{w_D^2}{gR} \beta = 0 \quad (15)$$

Herrscht Gleichgewicht zwischen der Zentrifugalkraft und dem zum Krümmungsmittelpunkt gerichteten Anteil der Schwerkraft, so wird $w_D^2/R = g \cdot \sin \epsilon$ (vgl. Abb. 9) und die Strähne löst von der Krümmungswand ab. Eine weitere Abbremsung des Feststoffs durch Reibung erfolgt nicht. Die Kurven des oberen Diagramms der Abb. 10 enden hier. Für den Fall der Umlenkung in einer waagerechten Ebene erhält man unter Vernachlässigung des Schwerkrafteinflusses

$$\frac{w_D}{w_{pe}} = e^{-\beta \cdot \epsilon} \quad (16)$$

Für die technisch weniger interessanten Umlenkungen von der Waagerechten in die Senkrechte nach unten und der Senkrechten in die Waagerechte nach unten findet man in [7] entsprechende Beziehungen.

4. Druckverlust

4.1. Flugförderung

Zur Berechnung des Druckverlustes von Gas/Feststoffströmungen in Röhren gibt es verschiedene Vorschläge. Durchgesetzt hat sich der Vorschlag von W. BARTH [6], nach dem die Berechnung des Druckverlustes in der Weise erfolgt, dass dieser in 2 Anteile aufgeteilt wird, wie dies Abb. 12 zeigt. Der erste Anteil beschreibt den Druckverlust der Gasströmung, der zweite Anteil den zusätzlichen Druckverlust, der für die Förderung des Feststoffes aufzubringen ist. Der Gesamtdruckverlust setzt sich dann additiv aus diesen beiden Anteilen zusammen. Es gilt für den Druckverlust der Gasströmung:

$$\Delta p_g = \lambda \frac{\rho}{2} w^2 \frac{\Delta l}{d} \quad (17)$$

sowie den zusätzlichen Druckverlust, der durch die Feststoffförderung bedingt ist:

$$\Delta p_p = \mu \lambda_p \frac{\rho}{2} w^2 \frac{\Delta l}{d} \quad (18)$$

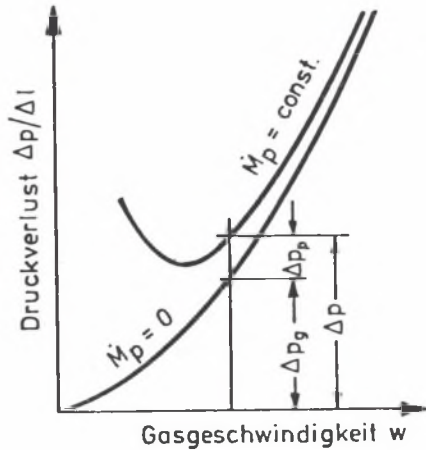


Abb. 12. Abhängigkeit des Druckverlustes bei Gas/Feststoffströmung von der Gasgeschwindigkeit und dem Feststoffmassenstrom

Für den Gesamtdruckverlust ergibt sich dann:

$$\Delta p = \Delta p_g + \Delta p_p = (\lambda + \mu \lambda_p) \frac{\rho}{2} w^2 \frac{\Delta l}{d} \quad (19)$$

Um die Indizierung auf ein Minimum zu beschränken, werden die Grössen, die sich auf die Gasströmung beziehen, ohne Index geschrieben. Lässt sich eine Indizierung nicht vermeiden, so wird der Index g verwendet.

Schwierigkeiten bereitet die Bestimmung des Druckverlustkoeffizienten λ_p . Er hängt stark von den Stoffeigenschaften des Feststoffs und der Rohrleitung ab. Für die Flugförderung berechnet sich der Druckverlustkoeffizient λ_p nach E. MUSCHELKNAUTZ [8] zu:

$$\lambda_p = \frac{w_p}{w} \lambda_p^* + \frac{2\beta}{\frac{w_p}{w} Fr} \quad (20)$$

wobei λ_p^* die Wandreibung der Feststoffpartikel und β den Schwerkräfteinfluss berücksichtigt. Die prinzipielle Abhängigkeit des Druckverlustkoeffizienten von diesen beiden Einflussgrössen zeigt Abb. 13.

4.2. Strähnenförderung

Bei der Strähnenförderung, die hauptsächlich bei Förderung feiner pulverförmiger Feststoffe beobachtet wird, ist zu beachten, dass sich der Feststoff in der Strähne immer wesentlich langsamer bewegt als der Feststoff, der unmittelbar vom Gas getragen wird. M. BOHNET [9] hat gezeigt, dass es für diese Fälle zweckmässig ist, den Wandreibungseinfluss nur bei

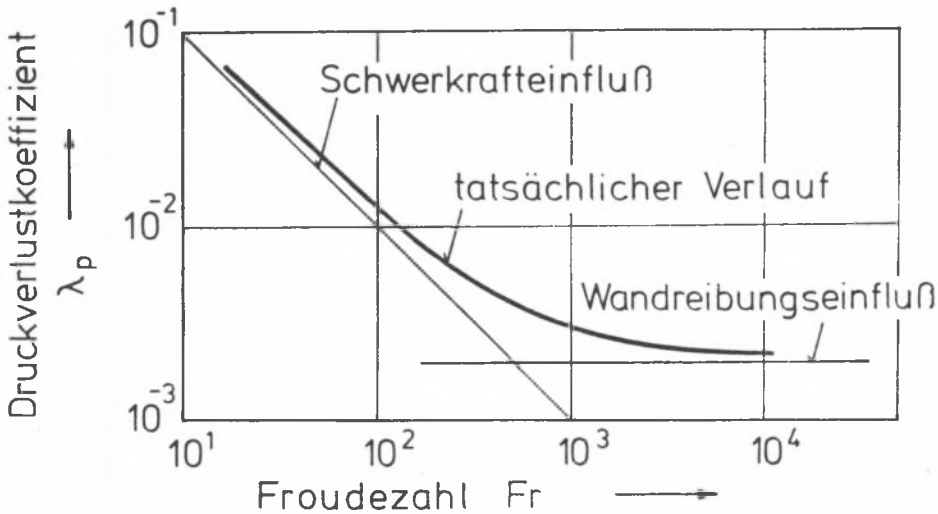


Abb. 13. Druckverlustkoeffizient in Abhängigkeit von der Froudezahl

den mehr oder weniger freifliegenden Partikeln anzusetzen und den Schwerkrafteinfluss ausschliesslich der Feststoffförderung in der Strähne zuzuordnen. Für diesen Fall berechnet sich der Druckverlustkoeffizient λ_p zu:

$$\mu \lambda_p = \mu_1 \frac{w_{p1}}{w} \lambda_p^* + \mu_2 \cdot \frac{2\beta}{\frac{w_{p2}}{w} Fr} \quad (21)$$

Um mit den Gleichungen (20) und (21) rechnen zu können, muss neben dem Wandreibungskoeffizienten λ_p^* und dem Schwerkraftkoeffizienten β auch noch die Geschwindigkeit des Feststoffs in der Strähne w_{p2} und über der Strähne w_{p1} sowie der Anteil μ_2 des Feststoffs, der sich in der Strähne bewegt bekannt sein. Diese Einzelgrößen lassen sich nur mit grossem experimentellen Aufwand bestimmen. Eine Zusammenstellung experimentell bestimmter Wandreibungs- und Schwerkraftkoeffizienten zeigt Tab. 2.

Für die praktische Anwendung ist es deshalb meist einfacher den Druckverlustkoeffizienten λ_p direkt zu messen. Abb. 14 zeigt beispielsweise in Glasrohren gemessene Werte von λ_p in Abhängigkeit von der Froudezahl Fr für verschiedene feinkörnige Feststoffe, wobei bei einigen dieser Stoffe bei Froudezahlen über 1000 noch ein Einfluss der Gutbeladung zu beobachten ist. Dieser wurde in der Darstellung vernachlässigt. Die Wandreibung Glasrohr/Feststoff ist sehr gering ($\lambda_p^* = 0,0005$). Für den Schwerkraftkoeffizienten findet man $\beta = 0,5$ der bei kleinen Froudezahlen praktisch dem Beiwert der Strähnenreibung entspricht. Bei den feinen Feststoffen ist

$w_{p1}/w \approx (0,9 \div 1,0)$. w_{p2}/w hängt noch von der Gasgeschwindigkeit ab. In erster Näherung gilt für Feststoff/Glasrohr:

$$w_{p2}/w = 0,05 Fr^{1/4} \quad (22)$$

Tabelle 2

Wandreibungs-, Schwerkraft- und Gleitreibungskoeffizienten

Feststoff	Rohrwerkstoff	Wandreibungs-koeffizient	Schwerkraft-koeffizient	Gleitreibungs-koeffizient	Autor
		λ_p^*	β	β_0	
Glaskugeln	Stahl	0,003			Muschelknautz [8]
Quarzkörner	Stahl	0,0066			
Steinkohle	Stahl	0,0021			
Flugasche	Glas	$\approx 0,0005$	$\approx 0,5$ (Strähne)		Bohnet [9]
Feuerlöschpulver	Glas				
Katalysator	Glas				
Quarzsand	Glas				
Flugasche	Stahl	0,001	0,65 (Strähne)		Bohnet [9]
Polystyrol	Stahl	0,001		0,2	Siegel [10]
Glaskugeln	Stahl			0,15	
Stahlkugeln	Stahl			0,16	
Quarzsand	Stahl				Rizk [11]
Polystyrol	Stahl	0,02	0,25		
Styropor	Stahl	0,03	0,3		
Polyethylen	Al-Mg	0,005	0,25		Frobese [12]
Quarzsand	Stahl			0,4	Legel [13]
Polyethylen	Stahl			0,45	

Die abb. 15, 16 und 17 zeigen eine Auswahl gemessener Druckverlustkoeffizienten λ_p für gröbkörnige Feststoffe.

