

Bild 7. Zweiteiliger Weißtorfsammler.

Länge 50 m; 7 Aufnahmegerate

(Werkbild: Hesper Torfwerk G. m. b. H., Meppen)

Für alle Stromteilventile gilt mehr oder weniger die Regel, da sie auf dem Prinzip der Druckwaage beruhen, daß sich schnell ändernde Laststöße, wie sie z. B. bei im Takt arbeitenden Arbeitsmaschinen auftreten, übersteuert werden. In diesem Fall sollte man von ihrer Verwendung absehen. Der amerikanische Hersteller versucht, das Übersteuern durch Verwendung von starken Federn bei den Regelkolben zu beheben, indem durch die Federn die Bewegung der Regelkolben träger gestaltet wird. Diese Lösung geht aber auf Kosten der Teilgenauigkeit.

Abschließend sei noch die Arbeitsweise einer Maschine mit hydraulisch betriebenen Raupenfahrgeräten geschildert, bei der es besonders auf den Gleichlauf wie auch auf die leichte Lenkbarkeit ankommt. Ein aus zwei selbständigen Teilen bestehender Weißtorfsammler, **Bild 7**, von insgesamt 50 m Breite, welcher zwei Fahrgerüste mit 6,6 m auseinanderliegenden Raupen besitzt und dessen einer Teil die vom Feld aufgesammelten Weißtorfsoden mit Förderbändern in den anderen Teil übergibt, muß so im Gleichlauf fahren, daß durch gleiche Geschwindigkeit

und Parallelität der beiden Teile die Übergabe des Torfs von einem Förderband zum anderen und am Ende die Abgabe vom Förderband in parallel verlaufende Haufen oder in Loren gewährleistet ist.

Die unter a) bis c) und zusätzlich d) aufgeführten Methoden finden bei den obengeschilderten Sammlerkonstruktionen Verwendung. Welche Methode bei der Ausführung gewählt wird, hängt von den jeweiligen Erfordernissen ab. Im Fall eines größeren Verstellbereichs und evtl. auftretender Verschmutzungsmöglichkeit innerhalb des Hydrauliksystems — z. B. durch lösbare Leitungskupplungen — sollte man trotz des besseren Wirkungsgrades und geringeren Kraftbedarfs keine verstellbare Kolbenpumpe verwenden. In den Fällen, wo keine ausreichende Kraftreserve vom Antriebsmotor her vorhanden oder eine starke Erwärmung des Öles zu vermeiden ist, sollte man auf das Stromteilventil verzichten, obgleich diese Anwendung äußerst preisgünstig ist.

DK 621.867.8

Grundlagen zur Fluidisierung und Fließbettförderung von Schüttgütern kleiner Teilchengröße¹⁾

Von **Klaus Keuneke**, Ludwigshafen

Professor Dr.-Ing. Georg Segler zum 60. Geburtstag

Zum Bestimmen der optimalen Abmessungen von Anlagen zur Fluidisierung und zur Fließbettförderung wurden die Zusammenhänge zwischen der Luftgeschwindigkeit, dem Druckverlust, der Schichthöhenzunahme, der Viskosität und den Widerstandsbeiwerten während des Fließens für verschiedene Schüttgüter und unterschiedliche Rinnenabmessungen untersucht. Angeführte Gleichungen gestatten die Berechnung der Geschwindigkeit am Wirbelpunkt, der Schichthöhenzunahme und der Viskosität. Ferner wurden im Zusammenhang mit der Fließbettförderung die Gesetze der laminaren Strömung in geraden, rechteckigen Kanälen unter Verwendung von Widerstands- und Formbeiwerten aufgestellt.

Die Verfahren der Fluidisierung und Fließbettförderung haben — oft in Verbindung mit chemischen Reaktionen — für die Mischung und die Förderung feinkörnigen Schüttguts

große Bedeutung gewonnen. Das ihnen gemeinsame Prinzip besteht darin, daß schüttfähiges Gut kleiner Teilchengröße durch einen Gasstrom aufgelockert und fließfähig gemacht wird [2]. In einem Behälter oder einer Förderrinne wird aus einem getrennten Luftraum von unten her durch einen gasdurchlässigen Boden Druckluft zugeführt. Die Luftkräfte vermindern die auf das Fördergut wirkende Schwerkraft, so daß es fließfähig wird.

