

Pneumatische Fördersysteme und Beitrag zur Berechnung der Flugförderung

Von Georg Segler und Werner Hutt,
Stuttgart-Hohenheim*)

DK 621.867.8

Die Erforschung und Anwendung der pneumatischen Förderung hat in den vergangenen 20 Jahren große Fortschritte gemacht und zur Differenzierung verschiedener Systeme der Zweiphasenströmung geführt. Die Anwendung der einzelnen Systeme hängt sowohl von den physikalischen Parametern des Fördergutes, wie Größe, Form, Dichte, Reibungs- und elektrostatische Aufladungseigenschaften, als auch von der für die Anlage gewählten Druckstufe ab. Für die Vorausberechnung des Druckgefälles bei der pneumatischen Flugförderung hat es sich bewährt, sie als Quasi-Einphasenströmung aufzufassen. Aufgrund neuerer Untersuchungen liegen umfangreiche Unterlagen über den Einfluß der Feststoffparameter auf den Druckabfall vor. Mit Hilfe eines Ähnlichkeitsgesetzes kann der Aufwand von Modellversuchen verringert werden.

1. Fördersysteme

Die Erforschung und Anwendung des pneumatischen Fördervorganges hat in den vergangenen 20 Jahren große Fortschritte gemacht und zur Differenzierung verschiedener Systeme der Zweiphasenströmung Gas-Feststoff [30, 51, 55] geführt. Für die pneumatische Förderung stehen folgende Systeme zur Verfügung, **Tafel 1:**

Flugförderung, Strähnenförderung, Pfpfenförderung, Pfpfenförderung mit Bypass, Schubförderung, Einzelkörperförderung, Fließbettförderung, Gleitförderung, Wurförderung mit tangentialem Abwurf und Wurförderung mit radialem Abwurf.

Die allgemeine Entwicklungstendenz führt aus ökonomischen Gründen dazu, höhere Gutbeladungen bei gleichem Rohrquerschnitt und höheren Drücken anzuwenden. Dies ist vor allem dann gerechtfertigt, wenn eine zeitlich ausgedehnte Benutzung der Anlage gegeben ist. Bei geringen Zahlen von jährlichen Betriebsstunden wird der Flugförderung mit einer Niederdruckanlage allgemein der Vorzug gegeben. Das gilt beispielsweise für Anlagen in landwirtschaftlichen Betrieben, in Hafenanlagen zum Be- und Entladen von Getreideschiffen und zum Umschlag in Speicheranlagen sowie in Mühlenbetrieben.

Die Anwendung der obengenannten Fördersysteme hängt ferner von den physikalischen Eigenschaften des Fördergutes, wie Größe, Form, Dichte, Elastizität, Reibungs- und elektrostatische Aufladungseigenschaften und Empfindlichkeit gegen Beschädigung durch Bruch und Abrieb ab. Die Anwendung einiger Fördersysteme beschränkt sich auf bestimmte Stoffe, wie staubförmiges, körniges und faseriges Gut sowie auf die Förderung von Einzelkörpern in Form von Ballen, Kapseln oder kleinformatigem Stückgut.

Die Untersuchungen wurden mit finanzieller Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft durchgeführt.

*) Prof. em. Dr.-Ing. G. Segler † war Inhaber des Lehrstuhls für Landtechnik der Universität Hohenheim, Dipl.-Ing. W. Hutt ist wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Grundlagen der Landtechnik der Universität Hohenheim.

Hinsichtlich des Energiebedarfes für den Betrieb der Anlagen, wie er durch das Produkt aus Luftvolumen und Druck definiert ist, gilt allgemein, daß dieser mit kleiner werdendem Rohrdurchmesser bei geringerem Luftvolumen trotz höherem Druck abnimmt. Niederdruckanlagen benötigen aufgrund des größeren Luftvolumenstromes bei geringerem Druck mehr Energie. Die Investitionskosten sind bei Niederdruckanlagen dagegen geringer als bei Mittel- und Hochdruckanlagen, da sie neben billigeren Rohrleitungen die Anwendung der weniger kostenaufwendigen Radial- und Seitenkanalgebläse gestatten. Die Gesamtwirtschaftlichkeit einer Anlage wird von den Faktoren Investitions- und Betriebskosten in Abhängigkeit von der zeitlichen Ausnutzung bestimmt.

2. Rechnerische Auslegung der pneumatischen Flugförderanlage

Für die Berechnung einer pneumatischen Flugförderanlage für ein bestimmtes Fördergut, bei gegebenem Gutdurchsatz und Verlauf der Rohrleitung, stehen in ausreichendem Maße Grundlagen zur Verfügung, um die Druck- und Volumenleistung des Luftstromerzeugers und dessen Leistungsbedarf zu ermitteln. Das Maß der Rohrweite ist entscheidend für die Wahl einer Nieder-, Mittel- oder Hochdruckanlage, damit aber auch für den Leistungsbedarf und die Betriebskosten der Anlage. So kann eine billige Niederdruckanlage mit großem Rohrdurchmesser trotz höherem Energiebedarf bei geringer zeitlicher Ausnutzung zu niedrigeren Gesamtkosten führen als eine teurere Hochdruckanlage mit geringerem Rohrdurchmesser und niedrigerem Leistungsbedarf. Bei einer hohen Betriebsstundenzahl wird die Entscheidung meist zugunsten einer Mittel- oder Hochdruckanlage mit kleinerem Rohrdurchmesser fallen. Am Anfang jeder Berechnung steht daher die Frage nach der Wahl der kostenwirtschaftlich optimalen Rohrweite [34, 42].