Die Ausführungen zur Druckverlustberechnung haben gezeigt, dass bei allen Förderzuständen die Wandreibung und die Schwerkraft von Bedeutung sind. Aus Gl. (20) wird deutlich, dass bei hohen Gasgeschwindigkeiten - und damit auch hohen Feststoffgeschwindigkeiten - die Wandreibung und bei niedrigen Gasgeschwindigkeiten die Schwerkraft den Druckverlustkoeffizienten - und damit den Druckverlust - maßgeblich bestimmt.

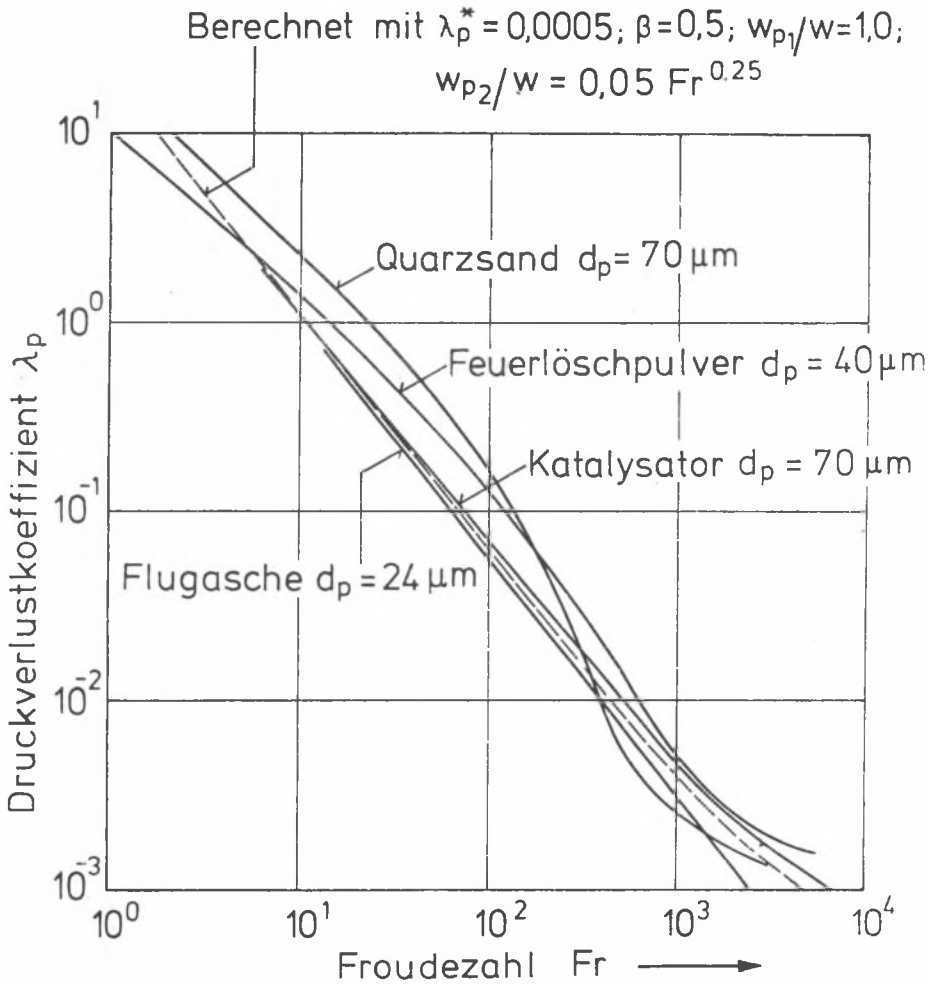


Abb. 14. Druckverlustkoeffizient für verschiedene feinkörnige Feststoffe nach M. BOHNET [9]

	d_p [μm]	w_s [m/s]
Kurve a: Flugasche	24	0,04
Kurve b: Feuerlöschpulver	40	0,11
Kurve c: Katalysator	70	0,22
Kurve d: Quarzsand	70	0,38
Kurve e: Berechnet mit $\lambda_p^* = 0,0005$; $\beta = 0,5$; $w_{p1} = 1,0$ und Gl. (22)		

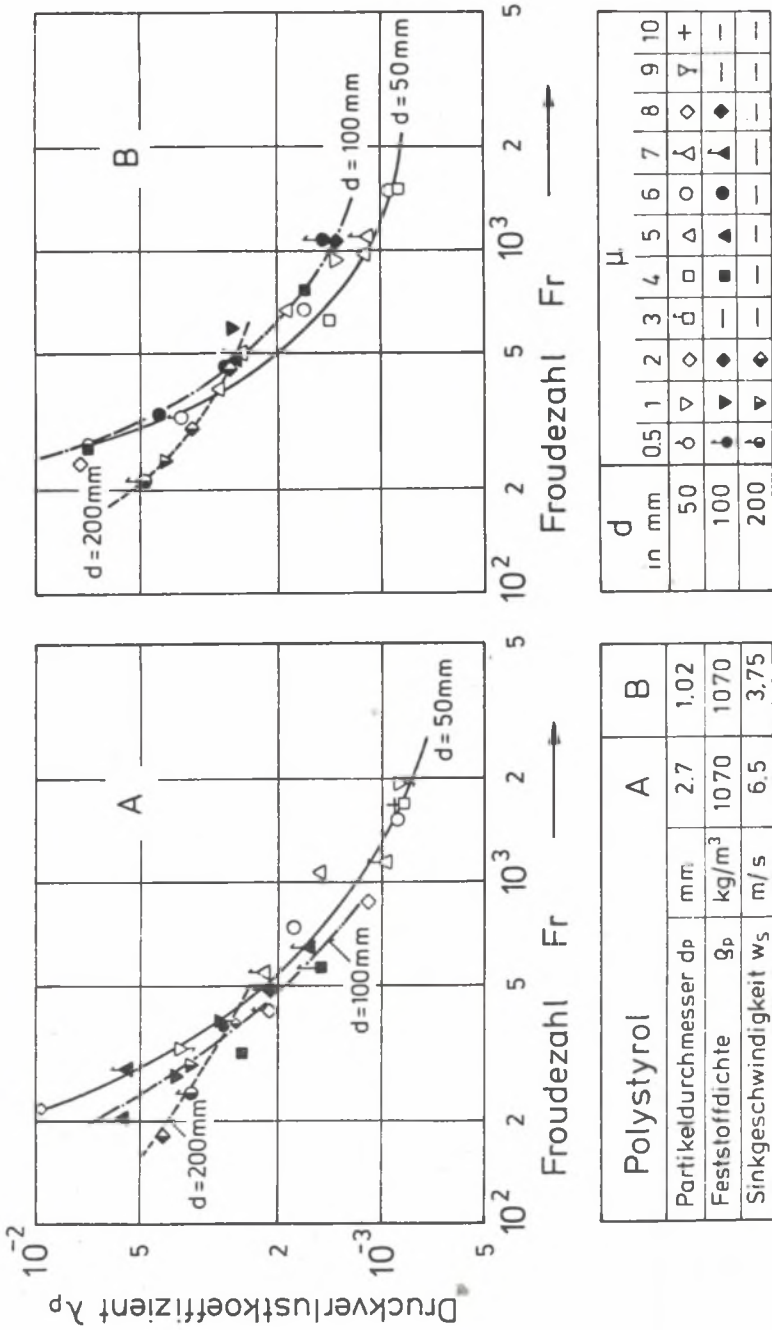


Abb. 15. Druckverlustkoeffizient für verschiedene grobkörnige Feststoffe nach W. SIEGEL [10]

Partikeldurchmesser $d_p = 2,52 \text{ mm}$
 Feststoffdichte $\rho_p = 1050 \text{ kg/m}^3$
 Sinkgeschwindigkeit $w_s = 8,5 \text{ m/s}$
 Rohrdurchmesser $d = 51,3 \text{ mm}$