Bei der Durchströmung von Schüttgütern mit Gasen können je nach Richtung und Geschwindigkeit des strömenden Mittels sowie der Bewegungsrichtung der festen Teilchen verschiedene Phasen entstehen [3]. **Bild 1** gibt eine Übersicht über die erreichbaren Zustände fester Teilchen in einem Gas. Die Zusammenstellung nach **Bild 2** zeigt die verschiedenen Übergangsbereiche zwischen der Ruheschüttung und der Gutwolke, dem Zustand der pneumatischen Flugförderung. Zwischen Ausdehnungspunkt und dem oberen Austragspunkt als Grenzen eines Schwebebereichs besteht für jede Strömungsgeschwindigkeit bei einem bestimmten mittleren Abstand der Teilchen voneinander ein Gleichgewichtszustand. Ausgehend von der Schüttschicht nimmt die Schichthöhe nach Erreichen des Ausdehnungspunktes mit steigendem Volumenstrom des Gases allmählich zu. Der Aus-

¹⁾ Auszug aus der gleichnamigen Dissertation TH Stuttgart 1965 [1]. Vortragen auf der Gemeinschaftstagung Nutzstäube in Basel 1966.

Dr.-Ing. Klaus Keuneke war wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landtechnik Stuttgart-Hohenheim (Direktor: Prof. Dr.-Ing. G. Segler) und ist jetzt in der Versuchsabteilung der Badischen Anilin- & Soda-Fabriken, Ludwigshafen, tätig.

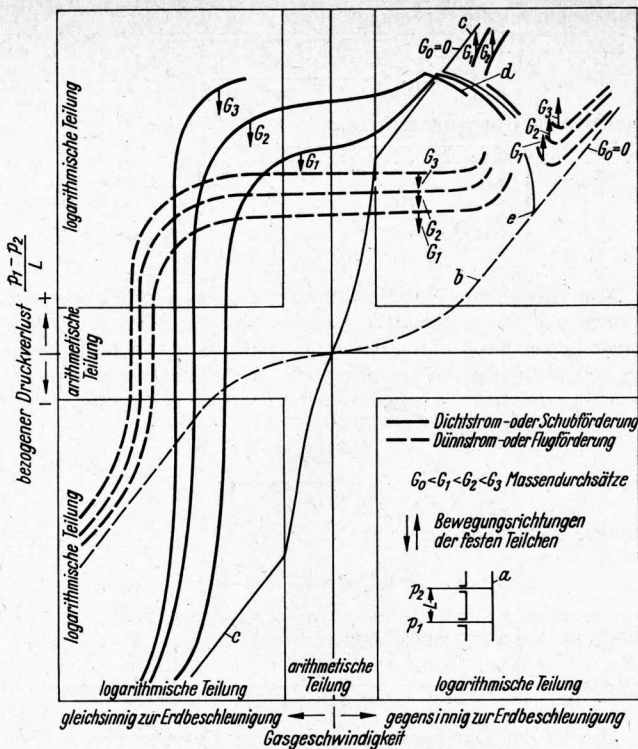


Bild 1. Bezogener Druckverlust in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bei der Durchströmung von Schüttgütern mit Gasen nach Zenz [3].