2.1 Berechnung des Druckverlustes bei der Flugförderung

Bei der Berechnung des Druckverlustes hat es sich bewährt, die Zweiphasenströmung als Quasi-Einphasenströmung zu behandeln. Im Bereich, in dem die Luft als inkompressibel betrachtet werden kann, gilt dann die bekannte Beziehung

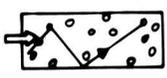
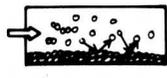
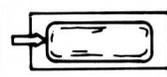
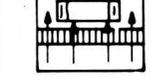
$$\Delta p = \Delta p_L + \Delta p_K \quad (1)$$

In dieser Summandengleichung werden der Druckverlust für die reine Gasströmung und der zusätzliche Verlust erfaßt, der durch die Partikel/Wand-Reibung und -Stöße, sowie durch Partikel/Partikel-Stöße entsteht. Dies gilt für den Beharrungszustand in der horizontalen Rohrleitung. In den Summanden werden die Druckverlustanteile für die reine Luftförderung durch λ_L , die zusätzlichen Verluste durch die Reibung Partikel/Rohrwand mit λ_{KR} und die Verluste durch Stoß und Reibung der Partikel untereinander durch λ_{KK} in der horizontalen Leitung berücksichtigt, so daß gilt:

$$\Delta p = (\lambda_L + \lambda_K) \frac{L}{d_R} \frac{1}{2} \rho_L v^2 \quad (2)$$

$$\lambda_K = \lambda_{KR} + \lambda_{KK} \quad (3)$$

Tafel 1. Funktion, Daten und Anwendung pneumatischer Fördersysteme.

Nr.	Funktion	System	Luftgeschwindigkeit v Gutgeschwindigkeit c Umfangsgeschwindigkeit U m/s	Beschädigung d. Fördergutes	geeignete Korngröße mm	Anwendungsbeispiele	Massenverhältnis Fördergut zu Luft
1	Flugförderung		$v = 15 \dots 35$ $c = 0,3 \dots 0,7 v$ [24, 27, 30, 36, 42, 48, 57]	gering	grob 0,5 ... 50	Körnerfrüchte, Granulat, Kunstdünger, Preßlinge, Kohle, Mehl, Heu, Stroh, Müll, Mineralien, Holzspäne [60]	0 ... 30 [11, 30, 38]
2	Strahlenförderung		$v = 2 \dots 20$ $c = 0,1 \dots 0,6 v$ [5, 22, 31, 59]	gering	fein 0,5 ... 20	kleinkörnige Stoffe, wie Granulate, Körnerfrüchte [31]	10 ... 100 [5, 22, 31]
3	Pfropfenförderung		$v = 2 \dots 6$ $c = 0,6 \dots 0,9 v$ [9, 22, 31]	sehr gering	grob 0,5 ... 10	grobkörnige Stoffe, Körnerfrüchte, Granulate, Kunstdünger [9, 60]	50 ... 100 [9, 60]
4	Pfropfenförderung mit Bypass		$v = 2 \dots 20$ $c = 0,2 \dots 0,8 v$ $D_b = 0,1 D$ [9, 22, 30]	sehr gering	fein, mehlig, pulverig 0,5 ... 2	Mehl, Schrot, Pulver, Zucker, Salz [31, 60]	100 ... 500 [22, 31]
5	Schubförderung		$v = 0,4 \dots 4$ $c < 0,8 v$ [57]	sehr gering	fein, mehlig, pulverig < 4	Mehl, Pulver, Zement [30, 57]	400 ... 800 [57]
6	Einzelkörperförderung		$v = 23 \dots 25$ $c = 0,3 \dots 0,4 v$	sehr gering	mehrere Einzelkörper	Rohrpost, Kapselbehälter für verschiedene Güter, Faserstoffballen, Stäbe [21, 60]	sehr gering
7	Fließbett	 Gefälle 0 ... 6° Steigung 0 ... 2°	v abhängig von Guteigenschaften c abhängig von Rinnenneigung und Guteigenschaften	sehr gering	sehr fein, mehlig, pulverig < 0,5	Staub, Mehl, Asche, kleinkörniger Kunstdünger, Schrot [47, 49, 60]	abhängig von Rinnenlänge [19]
8	Gleitförderung	 Gefälle 0 ... 4° Steigung 0 ... 2°	v abhängig von Gewichtskraft, Fläche c abhängig von Rinnenneigung	sehr gering	mehrere Einzelkörper	Platten, Dosen, Packungen mit ebenem Boden [37, 60]	
9	Wurfförderung mit tangen-tialem Abwurf	 Rohr vertikal ± 15° Neigung	$v < u; u = 10 \dots 30$ c abnehmend z. Rohrende hin von 1,0 ... 0,3 $h = \varphi \frac{u^2}{2g}$ $\varphi = 0,3$ [18, 42, 43]	hoch bei $u > 20$	grob, körnig, faserig, blattförmig 2 ... 50	Getreide, Naß- und Trockenhäcksel, Holzspäne [14, 40, 42, 43, 44, 46]	
10	Wurfförderung mit radialem Abwurf	 Rohr schräg	$v < u; u = 7 \dots 12$ c abnehmend z. Rohrende hin von 1,0 ... 0,2 u $h = \varphi \frac{u^2}{g}$ $\varphi = 0,03$ [18, 42, 43]	gering bei $u < 12$	grob, körnig, faserig, blattförmig 2 ... 50	Getreide, Naß- und Trockenhäcksel, Holzspäne	

Mit $\lambda_K = \mu \lambda_Z$ (4)

wird $\Delta p = (\lambda_L + \mu \lambda_Z) \frac{L}{d_R} \frac{1}{2} \rho_L v^2$ (5)

wobei $\mu = \dot{m}_K / \dot{m}_L$ (6)

das Massenverhältnis von Gut- und Luftdurchsatz und ρ_L die Dichte der Luft ist.

Zusätzliche Druckverluste durch Einzelwiderstände, wie für die Gutbeschleunigung nach der Gutaufgabe, für Krümmer und Anlagenteile zur Gutaustragung sind getrennt zu berücksichtigen. Das kann durch Einsetzen äquivalenter Rohrwiderstandslängen geschehen [3, 15, 16, 20, 23, 24, 26, 28, 29, 42, 43, 44, 50, 52, 53, 54].