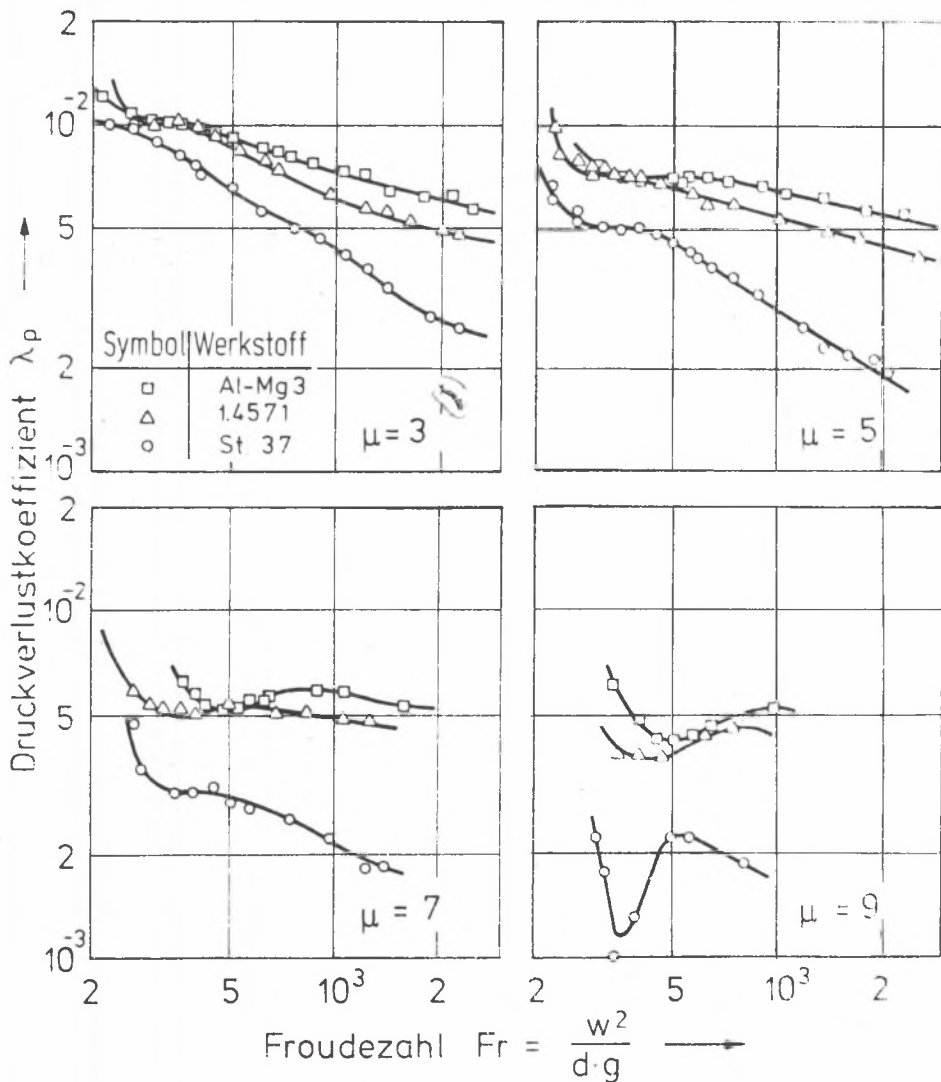


Abb. 16. Druckverlustkoeffizient von Polystyrolgranulat in Rohrleitungen aus unterschiedlichen Werkstoffen nach F. RIZK [11]

Partikeldurchmesser $d_p = 2,38 \text{ mm}$
 Feststoffdichte $\rho_p = 1050 \text{ kg/m}^3$
 Sinkgeschwindigkeit $w_s = 8,0 \text{ m/s}$
 Rohrdurchmesser $d = 51,3 \text{ mm}$

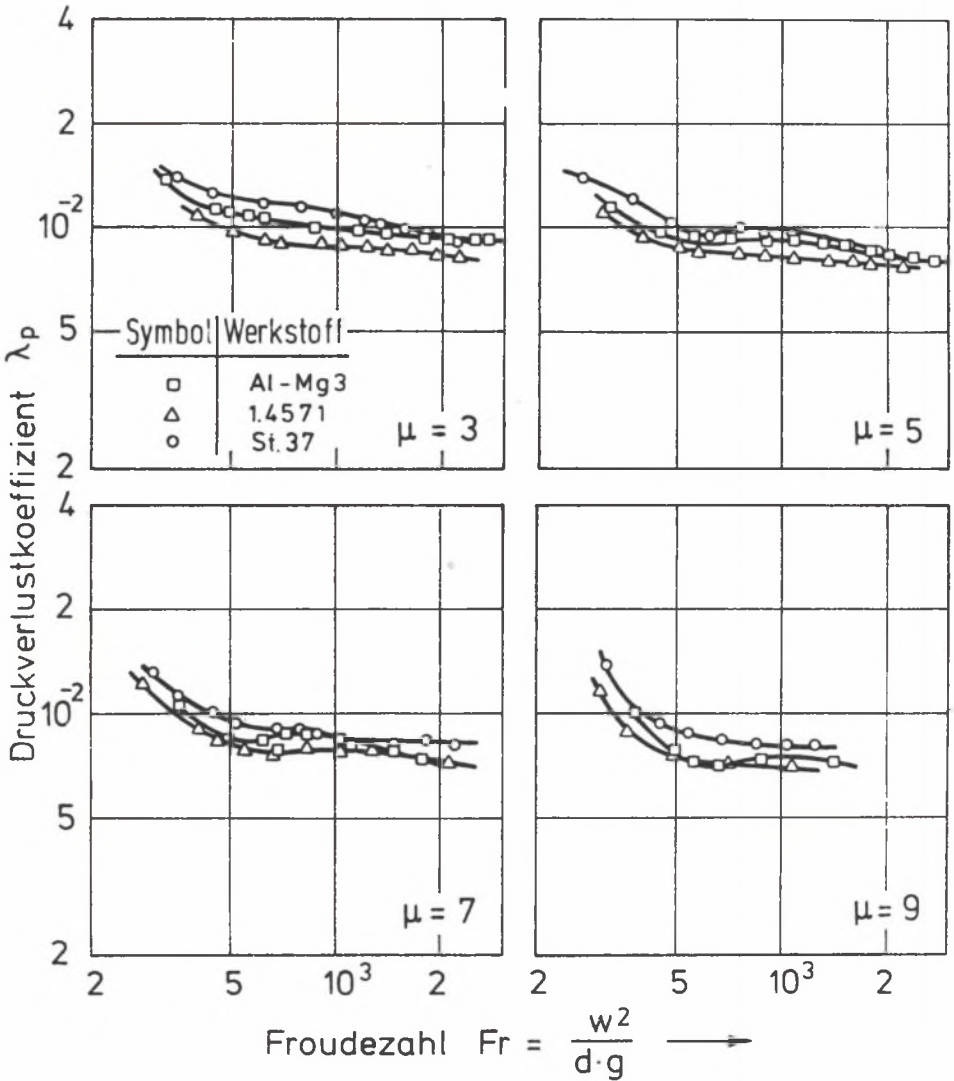


Abb. 17. Druckverlustkoeffizient für Styroporgranulat in Rohrleitungen aus unterschiedlichen Werkstoffen nach F. RIZK [11]

4.3. Druckverlust bei Pfropfenförderung

Um die Feststoffgeschwindigkeit zu verringern, werden immer wieder Versuche unternommen, die der Rohrpost vergleichbare Pfropfenförderung auch technisch verlässlich zu verwirklichen. Hierzu sind aber Kenntnisse über das strömungstechnische Verhalten von Schüttgutpfropfen erforderlich. Mit dieser Frage hat sich kürzlich in einer umfangreichen Arbeit D. LEGEL [13] befasst.

An den Feststoffpfropfen, die den gesamten Rohrquerschnitt ausfüllen und sich mit konstanter Geschwindigkeit durch das Rohr bewegen, muss Gleichgewicht zwischen den Antriebskräften des Fördergases und den Reaktionskräften zwischen dem Pfropfen und seiner Begrenzung herrschen. Die am Schüttgutpfropfen in Förderrichtung angreifenden Kräfte verursachen radiale Reaktionskräfte im Schüttgut sowie zwischen dem Schüttgut und der Rohrwand. Die radialen Reaktionskräfte, die senkrecht auf die Rohrwand wirken, führen nach Multiplikation mit dem Wandreibungskoeffizienten β_0 zur Wandreibungskraft F_{WR} . Dieser überlagert sich noch die Reibungskraft F_S , die sich aus dem Produkt des Schüttgutgewichtes und dem Wandreibungskoeffizienten berechnet. F_{WR} wirkt gleichmässig über den Rohrumfang, F_S nur in der unteren Rohrhälfte. Darüber hinaus ist noch zu berücksichtigen dass sich der Pfropfen in der Regel gegen eine am Rohrboden liegende ruhende Strähne bewegt, die am Pfropfen eine Staukraft F_{St} hervorruft.