dehnungspunkt mit dem relativen Zwischenraumvolumen ϵ_0 stellt sich bei einer Auftragung des Druckverlusts über der Gasgeschwindigkeit als Knickpunkt in der Kurve des Druckverlusts dar, **Bild 3.** Mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit in Verbindung mit weiterer Schichthöhenzunahme wird die Schicht bei ϵ_{WP} aufgewirbelt und bei ϵ_F fließfähig. Bei langsamer Verminderung der Geschwindigkeit entsteht anstelle der ursprünglichen Ruheschüttung mit ϵ_0 eine ausgerichtete Ruheschicht lockerster Teilchenanordnung mit ϵ_{WP} . Von Einfluß auf den Gleichförmigkeitsgrad der Fluidisierung sind dabei das Verhältnis von Staudruck des strömenden Gases zum Schwerdruck eines Teilchens, ferner Zwischenkräfte und die kinetische Energie der mitgerissenen Teilchen. Störungen wie Kanalbildung, Agglomeration sowie das Hochschleudern von Teilchen beeinträchtigen eine gleichmäßige Fluidisierung. Als Gaseinlaßvorrichtungen zur Entgegenwirkung von Kanalbildung und Agglomeration eignen sich poröse Platten oder Gewebe verschiedener Feinheit, die im Vergleich zu Lochplatten oder Sieben eine viel feinere und gleichmäßigere Luftverteilung gewährleisten.

Der beim Durchströmen von Schüttungen auftretende Druckverlust Δp ist häufig untersucht worden. Als charakteristische Größen des durchströmten Schüttguts gelten dabei das relative Zwischenraumvolumen ϵ_0 , ein mittlerer Teilchendurchmesser d_r aus dem Verhältnis des Volumens zur Oberfläche der als kugelförmig angesehenen Teilchen und die Höhe der ruhenden Schicht L_0 . Mit der dynamischen Viskosität η , der Dichte ρ und der auf den freigedachten Querschnitt bezogenen Geschwindigkeit v des strömenden Mediums leiteten Ergun und Orning [4] eine Druckverlustgleichung her, die durch umfassende Versuche Bestätigung bis zu Reynoldszahlen

$$Re' = \frac{v d_r \rho}{\eta} \approx 1000$$

gefunden hat. Der sich aus einem laminaren und einem turbulenten Anteil zusammensetzende Gesamtdruckverlust folgt aus einer Zweisummandengleichung, deren Aufbau bei Verwendung eines hydraulischen Zwischenraumdurchmessers bekannten theoretischen Ansätzen für die Berechnung laminarer und turbulenter Strömungsverluste in runden Rohren entspricht

$$\frac{\Delta p}{L_0} = k_1 \frac{\eta}{d_r^2} v \frac{(1 - \epsilon_0)^2}{\epsilon_0^3} + k_t \frac{1}{d_r} \frac{\rho v^2}{2} \frac{1 - \epsilon_0}{\epsilon_0^3}$$

Aus einer Zusammenstellung vieler Versuchsbefunde ergab sich für die Laminar- und Turbulenzkonstante $k_1 = 150$ und $k_t = 3,5$. Dividiert man die Zweisummandengleichung durch die Faktoren der Turbulenzkonstante, so ergibt sich ein turbulenter Widerstandsbeiwert

$$\lambda'_t = \frac{300 (1 - \epsilon_0)}{Re'} + 3,5$$

als Verhältnis des Gesamtdruckverlusts zu einem turbulenten Anteil. Für die Berechnung von Δp gilt dann

$$\Delta p = \lambda'_t \frac{L_0}{d_r} \frac{\rho v^2}{2} \frac{1 - \epsilon_0}{\epsilon_0^3}$$