2.2 Fördermedium Luft

Von den physikalischen Parametern des Fördermediums Luft, wie Temperatur, Druck, Wassergehalt und Dichte ist letztere für den Fördervorgang von wesentlicher Bedeutung. Die Dichte hängt von den übrigen Parametern ab und kann bei unterschiedlichen Höhenlagen und Betriebsverhältnissen beispielsweise im Bereich von Saug- und Druckerzeugnissen Werte von 1,0 bis 1,5 kg/m³ aufweisen.

Diese Tatsache ist nicht nur bei der Berechnung von Anlagen, sondern auch bei der Auswertung und beim Vergleichen von Meßergebnissen zu berücksichtigen. Das gilt zunächst für die Anwendung und Darstellung des Parameters Luftgeschwindigkeit, die aus Anschaulichkeitsgründen bevorzugt, aber sinnvoller durch den Geschwindigkeitsdruck

$$p_d = \frac{1}{2} \rho_L v^2 \quad (7)$$

ersetzt oder ergänzt werden sollte. Das gleiche gilt für die Schwebegeschwindigkeit, die durch den Schwebedruck

$$p_{ds} = \frac{1}{2} \rho_L v_s^2 \quad (8)$$

zu ersetzen ist.

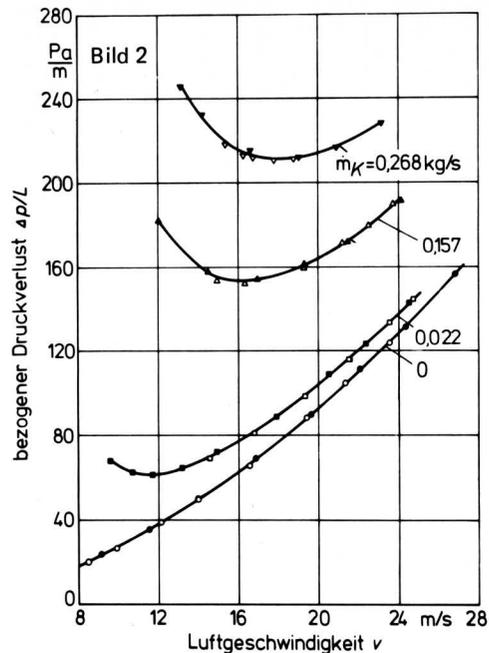
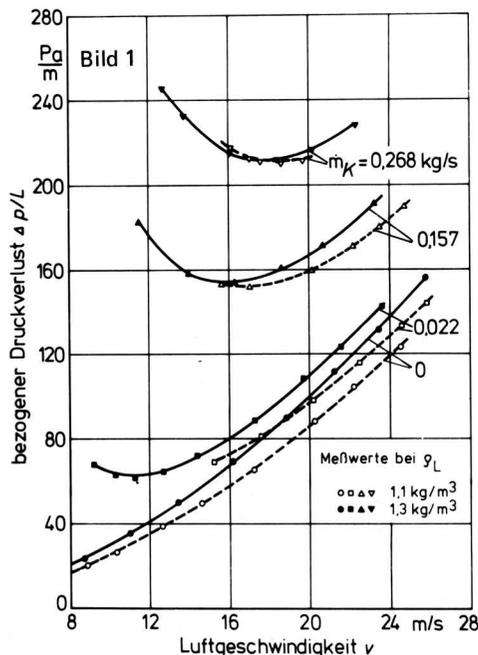


Bild 1. und 2. Auf die Rohrlänge bezogener Druckverlust in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit v bei der vertikalen Förderung von Polystyrolgranulat bei verschiedenen Luftdichten und Gutdurchsätzen im Rohr mit Durchmesser $d_R = 0,05$ m nach Flatow [10].

Bild 1: Luftgeschwindigkeiten bei wirklichen Luftdichten
Bild 2: Luftgeschwindigkeiten (Werte aus Bild 1) umgerechnet auf Bezugsluftdichte $\rho_0 = 1,2$ kg/m³.

Infolge unterschiedlicher Werte für die Luftdichte sind Angaben über die Luftgeschwindigkeit und den auf die Rohrlängeneinheit bezogenen Druckabfall $\Delta p/L$ für Vergleichszwecke ungeeignet, wenn sie nicht nach Flatow [10] auf eine normierte Bezugsdichte von beispielsweise 1,2 kg/m³ umgerechnet werden, **Bild 1 und 2**. Zu bevorzugen ist die Auftragung des dimensionslosen Widerstandsbeiwertes λ_Z nicht über der Luftgeschwindigkeit, sondern über dem Geschwindigkeitsdruck, der die auf das einzelne Korn im Rohr wirkende treibende Kraft

$$W_k = \frac{1}{2} c_w A_K \rho_L (v - c)^2 \quad (9)$$

berücksichtigt.

In der von Gasterstädt [13] eingeführten dimensionslosen Kennzahl μ für die Gutbeladung wird dem Einfluß unterschiedlicher Luftdichte ebenfalls Rechnung getragen.

Gute Vergleichsmöglichkeiten bietet die von Barth [2] vorgeschlagene dimensionslose Auftragung des Beiwertes für den zusätzlichen Druckverlust λ_Z über der mit der Luftgeschwindigkeit gebildeten Froudezahl. In **Bild 3** ist dies beispielsweise für die vertikale Förderung von Weizen in Rohren von 50, 100 und 200 mm Durchmesser gezeigt. Die Kurven für die verschiedenen Rohrdurchmesser, denen jeweils eine konstante auf die Schwebegeschwindigkeit bezogene Froudezahl Fr^* zugeordnet ist, ergeben unterschiedliche Werte. Anders ist es, wenn die von Muschelknautz [27] geforderte Ähnlichkeit von Korn- und Rohrdurchmesser eingehalten wird, wie in **Bild 4** dargestellt. In diesem Fall ergibt sich beispielsweise für Polystyrolgranulate gleicher zylindrischer Form ein durchgehender Kurvenzug bei einheitlicher über die Schwebegeschwindigkeit gebildeter Froudezahl. Eine Übertragung dieser Erkenntnis auf die horizontale Förderung erscheint ohne Nachprüfung nicht möglich, da bei dieser im Vergleich zur vertikalen Förderung die Schwebegeschwindigkeit geringeren, dafür die Wandreibung stärkeren Einfluß hat.