Aus dem Kräftegleichgewicht

$$\Delta p_p A = F_{WR} + F_G + F_{St} \quad (23)$$

erhält D. LEGEL letztlich folgende Beziehung zur Berechnung des Druckverlustes bei Pfropfenförderung

$$\frac{\Delta p}{\rho_p (1 - \epsilon_p) g \cdot l_p} - \beta_0 = \left(\frac{1 - \epsilon_p}{1 - \epsilon_p} \right) \left(1 - \frac{\bar{A}}{A} \right) \cdot 4\lambda \cdot \beta_0 \cdot \frac{w_p^2}{d_g} \cdot B \quad (24)$$

mit λ als einem Kraftübertragungskoeffizienten und B als einem Spannungsverhältnis. Alle Grössen, die die Verkeilung der Partikel im Pfropfen beeinflussen, werden in einer Keilzahl

$$\psi = \left(\frac{1 - \epsilon_p}{1 - \epsilon_p} \right) \left(1 - \frac{\bar{A}}{A} \right) \cdot 4\lambda \cdot \beta_0 B \quad (25)$$

zusammengefasst. Aus den Gl. (24) und (25) folgt dann:

$$\frac{\Delta p_p}{\rho_p (1 - \epsilon_p) g \cdot l_p} = \beta_0 = \psi Fr \left(\frac{w_p}{w} \right)^2 \quad (26)$$

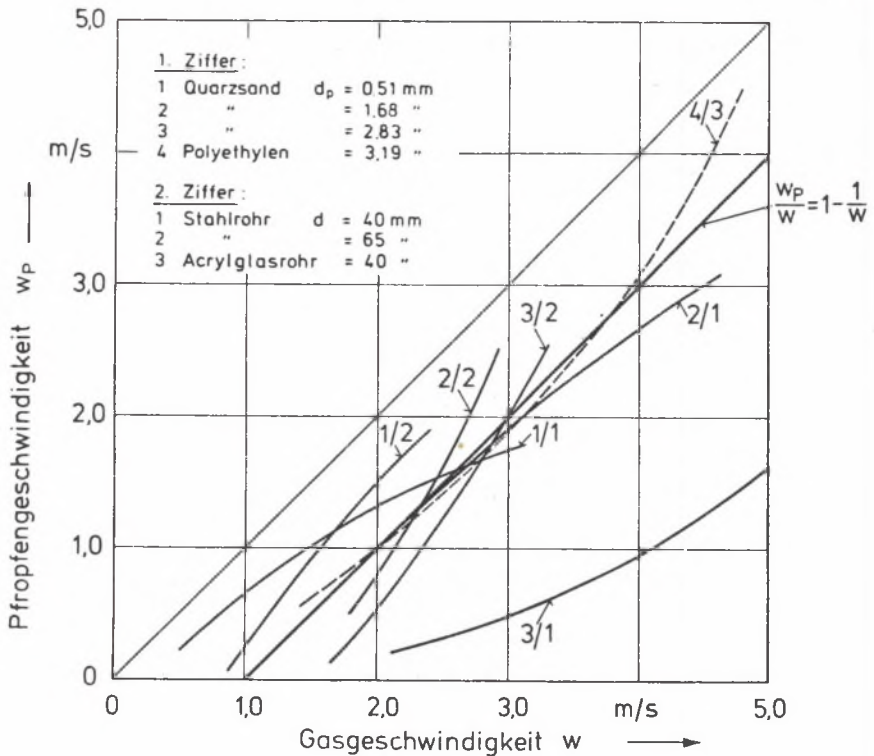


Abb. 18. Pfropfgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Gasgeschwindigkeit nach D. LEGEL [13]

Nr	Feststoff	Partikeldurchmesser [mm]	Rohrwerkstoff	Rohrdurchmesser [mm]
1/1	Quarz	0,51	Stahl	40
1/2				65
2/1				40
2/2		65		
3/1		2,83		40
3/2		65		
4/3	Polyethylen	3,19	Acrylglas	40

Für das Geschwindigkeitsverhältnis findet man aus den Messungen von D. LEGEL in grober Näherung: $w_p/w = 1 - 1/w$. Die entsprechende Ausgleichskurve ist in die Messergebnisse von D. LEGEL in Abb. 18 eingetragen. Für den Reibungskoeffizienten kann in guter Näherung gesetzt werden $\beta_0 = 0,4 \pm 0,45$.

Zur Berechnung des Druckverlustes ist die Kenntnis der Keilzahl erforderlich, für die in Näherung gilt (vgl. Abb. 19):

$$\psi = \frac{1}{\left[Fr \left(\frac{w_p}{w} \right)^2 \right]^{0,8}} \quad (27)$$

Damit folgt aus Gl. (26) als Berechnungsgleichung für den Druckverlust:

$$\frac{\Delta p_p}{\rho_p (1 - \epsilon_p) g l_p} = \beta_0 + \left[Fr \left(\frac{w_p}{w} \right)^2 \right]^{0,2} \quad (28)$$

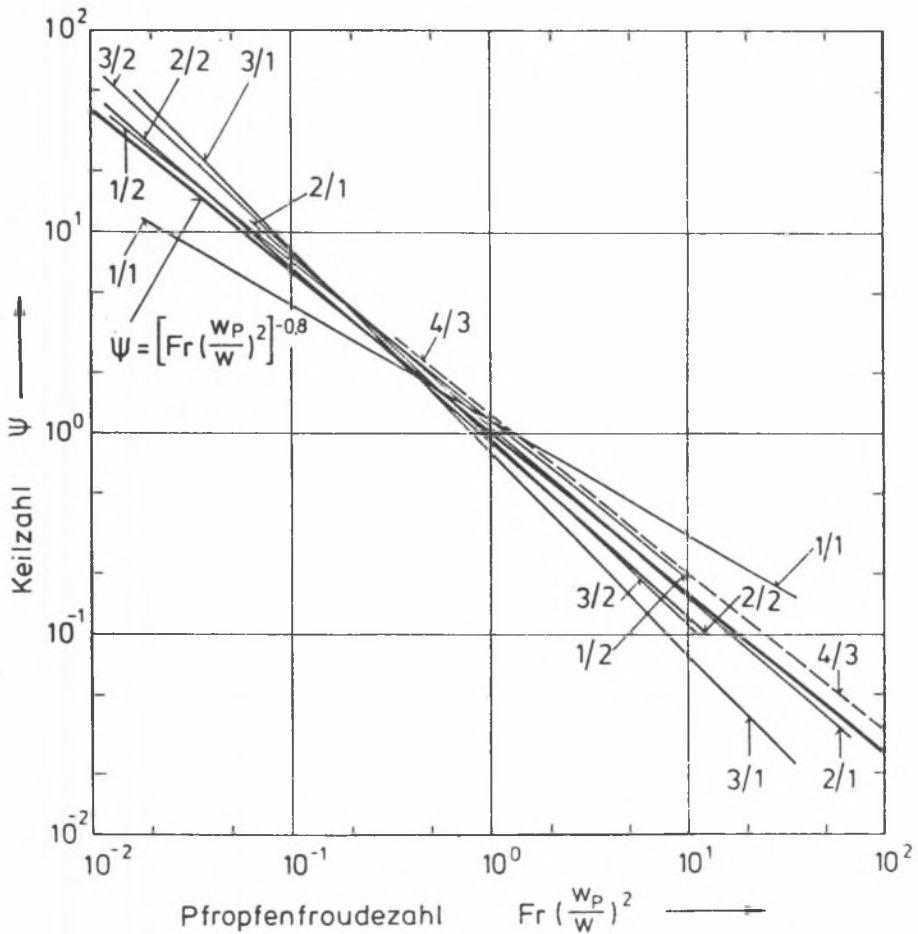


Abb. 19. Keilzahl in Abhängigkeit von der Pfproudezahl nach D.LEGEL [13] (Bezeichnungen wie Abb. 19)

Zur Zeit ist die Pfpfenförderung noch nicht so zuverlässig auszulegen, dass sie in grösserem Umfang technisch eingesetzt werden kann. Eine Ausnahme bildet die Takt-Schub-Förderung. Bei diesem Verfahren wird eine bestimmte Feststoffmenge in die Förderleitung eingespeist, dann der Feststoffmassenstrom des Zuflusses unterbrochen und der Fördergasstrom freigegeben. Der Feststoff wird also schubweise gefördert. Der Hauptnachteil dieses Förderersystems besteht darin, dass bei gleichem Gasmassenstrom der erforderliche Druck ungefähr zweimal so hoch ist wie bei konventioneller Förderung.

5. Pfpfenförderung mit Sekundärgas

Die Pfprenförderung unter Verwendung einer Bypassleitung wurde aus einem früheren Vorschlag entwickelt, bei dem ein perforierter Schlauch oder ein Rohr [14] zur Auflockerung bereits abgelagerten Feststoffs in die Förderleitung eingelegt wurde. Trat bedingt durch eine zu geringe Gasgeschwindigkeit im Rohr Pfpfenbildung auf, so strömte das Gas, den Weg

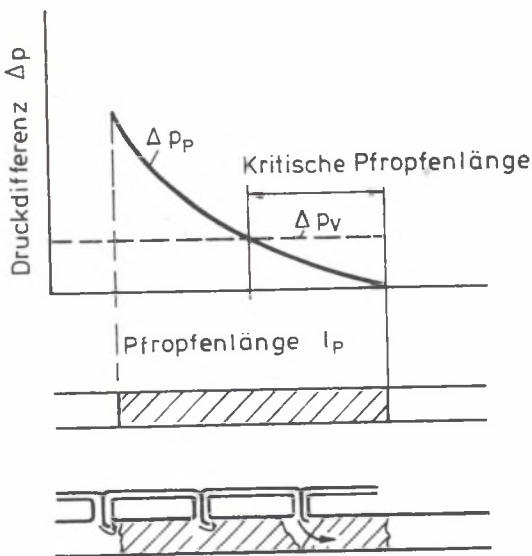


Abb. 20. Druckdifferenz über der Pfpfenlänge und Prinzipskizze des Bypassförderersystems

des geringsten Widerstandes nehmend, durch den perforierten Schlauch und fluidisierte den Feststoff im Pfpfen. Dieser Feststoff wurde dann von der Hauptströmung wieder erfasst und weiter gefördert. Eine Weiterentwicklung dieses Verfahrens stammt von A. LIPPERT [15], welcher die Förderleitung mit aussen angeordneten Bypassrohren versah, um so eine gezielte Pfpfenbildung zu erreichen (Abb. 20). Der Grundgedanke dieser Bypass-Förderung ist der folgende: Setzt eine Pfpfenbildung in der Förderleitung ein, so benötigt man für die Verschiebung eines Pfpfens einer bestimmten Länge den