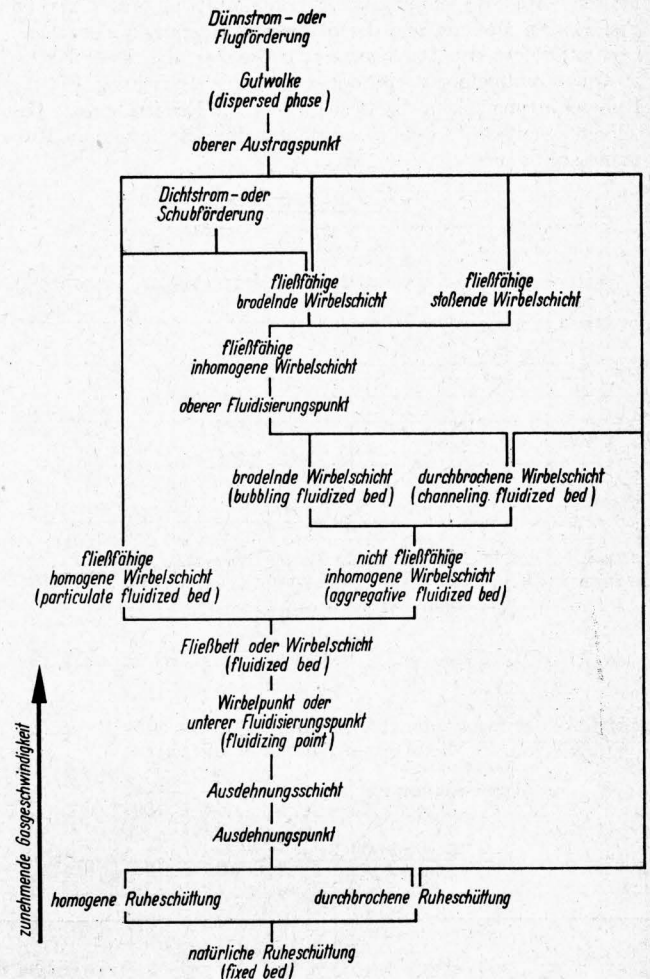


Bild 2. Zustandsformen zwischen Ruheschüttung und Flugförderung bei der Durchströmung von Schüttgütern mit Gasen.

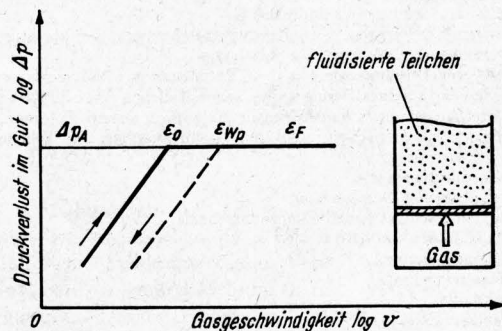


Bild 3. Druckverlust im Gut in Abhängigkeit von der Gasgeschwindigkeit bei idealer Fluidisierung.

Die Abhängigkeit λ'_t von der Reynoldszahl $Re'/(1 - \epsilon_0)$ zeigt **Bild 4.** Messungen an Thomasphosphat, Zement, Gips, Kalisalz, Legemehl, Leinkuchenmehl, Weizenschrot und Weizen haben die Gültigkeit der Zweisummandengleichung bestätigt. Neben dem

Durchmesser d_r werden als Kennwerte dieser Schüttgüter auch der Durchmesser d_m als arithmetisch gewogener mittlerer Durchmesser der als kugelförmig angesehenen Teilchen verwendet sowie die Rohdichte ρ_2 , deren Ermittlung nach dem Flüssigkeitspyknometerverfahren erfolgen soll. Das relative Zwischenraumvolumen bestimmt sich aus der Masse und der Rohdichte der in einen Fluidisierungsbehälter von bekanntem Querschnitt bis zu einer bestimmten Schichthöhe eingebrachten Teilchen. **Bild 5** zeigt für verschiedene Güter Werte des relativen Zwischenraumvolumens am Wirbelpunkt ε_{WP} nach *Leva* [5] und nach neuen Messungen. Ferner lassen sich in Abhängigkeit von v der Druckverlust Δp und nach Überschreiten der Geschwindigkeit am Ausdehnungspunkt auch die Schichthöhenzunahme ΔL messen. Am Ausdehnungspunkt sind Auftrieb des Guts im gasförmigen Medium und der Strömungswiderstand gleich dem Gesamtgewicht der Teilchen. Durch Gleichsetzen dieser Kräfte je Querschnittseinheit mit der Druckverlustgleichung für die Ruheschüttung folgen die Beziehungen zur Ermittlung der Geschwindigkeit am Ausdehnungspunkt. Für die laminare Strömung ergibt sich

$$v_A = \frac{d_r^2 g (\rho_2 - \rho)}{k_1 \eta} \frac{\varepsilon_0^3}{1 - \varepsilon_0}$$