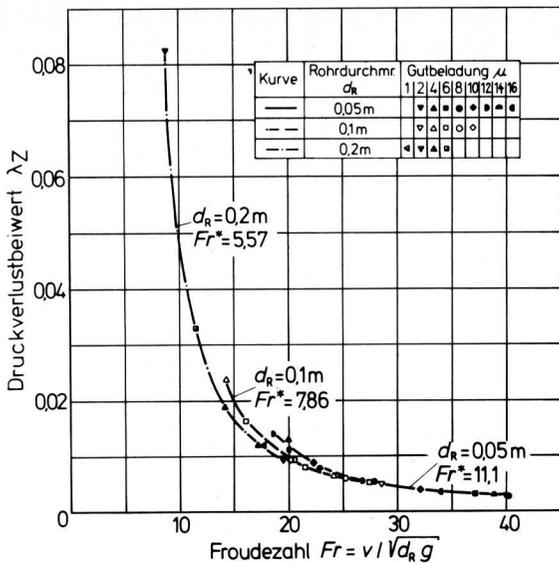


Bild 3. Druckverlustbeiwert λ_Z in Abhängigkeit von der Froude-Zahl Fr bei der vertikalen Förderung von Weizen bei verschiedenen Rohrdurchmessern und Gutbeladungen, nach Flatow [10].

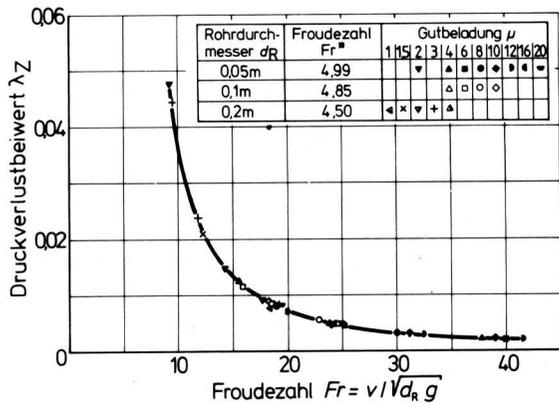


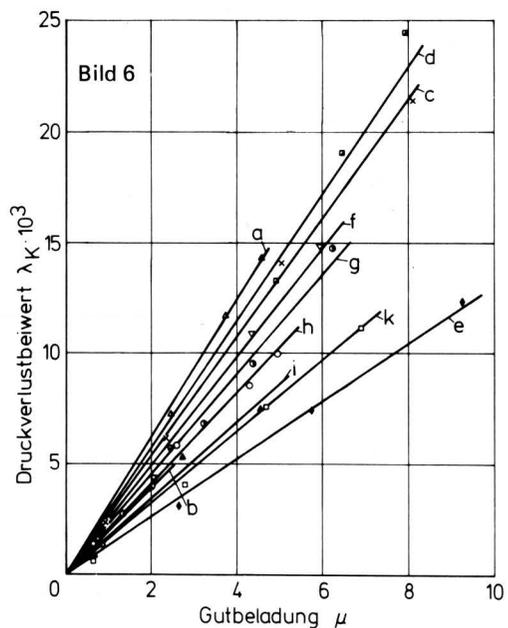
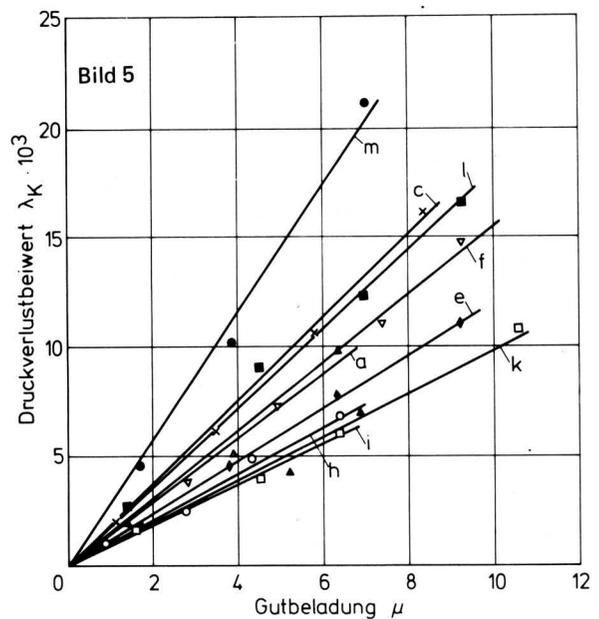
Bild 4. Druckverlustbeiwert λ_Z in Abhängigkeit von der Froude-Zahl Fr bei vertikaler Förderung von Grob-, Mittel- und Feinkornpolystyrol bei verschiedenen Rohrdurchmessern und Gutbeladungen unter Einhaltung des Ähnlichkeitsverhältnisses zwischen Korn- und Rohrdurchmesser, nach Flatow [10].

2.3 Eigenschaften des Fördergutes

Der zusätzliche Druckverlust durch die Gutbeladung wird durch die physikalischen Parameter des Fördergutes, wie Größe, Form, Dichte, Elastizität, elektrostatische Aufladung und Reibung der Partikel beeinflusst, wobei letztere bei hygroskopischen Stoffen stark vom Feuchtegehalt abhängt. So liegt beispielsweise der Gleitreibungbeiwert für die Paarung Weizen/Stahlblech abhängig vom Feuchtegrad zwischen 0,2 und 0,7. Das Ausmaß der Wandreibung hängt wiederum von der Sprungweite und der Berührungsdauer der Partikel, also von den verschiedenen möglichen Formen der Flugbewegung der Partikel ab. Der Druckverlust infolge der Stöße der Partikel untereinander wird durch die Korngrößenverteilung beeinflusst. Die Stoßfrequenz nimmt mit zunehmendem Korngrößenspektrum infolge der sich daraus ergebenden unterschiedlichen Fluggeschwindigkeiten im Rohr zu [11, 48, 57].