Verschiebedruck p_v . Ist der Förderdruck geringer als dieser Verschiebedruck, so wird der Pfpfen nicht mehr bewegt. Beim Einsatz eines Bypass-Systems strömt nun entsprechend Abb. 20 Gas durch die Bypassrohre

und tritt stromabwärts wieder in die Förderleitung ein. Wenn am Anfang eines Bypasses der Verschiebedruck für den verbleibenden Anteil des Pfropfens kleiner als der verfügbare Förderdruck ist, so wird der Pfropfen an dieser Stelle geteilt und in Bewegung gesetzt. Der Hauptnachteil dieses Fördersystems ist, dass bei Förderung sehr feiner Materialien auch Feststoff durch die Bypassleitungen strömt, was zu einer Verstopfung dieser vergleichsweise engen Rohrleitungen führen kann. Hauptvorteil ist die Verringerung des Gasmassenstroms um rund die Hälfte ohne wesentliche Erhöhung des Förderdruckes [16].

Die wohl aufwendigste und teuerste Lösung, zu einer verlässlich arbeitenden Pfropfenförderung zu kommen, bietet ein System, bei dem nach W. KRAMBROCK [3, 17] Sekundärluft gezielt durch ein Bypass-System zugegeben wird. Mit Hilfe von Drucksensoren wird der Beginn der Pfropfenbildung festgestellt. Die Pfropfen werden dadurch zerstört, dass in die Pfropfen Sekundärluft eingeblasen und damit der Pfropfen geteilt wird. Der physikalische Hintergrund dieses Systems ist der folgende:

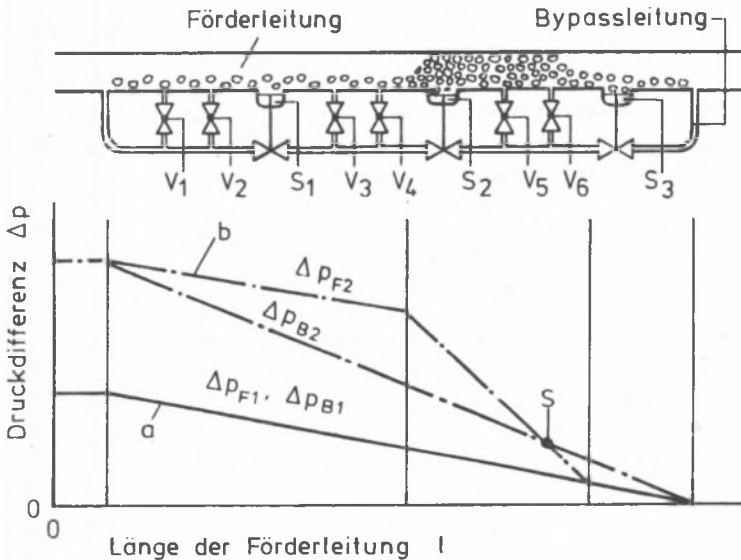


Abb. 21. Verhinderung der Pfropfenbildung durch gezielte Zufuhr von Sekundärgas

Wie Abb. 21 zeigt, herrscht in der eigentlichen Förderleitung und in der Bypassleitung im Normalbetrieb über die gesamte Länge beider Rohre der gleiche Druck (Kurve a). Es ist $\Delta p_{F1} = \Delta p_{B1}$. Bilden sich nun in der Rohrleitung ein Feststoffpfropfen, so steigt der Druck von dem Pfropfen an, wie dies Kurve b zeigt. Sobald der Druck in der Bypassleitung höher als an der entsprechenden Stelle der Förderleitung wird, schließt ein

Drucksensor S stromabwärts des Pfropfens die Bypassleitung und öffnet Sekundärgasventile V, die im Bereich des Pfropfens liegen, wodurch Sekundärluft unmittelbar in den Pfropfen einströmt und diesen weiter fördert. Ist der Pfropfen entfernt, so sinkt der Druck wieder ab und folgt der ursprünglichen Kurve a. Der Drucksensor öffnet dann wieder den Durchgang der Bypassleitung.

6. Stopfgrenze

Pneumatische Förderleitungen neigen zum Verstopfen, wenn die Gas- und damit auch die Feststoffgeschwindigkeit einen bestimmten Wert unterschreitet oder die Feststoffbeladung zu hoch wird. Im Betrieb hängt die Anfälligkeit gegen Verstopfen jedoch nicht nur von den Strömungsbedingungen in der Rohrleitung ab, sondern auch vom gewählten Druckerzeuger, dessen Kennlinie dafür verantwortlich ist, ob die Strömung kurzzeitige Änderungen im Feststoffmassenstrom bzw. im Gasmassenstrom ausgleichen kann oder nicht. Für praktische Fälle hat es sich als sinnvoll erwiesen, die Stopfgrenze im Bereich des Minimums der Druckverlustkurven anzusiedeln, obwohl auch links vom Druckverlustminimum bei bestimmten Bedingungen eine stabile Förderung möglich ist. Für vorgegebene Feststoffmassenströme lässt sich die Gasgeschwindigkeit im Druckverlustminimum berechnen. Differenziert man den bezogenen Druckverlust nach der Gasgeschwindigkeit, so erhält man für

$$\frac{d(\frac{\Delta p}{\Delta l})}{dw} = 0 \quad (29)$$

eine Bestimmungsgleichung für die Gasgeschwindigkeit am Druckverlustminimum. Beachtet man die Tatsache, dass im Bereich des Druckverlustminimums in jedem Fall der überwiegende Teil des Feststoffs in Form einer Feststoffsträhne gefördert wird und vernachlässigt in erster Näherung den Einfluss der Wandreibung des Feststoffs auf den Gesamtdruckverlust, so gilt:

$$\frac{\Delta p}{\Delta l} = \left(\lambda + \frac{2\beta}{\frac{w}{\rho} \frac{\rho}{Fr}} \right) \frac{\rho}{2} w^2 \cdot \frac{1}{d} \quad (30)$$

Führt man statt der Feststoffbeladung den in der Praxis unmittelbar interessierenden Feststoffmassenstrom ein und beachtet, dass die Geschwindigkeit der Feststoffsträhne von der Froudezahl abhängt, so erhält man mit

$$\frac{w}{\rho} \frac{\rho}{Fr} = C Fr^n \quad (31)$$

$$\frac{\Delta p}{\Delta l} = \left(\lambda + \frac{8 \beta \dot{M}_p}{\rho \pi d^2 w C \cdot Fr^{n+1}} \right) \frac{\rho}{2} w^2 \frac{1}{d} \quad (32)$$

Differenziert man den bezogenen Druckverlust nach w und setzt diesen Wert gleich Null, so erhält man eine Bestimmungsgleichung für den Zusammenhang zwischen Feststoffmassenstrom und Gasgeschwindigkeit am Druckverlustminimum:

$$w = \left[\frac{(2n+1) 4 \beta \dot{M}_p d^{n-1} g^{n+1}}{\rho \pi C \lambda} \right]^{\frac{1}{2n+3}} \quad (33)$$

Abb. 22 zeigt gemessene Druckverlustkurven für die Förderung von Flugasche in einer Stahlrohrleitung. Zur Berechnung der Stopfgrenze wurden die Druckverlustkoeffizienten der Abb. 23 mit folgenden Werten ausgeglichen:

$$\frac{w_{p1}}{w} = 1,0; \quad \frac{w_{p2}}{w} = 0,015 Fr^{0,3}; \quad \lambda_p^* = 0,001; \quad \beta = 0,65; \quad a = 0,0262$$

$$C = 0,015; \quad n = 0,3$$

Ersetzt man in Gl. (33) den Feststoffmassenstrom \dot{M}_p durch die Feststoffbeladung μ und löst die Gleichung nach μ auf, so erhält man

$$\mu = \frac{C \lambda}{(2n+1)} Fr^{n+1} \quad (34)$$

Mit den bereits genannten Zahlenwerten ergibt sich für Flugasche:

$$\mu = 3,8 \cdot 10^{-4} Fr^{1,3}$$

Der Verlauf dieser Kurve ist in Abb. 24 gezeichnet. Trotz der gemachten Vereinfachungen ist die berechnete Gasgeschwindigkeit am Druckverlustminimum, wie Abb. 22 zeigt, in guter Übereinstimmung mit den Messungen.