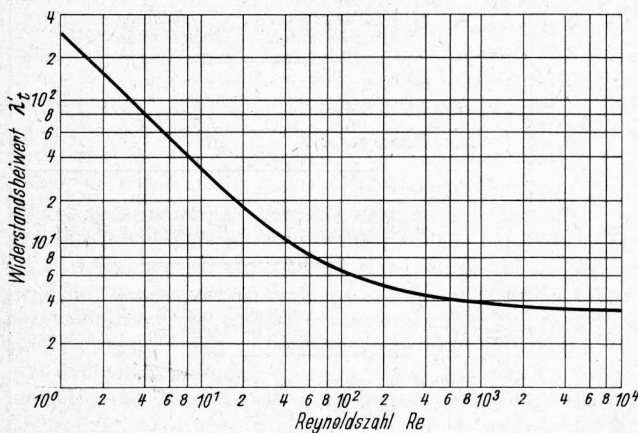


Bild 4. Widerstandsbeiwert in Abhängigkeit von einer Reynoldszahl für die Strömung durch Schüttungen.

$$\text{Widerstandsbeiwert } \lambda'_t = \frac{\Delta p}{L_0} \frac{d_r}{v^2 \rho} \frac{\varepsilon_0^3}{1 - \varepsilon_0}$$

$$\text{Reynoldszahl } Re = \frac{v d_r \rho}{\eta (1 - \varepsilon_0)}$$

für die turbulente Strömung

$$v_A = \sqrt{\frac{d_r}{k_t} \frac{2 g (\rho_2 - \rho)}{\rho} \varepsilon_0^3}$$

und für die Übergangsströmung

$$v_A = \sqrt{\left[\frac{k_1}{k_t} \frac{\eta (1 - \varepsilon_0)}{\rho d_r} \right]^2 + \frac{d_r}{k_t} \frac{2 g (\rho_2 - \rho)}{\rho} \varepsilon_0^3} - \frac{k_1}{k_t} \frac{\eta (1 - \varepsilon_0)}{\rho d_r}$$

Zum Bestimmen der Geschwindigkeit v_{WP} am Wirbelpunkt lassen sich die angeführten Gleichungen ebenfalls verwenden, wenn v_A durch v_{WP} und ε_0 durch ε_{WP} ersetzt wird. Nach Erreichen des Ausdehnungspunktes nimmt bei erhöhter Gasgeschwindigkeit das relative Zwischenraumvolumen zu. Bei idealem Verhalten gilt für Laminarströmung

$$\frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon} = \frac{k_1 \eta}{d_r^2 g (\rho_2 - \rho)} v,$$

für die turbulente Strömung

$$\varepsilon^3 = \frac{k_t}{d_r} \frac{\rho}{2 g (\rho_2 - \rho)} v^2$$

und für die Übergangsströmung

$$\varepsilon^3 + \varepsilon \frac{k_1 \eta}{d_r^2 g (\rho_2 - \rho)} v = \frac{k_1 \eta}{d_r^2 g (\rho_2 - \rho)} v + \frac{k_t}{d_r} \frac{\rho}{2 g (\rho_2 - \rho)} v^2.$$

Da bei der Durchströmung einer nicht-idealen Schicht bei gleicher Geschwindigkeit zwar der Druckverlust genau so groß wie bei idealer Fluidisierung jedoch die Schichthöhenzunahme geringer ist, muß als Berechnungsgrundlage besonders die Abhängigkeit der Zwischenraumvolumenfunktion $\varepsilon^3/(1 - \varepsilon)$ von der Gasgeschwindigkeit v bekannt sein. Bei Auftragung dieser Veränderlichen in der Ausdehnungsformel für die Laminarströmung im doppeltlogarithmischen Maßstab ergibt sich bei idealer Ausdehnung eine Gerade mit der Neigung $m' = 1$. Bei Teilchenbewegung und Kanalbildung wird $m' < 1$, während bei Vorliegen von Agglomeration die Neigung im Bereich $1 < m' < \infty$ liegen kann. Die in **Bild 6** angegebenen m' -Werte für die Neigung der Zwischenraumvolumenfunktion sind für laminare Strömung ($Re' < 1$) und für Güter mit überwiegend kugelnähnlichen Teilchen gültig. Die von *Leva* angegebenen Werte gelten für Güter enger Klassierung mit einem mittleren Durchmesser d_v als Durchmesser eines Teilchens, dessen Volumen multipliziert mit der Teilchenzahl das Gesamtvolumen der Teilchen einer Schüttung ergibt. Durch Gleichsetzen der Masse, gebildet aus der