Verschiedene Verfasser haben versucht, diese physikalischen Parameter und ihren Einfluß auf den zusätzlichen Druckabfall rechnerisch und experimentell zu erfassen. Während dies rechnerisch für den Strömungswiderstand zwischen Fluid und Partikeln unter Anwendung der Strömungsgesetze möglich ist, ist die rechnerische und experimentelle Erfassung des durch Reibungs- und Elastizitäts-Parameter bedingten Druckabfalles außerordentlich schwierig. Beim derzeitigen Stand der Forschung muß man davon ausgehen, daß die für die Berechnung des Druckabfalles erforderlichen Widerstandsbeiwerte, soweit sie in der Literatur nicht bekannt sind, durch Modellversuche ermittelt werden müssen. Dabei wäre es eine Vereinfachung, wenn man sich bei den Modellversuchen auf einen einzigen Rohrdurchmesser beschränken und die Werte für die übrigen in Betracht kommenden Rohrdurchmesser durch Umrechnung mittels der Ähnlichkeitsgesetze rechnerisch bestimmen könnte. Nach einem Vorschlag von Flatow [10] ist dies für die vertikale Förderung bereits möglich.

Aus den Arbeiten von Siegel [48] und Flatow [10] liegen Meßwerte für den Druckabfall bei horizontaler und vertikaler Förderung vor. Die Untersuchungen wurden weitgehend mit den gleichen körnigen Stoffen verschiedener Größe, Form und Dichte durchgeführt. Die Rohrdurchmesser waren mit dem Faktor 2 abgestuft



und betragen 50, 100, 200 und 400 mm. Der dort auf die Rohrlängeneinheit bezogene Druckverlust wurde auf den Widerstandsbeiwert λ_K umgerechnet und über der Gutbeladung aufgetragen, **Bild 5 bis 8** für die horizontale und **Bild 9 bis 11** für die vertikale Förderung. Damit stehen zahlreiche Werte für die Berechnung des Druckabfalles zur Verfügung. Im Bereich der Flugförderung ergibt sich ein linearer Zusammenhang.

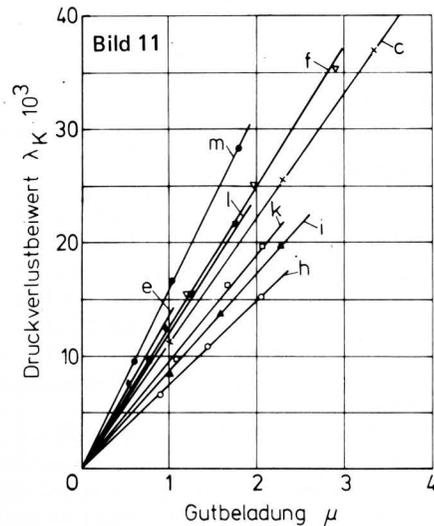
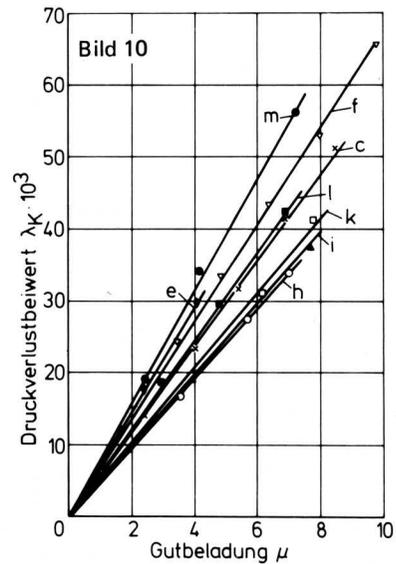
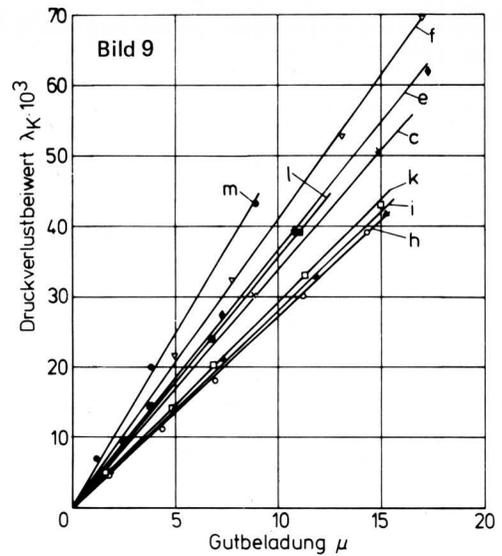
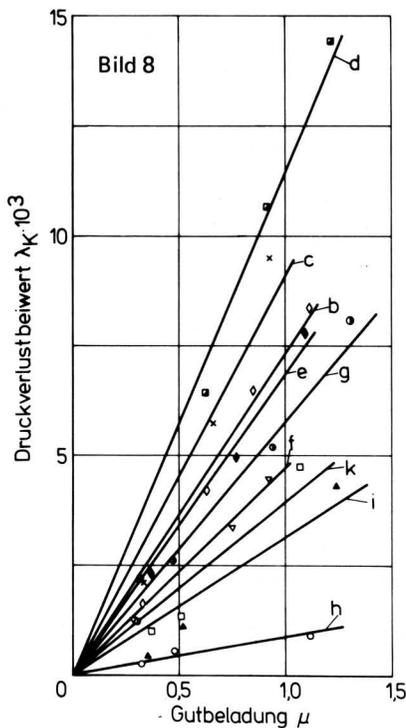
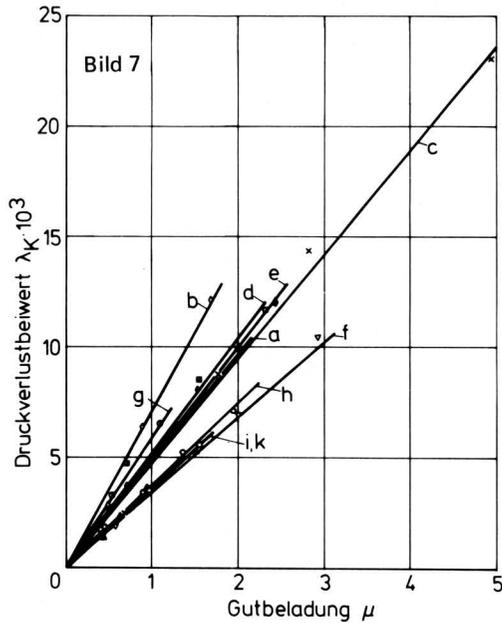


Bild 5 bis 8. Druckverlustbeiwert λ_K in Abhängigkeit von der Gutbeladung bei der Förderung verschiedener körniger Stoffe in horizontalen Röhren mit den Durchmessern $d_R = 0,05$ m (Bild 5), $d_R = 0,1$ m (Bild 6), $d_R = 0,2$ m (Bild 7) und $d_R = 0,4$ m (Bild 8).