F. RIZK [18] gibt für die Berechnung der Gasgeschwindigkeit am Druckverlustminimum folgende Beziehung an:

$$\mu = \frac{1}{10^a} \cdot Fr^b \quad (35)$$

a und b hängen nach seinen Untersuchungen vom Partikeldurchmesser ab. Für grobkörniges Styropor und Polystyrol bis 6 mm Durchmesser findet man aus seinen Messungen:

$$a = 2+1,53 d_p \quad \text{und} \quad b = 1,27+0,545 d_p, \quad \text{wobei } d_p \text{ in mm einzusetzen ist.}$$

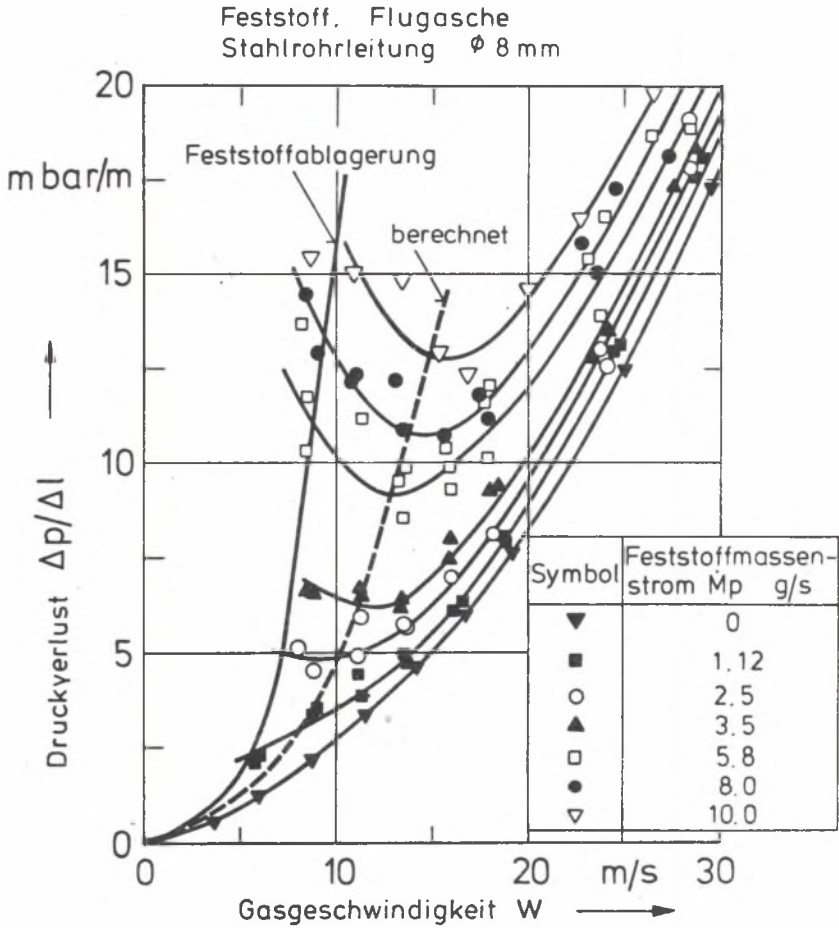


Abb. 22. Bezogener Druckverlust bei Förderung von Flugasche in einem Stahlrohr mit 8 mm Durchmesser in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit und dem Feststoffmassenstrom nach M. BOHNET [9]

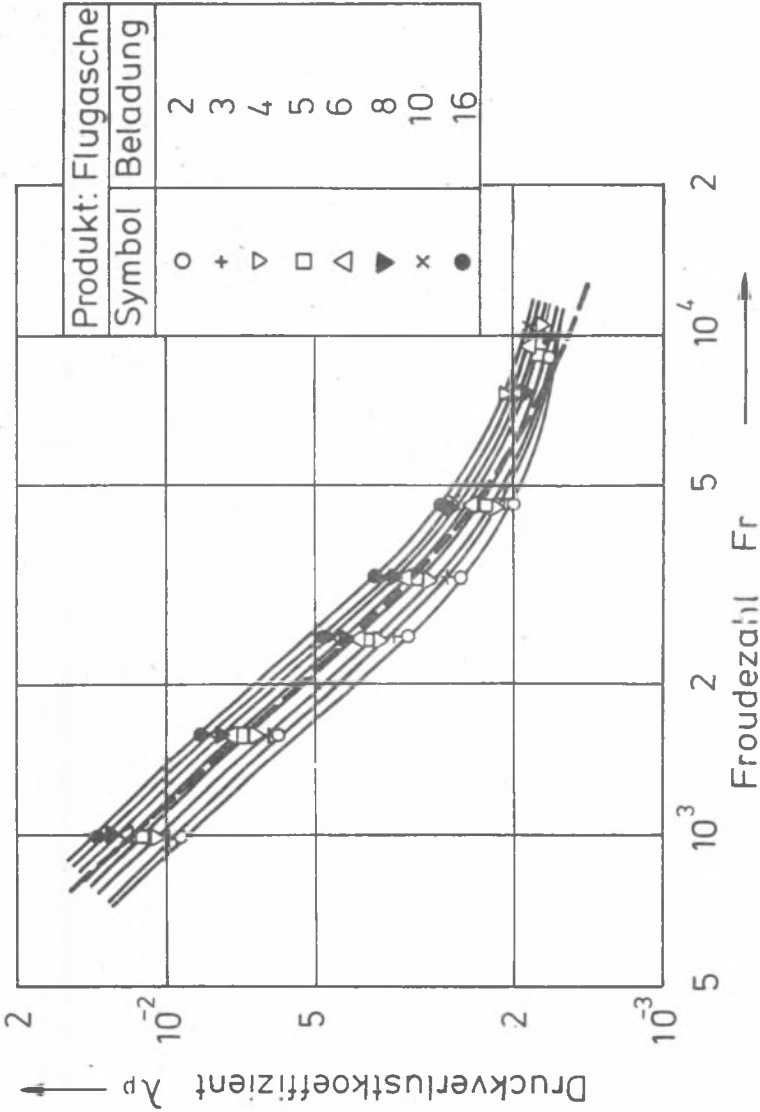


Abb. 23. Druckverlustkoeffizient für die Förderung von Flugasche in einem Stahlrohr nach M. BOHNET [9].
 (Ausgleichskurve berechnet mit: $w_{p1}/w = 1,0$; $w_{p2}/w = 0,015 Fr^{0,3}$; $\lambda = 0,262$; $\lambda^* = 0,001$; $\beta = 0,65$)

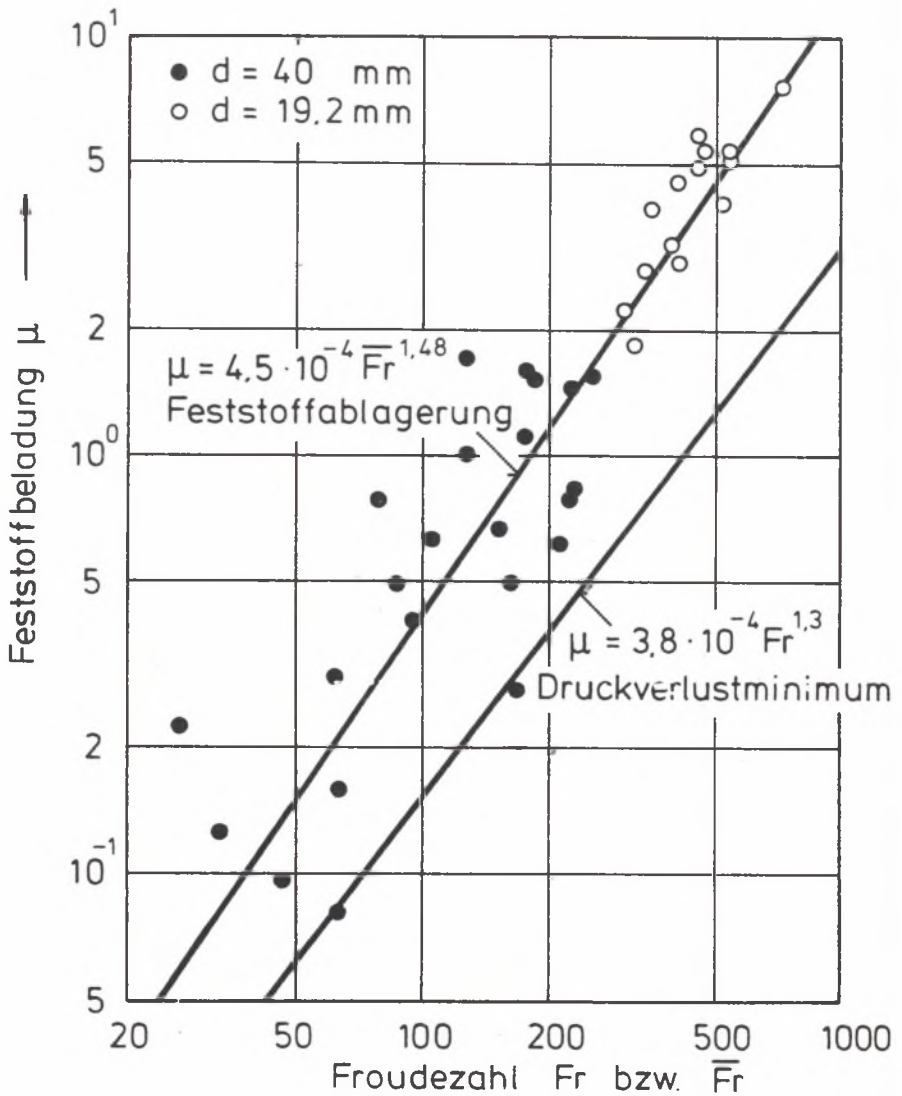


Abb. 24. Zusammenhang zwischen Feststoffbeladung und Froudezahl im Druckverlustminimum und bei Feststoffablagerung nach M. BOHNET [9] (Flugasche im Stahlrohr)

Ob eine grundsätzliche Abhängigkeit des Exponenten n und der Konstanten C in Gl. (34) vom Partikeldurchmesser besteht, ist noch ungeklärt.