Stoffe:

a Hornschotenklee	g Ackerbohnen
b Raps	h Polystyrolgranulat, fein
c Weizen	i " " mittel
d Wicken	k " " grob
e Bitterlupinen	l Glaskugeln
f Mais	m Stahlkugeln

Bild 9 bis 11. Druckverlustbeiwert λ_K in Abhängigkeit von der Gutbeladung bei der Förderung verschiedener körniger Stoffe in vertikalen Röhren mit den Durchmessern $d_R = 0,05$ m (Bild 9), $d_R = 0,1$ m (Bild 10), $d_R = 0,2$ m (Bild 11).

c Weizen	i Polystyrolgranulat, mittel
e Bitterlupinen	k " " grob
f Mais	l Glaskugeln
h Polystyrolgranulat, fein	m Stahlkugeln

Flatow [10] konnte ferner nachweisen, daß bei Verwendung eines Ansatzes von Papai [33]

$$\Delta p \pi d_R^2 / 4 L = \text{konst.} \quad (10)$$

für die bezogene Förderkraft und aus der Beziehung

$$\lambda_Z = \Delta p_K \pi d_R^3 / 2 L v \dot{m}_K \quad (11)$$

sich die Umrechnungsformel

$$\lambda_Z d_{R0} / d_R = \Delta p_K \pi d_R^2 d_{R0} / 2 L v \dot{m}_K \quad (12)$$

ableiten läßt, in der d_{R0} ein Bezugsdurchmesser ist. Mit Hilfe dieser Formel lassen sich für die vertikale Förderung die Druckverluste bei gleichem Fördergut auf andere Rohrdurchmesser übertragen. Auf diese Weise läßt sich die Zahl der Modellversuche zur

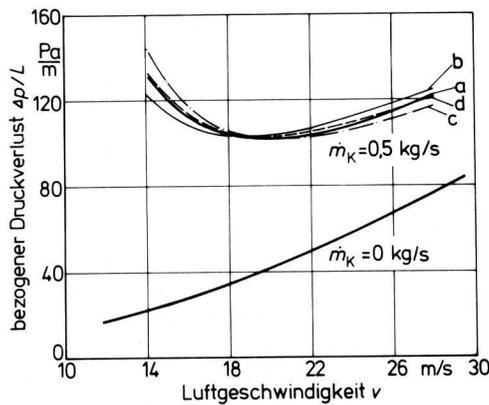


Bild 12. Vergleich zwischen gemessenen und umgerechneten bezogenen Druckverlusten $\Delta p/L$ bei vertikaler Förderung von 0,5 kg/s Weizen für einen Rohrdurchmesser von 0,1 m, nach Flatow [10]. Kurve a aus Messungen für Rohrdurchmesser $d_R = 0,1 \text{ m}$, b und c aus Messungen bei $d_R = 0,05 \text{ m}$ bzw. $d_R = 0,2 \text{ m}$ über konstante bezogene Förderkraft umgerechnet, d arithmetisches Mittel aus den Kurven b und c.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] Barth, W.: Neuere Untersuchungen über die Vorgänge bei der pneumatischen Förderung. Die Mühle Bd. 91 (1954) Nr. 36, S. 449/50.
- [2] Barth, W.: Strömungstechnische Probleme der Verfahrenstechnik. Chem.-Ing.-Techn. Bd. 26 (1954) Nr. 1, S. 29/34.
- [3] Barth, W.: Strömungsvorgänge beim Transport von Festteilchen und Flüssigkeitsteilchen in Gasen mit besonderer Berücksichtigung der Vorgänge bei pneumatischer Förderung. Chem.-Ing.-Techn. Bd. 30 (1958) Nr. 3, S. 171/80.
- [4] Barth, W.: Absetzung, Transport und Wiederaufwirbelung von staubförmigem Gut im Luftstrom. Chem.-Ing.-Techn. Bd. 35 (1963) Nr. 3, S. 209/14.
- [5] Bohnet, M.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen über das Absetzen, das Aufwirbeln und den Transport feiner Staubteilchen in pneumatischen Förderleitungen. VDI-Forschungsheft 507, Düsseldorf: VDI-Verlag 1965.
- [6] Brötz, W.: Grundlagen der Wirbelschichtverfahren. Chem.-Ing.-Techn. Bd. 24 (1952) Nr. 2, S. 60/81.
- [7] Dencker, C.H. u. W. Hege: Untersuchungen an Trichterschleusen von Heu- und Strohgebläsen. Techn. i.d. Landwirtschaft Bd. 10 (1929) S. 218/26.
- [8] Ergun, S. u. A.A. Orning: Fluid flow through randomly packed columns and fluidized beds. Industr. Engng. Chem. Bd. 41 (1949) Nr. 6, S. 1179/84.

mittlung des Druckverlustbeiwertes stark vermindern. Ein Vergleich der gemessenen mit den errechneten Werten ergibt eine gute Übereinstimmung, Bild 12. Trägt man den normierten zusätzlichen Druckverlustbeiwert für verschiedene Rohrdurchmesser über der Luftgeschwindigkeit bei Dichte $\rho_L = 1,2 \text{ kg/m}^3$ auf, dann ergibt sich ein einheitlicher Kurvenzug, Bild 13 [10].

Ein Vergleich der im Schrifttum angegebenen Druckverluste bei horizontaler und vertikaler Förderung zeigt, daß verschiedene Einflußgrößen unterschiedlich einwirken. Die Ableitung einer Umrechnungsbeziehung für die horizontale Förderung, ähnlich der für die vertikale, steht noch aus. Diese Frage ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

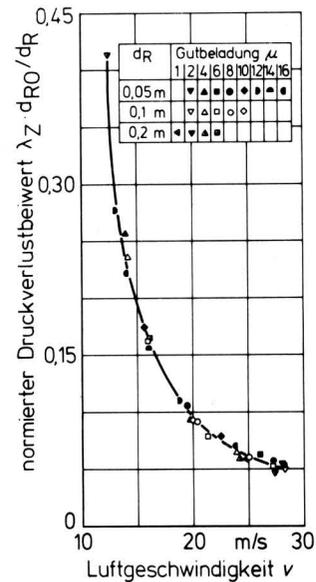


Bild 13. Normierter bezogener Druckverlustbeiwert $\lambda_Z \cdot d_{R0}/d_R$ in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit v bei vertikaler Förderung von Weizen mit verschiedenen Gutbeladungen und Rohrdurchmessern ($d_{R0} = 1 \text{ m}$; $\rho_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3$), nach Flatow [10].

- [9] Eßmann, W.: Vergleiche der pneumatischen Fördersysteme Flugförderung, Fluidlift, Fluidstat und Takt-Schubförderung. Aufbereitungs-Technik Bd. 11 (1977) Nr. 4, S. 190/92.
- [10] Flatow, J.: Untersuchungen über die pneumatische Flugförderung in lotrechten Rohrleitungen. VDI-Forschungsheft 555, Düsseldorf: VDI-Verlag 1973.
- [11] Flatow, J.: Untersuchungen zur Stopfgrenze bei der pneumatischen Flugförderung von körnigen Stoffen in waagerechten Rohren. Verfahrenstechnik Bd. 7 (1973) Nr. 5, S. 137/41.
- [12] Flatow, J. u. W. Siegel: Pneumatische Förderung von Körnern in waagerechten Rohren. Grundl. Landtechnik Bd. 19 (1969) Nr. 4, S. 125/28.
- [13] Gasterstädt, J.: Die experimentelle Untersuchung des pneumatischen Fördervorgangs. Forsch. Arb. Ing.-Wes. Nr. 265, Berlin 1924.
- [14] Gluth, W.: Untersuchungen zur Wurfgebläseförderung. VDI-Forschungsheft 544, Düsseldorf: VDI-Verlag 1971.
- [15] Günther, W.: Untersuchungen über die Druckverluste in pneumatischen Förderleitungen und Beitrag zur Berechnung der Druckverluste mit besonderer Berücksichtigung des Fördervorgangs im Beharrungszustand. Diss. TH Karlsruhe 1957.