Wird die Gasgeschwindigkeit so weit verringert, dass sich am Rohrboden eine ruhende Feststoffablagerung bildet, so wächst diese Ablagerung so lange, bis im freien Stromungsquerschnitt über der Ablagerung die Gasgeschwindigkeit so weit angestiegen ist, dass der gesamte aufgegebene Feststoff wieder gefördert wird. Führt man die auf den freien Strömungsquerschnitt bezogene effektive Froudezahl \bar{Fr} ein, so erhält man [9]:

$$\bar{Fr} = Fr \left(\frac{1-\bar{A}}{\bar{A}} \right)^{-2,5} \quad (36)$$

Ablagerungsversuche ergeben nun einen Zusammenhang zwischen der Feststoffbeladung μ und der effektiven Froudezahl \bar{Fr} . Das Gebiet der ablagerungsfreien Förderung lässt sich vom Gebiet mit Feststoffablagerungen leicht trennen. Für die Förderung von Flugasche in Stahlrohren gilt nach Abb. 24

$$\mu = 4,5 \cdot 10^{-4} \bar{Fr}^{1,48}$$

Diese Ablagerungsbedingung ist zum Vergleich in Abb. 22 eingezeichnet. Im praktischen Betrieb hängt die Stopfgrenze nicht nur von den Strömungsbedingungen im Rohr, sondern auch von der Fördercharakteristik des eingesetzten Druckerzeugers ab. Abb. 25 a zeigt, dass für eine vorgegebene Förderleitungskennlinie a , der Einsatz von Gebläsen mit unterschiedlicher Kennlinie möglich ist. Die Punkte C_1, C_2, C_3 kennzeichnen dabei stabile Förderzustände. Bei Erreichen des Punktes C_c wird die kritische Gasgeschwindigkeit in der Förderleitung erreicht. Eine weitere Verringerung des Gasmassenstroms führt unmittelbar zu einem Verstopfen der Förderleitung.

Bei vorgegebener Gebläsekennlinie können unterschiedliche Feststoffmassenströme gefördert werden. In Abb. 25b kennzeichnen die Punkte C_1, C_2, C_3 stabile Förderzustände. Bei Erhöhung des Feststoffmassenstroms bis \dot{M}_{p4} wird der kritische Betriebspunkt C_c erreicht. Eine weitere Steigerung des Feststoffmassenstroms führt zum Verstopfen der Förderleitung.

7. Förderung bei grossen Druckunterschieden

Um die Druckverluste in langen Förderleitungen gering zu halten, ist in vielen Fällen eine stufenweise Erweiterung der Rohrleitung in Förderrichtung vorzunehmen und zwar derart, dass die Rohrleitung stromaufwärts immer dann eingezogen wird, wenn auf Grund des Druckverlustes die Gasgeschwindigkeit einen kritischen Wert erreicht. Diese Massnahme ist deshalb erforderlich, weil bei grossen Reibungsdruckverlusten infolge der Expansion des Fördergases die Gasgeschwindigkeit stromabwärts ständig zunimmt und einen starken Anstieg des Druckverlustes bedingt.

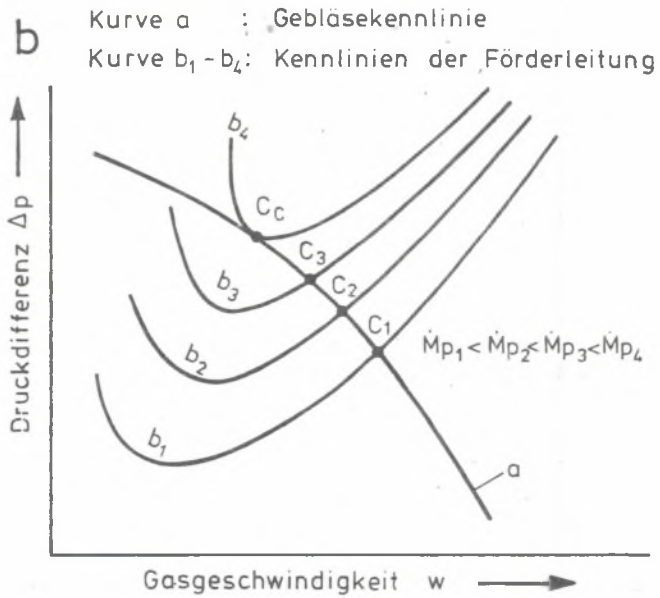
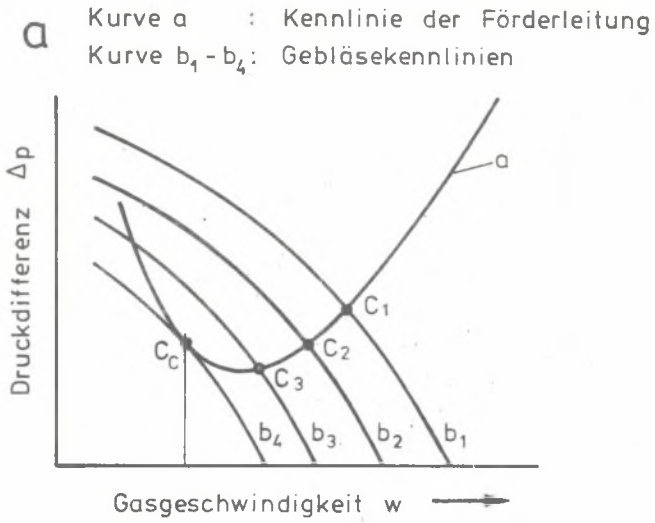


Abb. 25. Unterschiedliche Betriebsbedingungen pneumatischer Förder Systeme

Bei pneumatischen Förderleitungen kann man wegen der grossen Masse des geförderten Feststoffs in fast allen Fällen davon ausgehen, dass die Strömung isotherm verläuft. Für den Reibungsdruckverlust erhält man dann:

$$\frac{p^2 - p_0^2}{2p_0} = (\lambda + \mu\lambda_p) \frac{p_0}{2} w_0^2 \frac{1}{d_0} \quad (37)$$

wobei der Index 0 die Bedingungen am Ende der Förderleitung kennzeichnet. Bezüglich des Abstufungskriteriums gibt es unterschiedliche Auffassungen. M. BOHNET [19] schlägt vor, den Rohrdruckmesser dann zu verringern wenn eine kritische Froudezahl, E. MUSCHELKNAUTZ und H. WOJAHN [20], wenn ein kritischer dynamischer Druck unterschritten wird. Die Änderung des Rohrdurchmesser erfolgt dann für

$$Fr_{krit} = \frac{w_{krit}^2}{dg} \quad \text{mit} \quad p/p_0 = (d_0/d)^{2,5} \quad (38)$$

bzw. für

$$p_{dyn(krit)} = \frac{p_{krit}}{2} w_{krit}^2 \quad \text{mit} \quad p/p_0 = (d_0/d)^4 \quad (39)$$

Das zuletzt genannte Kriterium ergibt einen geringeren Druckverlust und sollte vor allem bei feinkörnigen Produkten und hohen Feststoffbeladungen angewandt werden. Man geht bei diesem Abstufungskriterium davon aus, dass bei höherer Gasdichte auch mit niedrigeren Gasgeschwindigkeiten betriebssicher gefördert werden kann. Bei der Förderung von Granulaten ergibt das erstgenannte Kriterium bestimmt betriebssichere Förderzustände. Der zusätzliche Investitionsaufwand für die Rohrabstufungen führt immer zu erheblicher Energieeinsparung. Es sei angemerkt, dass in vielen Fällen eine Förderung im nichtabgestuften Rohr unmöglich ist, da am Ende der Rohrleitung Schallgeschwindigkeit erreicht würde und die Gasgeschwindigkeit am Rohranfang für eine Förderung nicht ausreichend wäre.

SCHRIFTTUM

- [1] MUSCHELKNAUTZ, E. u. W. KRAMBROCK: Vereinfachte Berechnung horizontaler pneumatischer Förderleitungen bei hoher Gutbeladung mit feinkörnigen Produkten. Chemie-Ing.-Techn. 41 (1969) 21, 1164/1172.
- [2] SEGLER G.W. u. W. HUTT: Pneumatische Förderysteme und Beitrag zur Berechnung der Flugförderung. Grundl. Landtechn. 29 (1979) 1, 13/19.
- [3] KRAMBROCK W.: Möglichkeiten zum Verhindern der Stopfenbildung beim pneumatischen Transport. Verfahrenstechnik 12 (1978) 4, 190/202.
- [4] LEMPP M.: Die Strömungsverhältnisse von Gas-Feststoff-Gemischen in Verzweigungen pneumatischer Förderanlagen. Aufbereitungstechnik (1966) 6, 81/91.

- [5] MORIKAWA Y., KOBAYASHI Y., TAKEDA M. u. NEURA Y.: Pressure Losses of Air-Solid-Mixtures in the Branching of Pneumatic Conveying Bull JSME 17 (1974) 112, 1272/1277.
- [6] BARTH W.: Strömungsvorgänge beim Transport von Festteilchen und Flüssigkeitsteilchen in Gasen mit besonderer Berücksichtigung der Vorgänge bei pneumatischer Förderung. Chemie-Ing.-Techn. 30 (1958) 3, 171/180.
- [7] WEIDNER G.: Grundsätzliche Untersuchung über den pneumatischen Fördervorgang, insbesondere über die Verhältnisse bei Beschleunigung und Umlenkung. Forschung Ing.-Wesen 21 (1955) 5, 145/153.
- [8] MUSCHELKNAUTZ E.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen über die Druckverluste pneumatischer Förderleitungen unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses von Gutreibung und Gutgewicht. VDI-Forschungsheft 476, VDI-Verlag 1959, Düsseldorf.
- [9] BOHNET M.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen über das Absetzen, das Aufwirbeln und den Transport feiner Staubeilchen in pneumatischen Förderleitungen. VDI-Forschungsheft 507, VDI-Verlag 1965, Düsseldorf.
- [10] SIEGEL W.: Experimentelle Untersuchungen zur pneumatischen Förderung körniger Stoffe in waagerechten Rohren und Überprüfung der Ähnlichkeitsgesetze. VDI-Forschungsheft 532, VDI-Verlag 1969 Düsseldorf.
- [11] RIZK F.: Pneumatische Förderung von Kunststoffgranulaten in horizontalen Rohrleitungen unter Berücksichtigung des Gewichtseinflusses in Zusammenhang mit Gut- und Rohrwerkstoffeigenschaften insbesondere im optimalen Förderbereich. Dissertation Universität Karlsruhe 1973.
- [12] PROBESE, H.D.: Untersuchungen über die Druckverlustbeiwerte bei Gas/Feststoffströmungen in Rohren. Studienarbeit am Institut für Verfahrenstechnik der TU Braunschweig 1982.
- [13] LEGEL B.: Untersuchungen zur pneumatischen Förderung von Schüttgutpfropfen aus kohäsionslosem Material in horizontalen Rohren. Dissertation TU Braunschweig 1981.
- [14] TSUJI Y. u. Y. MORIKAWA: Dense Conveying of Coarse Particles in a Horizontal Pipe. Proceedings International Symposium on Powder Technology Kyoto, Japan 1981.
- [15] LIPPERT A.: Pneumatische Förderung bei hohen Gutkonzentrationen Chemie-Ing.-Techn. 38 (1966) 3, 350/355.
- [16] FLATT W. u. W. ALLENSBACH: Erhöhung der Förderleistung und Verbessern des Wirkungsgrades pneumatischer Förderanlagen. Chemie-Ing.-Techn. 41 (1969) 21, 1173/1176.
- [17] KRAMBROCK W.: Dichtstromförderung. Technik der Gas-Feststoff-Strömung. VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemie-Ingenieurwesen GVC, 161/188, VDI-Verlag 1981 Düsseldorf.
- [18] RIZK F.: Pneumatic Transport in Dilute and Dense Phase. Bulk Solids Handling 2 (1982) 2, 235/241.
- [19] BOHNET M.: Pneumatische Förderung in der Verfahrenstechnik. Pneumatische und hydraulische Förderung Krauskopf Verlag Mainz 1976, 19/28.
- [20] MUSCHELKNAUTZ E. u. H. WOJAHN: Fördern. Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie, Bd. 3 131/184. Verlag Chemie GmbH, Weinheim 1973.

Symbolverzeichnis

A	m^2	- Rohrquerschnitt
\bar{A}	m^2	- Ströhnenquerschnitt bzw. Querschnitt der Feststoffablagerung
B	-	- Spannungsverhältnis

d	m	- Rohrdurchmesser
d_p	m	- Partikeldurchmesser
F_B	N	- Widerstandskraft infolge Beschleunigung
F_R	N	- Widerstandskraft infolge Reibung
F_{RS}	N	- Wandreibungskraft infolge Schwerkraft
F_{RZ}	N	- Wandreibungskraft infolge Zentrifugalkraft
F_S	N	- Widerstandskraft infolge Schwerkraft
F_{St}	N	- Staukraft des Pfropfens gegen eine ruhende Strähne
F_W	N	- Strömungswiderstand
F_{WR}	N	- Wandreibungskraft des Pfropfens
g	m/s^2	- Erdbeschleunigung
l	m	- Länge
M_p	kg	- Feststoffmasse
\dot{M}	kg/s	- Gasmassenstrom
\dot{M}_p	kg	- Feststoffmassenstrom
$P_{dyn(krit)}$	Pa	- kritischer dynamischer Druck
Δp	Pa	- Gesamtdruckverlust
Δp_g	Pa	- Druckverlust der Gasströmung
Δp_p	Pa	- Zusatzdruckverlust infolge Feststoffförderung
R	m	- Krümmerradius
w	m/s	- Gasgeschwindigkeit
w_{krit}	m/s	- kritische Gasgeschwindigkeit
w_p	m/s	- Partikelgeschwindigkeit
w_{pe}	m/s	- Eintrittsgeschwindigkeit der Partikel in einen Krümmer
\bar{w}_{p1}	m/s	- Feststoffgeschwindigkeit über der Strähne
\bar{w}_{p2}	m/s	- Feststoffgeschwindigkeit in der Strähne
w_s	m/s	- Partikelsinkgeschwindigkeit
Fr	-	- Froudezahl
Fr^*	-	- Froudezahl (gebildet mit der Sinkgeschwindigkeit)
\bar{Fr}	-	- effektive Froudezahl (bezogen auf den freien Querschnitt)
Fr_{krit}	-	- kritische Froudezahl
K^*	-	- Krümmerparameter
L^*	-	- Längenparameter
R^*	-	- Wandreibungsparameter
Re_p	-	- Reynoldszahl der Partikel
S_p^*	-	- Schwerkraftparameter
w_p^*	-	- Feststoffgeschwindigkeitsverhältnis
β	-	- Schwerkraftkoeffizient
β_0	-	- Wandreibungskoeffizient der Strähne
ε	-	- Krümmerwinkel
ε	-	- Porosität
ε_p	-	- Porosität im Pfropfen

η	mPa s	- dynamische Viskosität des Gases
ψ	-	- Keilzahl
λ	-	- Druckverlustkoeffizient der Gasströmung
λ_p	-	- Druckverlustkoeffizient der Feststoffströmung
$\lambda_{p'}$	-	- Feststoffwandreibungskoeffizient
λ_p'	-	- Kraftübertragungskoeffizient
λ	-	- Feststoffbeladung
μ_1	-	- Feststoffbeladung über der Strähne
μ_2	-	- Feststoffbeladung der Strähne
μ_{1max}	-	- maximale Feststoffbeladung des Gasstromes über einer Strähne
ρ	kg/m ³	- Gasdichte
ρ_{krit}	kg/m ³	- kritische Gasdichte

DOBÓR PNEUMATYCZNYCH URZĄDZEŃ TRANSPORTOWYCH

S t r e s z c z e n i e

Treść opracowania dotyczy urządzeń transportu pneumatycznego, który autor klasyfikuje na szereg grup w zależności od parametrów medium transportującego i nosiwa. Rozpatruje warunki przepływu rurociągami prostoliniowymi i krzywoliniowymi oraz rozgałęzieniami. Zajmuje się równaniami ruchu przy przepływach: gaz - ciało stałe. Analizuje straty ciśnienia przy różnych postaciach przepływu a także omawia granice zatykania przewodu (Stopfgrenze). Porusza również zagadnienie transportu przy dużych różnicach ciśnień. Opracowanie uzupełnione jest bogatym i przejrzystym materiałem ilustracyjnym.

ПОДБОР ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ УСТРОЙСТВ

Р е з ю м е

В работе описываются устройства пневмотранспорта. Дается их классификация на группы в зависимости от параметров транспортирующей и транспортной среды. Рассматриваются условия течения простолнейными, криволинейными и разветвленными трубопроводами. Описываются уравнения при течениях: газ - твердое тело. Анализируются потери давления для разных видов потоков а также оговариваются условия закупорки трубопровода. Рассматривается также проблема транспорта при больших разницах давления. Работа иллюстрируется богатым материалом.

CHOICE OF PNEUMATING CONVEYING FACILITIES

S u m m a r y

Pneumatic conveying facilities are discussed and classified depending on parameters of material handling and handled. Flow conditions for rectilinear and curvilinear pipelines as well as branching are given. Motion equations for the flow: - solid are considered, and pressure losses in the case of different types of flow are analysed. Boundaries of the pipe stops are described. The transportation problem in the case of big pressure differences is considered.