- [16] *Hartung, K.*: Beitrag zur Berechnung des pneumatischen Fördervorganges in vertikalen Steigrohren. Diss. TH Dresden 1958.
- [17] *Hutt, W., Y. Morikawa, G. Segler u. H. Koch*: Beitrag zur Abhängigkeit des Druckverlustbeiwertes von der Gutbeladung bei der pneumatischen Flugförderung. Vortrag II. Konferenz Pneum. Förderung, Pécs, Ungarn 1978.
- [18] *Kampf, G.*: Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Wurfgebläsen. VDI-Forschungsheft 466, Düsseldorf: VDI-Verlag 1958.
- [19] *Keuncke, K.*: Fluidisierung und Fließbettförderung von Schüttgütern kleiner Teilchengröße. VDI-Forschungsheft 509, Düsseldorf: VDI-Verlag 1965.
- [20] *Kocsány, L. u. G. Vygázó*: Die Bemessung pneumatischer Transportleitungen. *Energietechnik* Bd. 6 (1956) H. 11, S. 496/500, 547/52.
- [21] *Köhling, K.*: Anwendung der Kapselförderung für den Transport mineralischer Rohstoffe. *Aufbereitungs-Technik* Bd. 18 (1977) Nr. 4, S. 178/82.
- [22] *Lippert, A.*: Die Staub-Luft-Förderung von Pulvern und Schüttgütern im Gasstrom – Ein neuer Fördervorgang. Experimentelle und theoretische Untersuchungen. Diss. TH Karlsruhe 1965.
- [23] *Molerus, O.*: Zur Beschreibung feststoffbeladener Strömungen. *Chem.-Ing.-Techn.* Bd. 49 (1977) Nr. 12, S. 945/55.
- [24] *Morikawa, Y.*: Gutgeschwindigkeit bei pneumatischer Förderung. *Technology reports of the Osaka University* Bd. 16 (1966) Nr. 715, S. 389/401.
- [25] *Morikawa, Y., T. Uematsu, K. Cho, I. Morikuni, Y. Asada u. H. Yamamoto*: Pneumatische Förderung in lotrechter Rohrleitung. *Bull. Jap. Soc. Mech. Engrs.* Bd. 8 (1965) Nr. 31, S. 367/75.
- [26] *Morikawa, Y.*: Druckabfall und Bewegung der Gutteilchen in Krümmern pneumatischer Förderleitungen bei kleiner Gutbeladung. *Grundl. Landtechnik* Bd. 16 (1966) Nr. 2, S. 65/69.
- [27] *Muschelknautz, E.*: Theoretische und experimentelle Untersuchungen über die Druckverluste pneumatischer Förderleitungen unter besonderer Berücksichtigung von Gutreibung und Gutgewicht. VDI-Forschungsheft 476, Düsseldorf: VDI-Verlag 1959.
- [28] *Muschelknautz, E., G. Giersiepen u. N. Rink*: Strömungsvorgänge bei der Zerkleinerung in Strahlmühlen. *Chem.-Ing.-Techn.* Bd. 41 (1970) Nr. 6, S. 6/15.
- [29] *Muschelknautz, E. u. N. Rink*: Neuere Untersuchungen an Strahlmühlen. *Verfahrenstechnik* Bd. 5 (1971) Nr. 6, S. 225/30.
- [30] *Muschelknautz, E. u. H. Wojahn*: Auslegung pneumatischer Förderanlagen. *Chem.-Ing.-Techn.* Bd. 46 (1974) Nr. 6, S. 223/35.
- [31] *Muschelknautz, E. u. W. Krambock*: Vereinfachte Berechnung horizontaler pneumatischer Förderleitungen bei hoher Gutbeladung mit feinkörnigen Produkten. *Chem.-Ing.-Techn.* Bd. 41 (1969) Nr. 21, S. 1164/72.
- [32] *Othmer, E.F.*: *Fluidization*. New York 1956.
- [33] *Papai, L.*: Geschwindigkeits- und Druckverhältnisse bei lotrechter pneumatischer Förderung. *Acta Techn. Hung.* Bd. 69 (1970) Nr. 1/2, S. 83/104.
- [34] *Petersen, H.*: Wahl des Rohrdurchmessers für pneumatische Flugförderanlagen im Druckbereich. *Grundl. Landtechnik* Bd. 25 (1975) Nr. 1, S. 11/15.
- [35] *Petersen, H.*: Pneumatische Förderung von Häckselgut. – Eine Schrifttumsübersicht. *Grundl. Landtechnik* Bd. 26 (1976) Nr. 3, S. 83/88.
- [36] *Piplies, L.*: Experimentelle Untersuchungen an Gas-Feststoff-Rohrströmungen. Diss. TU Berlin 1970.
- [37] *Riesenbeck, G. van*: Jetstream: ein lufttechnisches Verfahren zur Förderung und Materialbehandlung. *Chem.-Techn.* 95 (1971).
- [38] *Rizk, F.*: Pneumatische Förderung von Kunststoffgranulaten in horizontalen Rohrleitungen unter Berücksichtigung des Gewichtseinflusses in Zusammenhang mit Gut- und Rohrwerkstoffeigenschaften, insbesondere im optimalen Förderbereich. Diss. TH Karlsruhe 1973.
- [39] *Sabel, F.*: Die Winklersche Wirbelschichttechnik. *Chem.-Ing.-Techn.* Bd. 24 (1952) Nr. 2, S. 93/97.
- [40] *Schurig, M.*: Einlagerungsleistung und Leistungsbedarf beim Befüllen von Hochsilos mit Fördergebläsen. *Grundl. Landtechnik* Bd. 27 (1977) Nr. 2, S. 41/45.
- [41] *Schyttil, F.*: *Wirbelschichttechnik*, Berlin: Springer 1961.
- [42] *Segler, G.*: Untersuchungen an Körnergebläsen und Grundlagen für ihre Berechnung. Mannheim 1934.
- [43] *Segler, G.*: *Pneumatic grain conveying*. Braunschweig 1951.
- [44] *Segler, G.*: Konstruktion landwirtschaftlicher Fördergebläse. *Landtechn. Forsch.* Bd. 1 (1951) Nr. 1, S. 2/10.
- [45] *Segler, G.*: *Landtechnik*. VDI-Zeitschrift Bd. 107 (1965) Nr. 9, S. 433/42.
- [46] *Segler, G.*: Neuerungen im Bau von Heu- und Strohgebläsen. *Techn. i.d. Landw.* Bd. 12 (1931) Nr. 3, S. 215/17.
- [47] *Segler, G. u. K. Keuncke*: Untersuchungen an Fließbettderrinnen für Getreide, Sämereien und landwirtschaftliche Futtermittel. *Grundl. Landtechnik* Bd. 15 (1965) Nr. 4, S. 130/35.
- [48] *Siegel, W.*: Experimentelle Untersuchungen zur pneumatischen Förderung körniger Stoffe in waagerechten Rohren und Überprüfung der Ähnlichkeitsgesetze. VDI-Forschungsheft 538, Düsseldorf: VDI-Verlag 1970.
- [49] *Siemes, W.*: Förderung von körnigem Gut in geneigten Fließbetten. *Chem.-Ing.-Techn.* Bd. 31 (1959) Nr. 3, S. 212/13.
- [50] *Uspenski, W.A.*: Widerstand von Rohrleitungen bei der pneumatischen Förderung von Gut im schwebenden Zustand. Übersetzt aus dem russischen nach: *Za. Ekon. Topliva* Bd. 7 (1950) Nr. 12, S. 21/26.
- [51] VDI-Richtlinie 2329: Pneumatische Förderanlagen, Jan. 1972.
- [52] *Vollheim, R.*: Elementarvorgänge und Energieaufwand bei der Förderung von Festkörper-Luft-Gemischen in senkrechten Rohren. Diss. TU Dresden 1963.
- [53] *Vollheim, R.*: Die Förderung von Festkörper-Luft-Gemischen in Rohren. *Maschinenbautechnik* Bd. 14 (1965) Nr. 9, S. 455/60 u. Nr. 10, S. 525/28.
- [54] *Wagner, K.*: Theoretische Untersuchungen des pneumatischen Fördervorganges. Diss. TH Dresden 1925.
- [55] *Weber, M.*: *Strömungsfördertechnik*. Mainz: Krausskopf 1973.
- [56] *Weidner, G.*: Grundsätzliche Untersuchung über den pneumatischen Fördervorgang, insbesondere über die Verhältnisse bei Beschleunigung und Umlenkung. *Forsch. Ing.-Wesen* 21 (1955) Nr. 5, S. 145/53.
- [57] *Welschhof, G.*: Pneumatische Förderung bei großen Fördergutkonzentrationen. VDI-Forschungsheft 492, Düsseldorf: VDI-Verlag 1962.
- [58] *Zenz, F.A.*: Two-phase fluid-solid flow. *Industr. Engng. Chem.* Bd. 41 (1949) Nr. 12, S. 2801/06.
- [59] *Zipse, G.*: Die Massenstromdichteverteilung bei der pneumatischen Staubförderung und ihre Beeinflussung durch Einbauten in die Förderleitung. Diss. TH Stuttgart 1966.
- [60] *Transmatic 76 Teil II*, Pneumatische und hydraulische Förderung, Mainz 1976.