Verwendete Formelzeichen

a	inneres Seitenhalbmaß bei einem rechteckigen Rohr	Re	mit einem Rohrdurchmesser gebildete Reynoldszahl
a^*	Gleitmaß	Re'	mit einem Teilchendurchmesser gebildete Reynoldszahl
b	inneres Seitenhalbmaß bei einem rechteckigen Rohr	U	innerer Rohrumfang, Schichtumfang
b_R	Rinnenbreite	v	Gasgeschwindigkeit durch eine Schicht, bezogen auf den freigelegten Querschnitt
c_m	mittlere Schichtgeschwindigkeit	v_A	Gasgeschwindigkeit durch eine Schicht am Ausdehnungspunkt, bezogen auf den freigelegten Querschnitt
d_m	arithmetisch gewogener mittlerer Durchmesser der als kugelförmig angesehenen Teilchen einer Schüttung	v_{WP}	Gasgeschwindigkeit durch eine Schicht am Wirbelpunkt, bezogen auf den freigelegten Querschnitt
d_r	mittlerer Durchmesser aus dem Verhältnis des Volumens zur Oberfläche der als kugelförmig angesehenen Teilchen einer Schüttung	V	Volumendurchsatz eines Gases oder einer Flüssigkeit
d_v	Durchmesser eines kugelförmigen Teilchens, dessen Volumen, multipliziert mit der Teilchenzahl, das Gesamtvolumen der Teilchen einer Schüttung ergibt	w	mittlere Geschwindigkeit eines Strömungsmittels in Rohren
D	Rohrdurchmesser	α	Rinnenneigungswinkel
D_h	hydraulischer Durchmesser	ε_0	relatives Zwischenraumvolumen einer Ruheschüttung
F	Rohrquerschnitt bzw. Schichtquerschnitt	ε_F	relatives Zwischenraumvolumen am oberen Fluidisierungspunkt
Fr	Froudezahl	ε_{WP}	relatives Zwischenraumvolumen am Wirbelpunkt
g	Fallbeschleunigung	η	dynamische Viskosität von Gasen
G	Massendurchsatz	η_A	dynamische Viskosität durch die Austauschbewegung fluidisierter Teilchen
h	Ortshöhe	η_F	dynamische Viskosität einer fließenden Schicht
k	Laminarkonstante	η_W	dynamische Viskosität einer Wirbelschicht
k_t	Turbulenzkonstante	φ_t	Formbeiwert
$K_\eta, K'\eta$	Konstanten zum Berechnen der dynamischen Viskosität	λ	Widerstandsbeiwert für die Strömung in Rohren
l_R	Rinnenlänge	λ_F	Widerstandsbeiwert für die Fließbettförderung
ΔL	Schichthöhenzunahme	λ_g	Widerstandsbeiwert für eine Strömung mit Gleiten des Strömungsmittels an der Wand
L_0	Höhe der ruhenden Schicht	λ'_t	Widerstandsbeiwert als Verhältnis des Gesamtverlustes zu einem turbulenten Anteil für die Durchströmung von Schüttgütern
L_m	mittlere Höhe der fließenden Schicht	ρ	Dichte von Gasen
m'	Geschwindigkeitsexponent	ρ_F	Dichte einer fließenden Schicht
p	statischer Druck	ρ_2	Rohdichte fester Stoffe
Δp	Druckverlust in einer durchströmten Schicht		
Δp_A	Druckverlust am Ausdehnungspunkt		

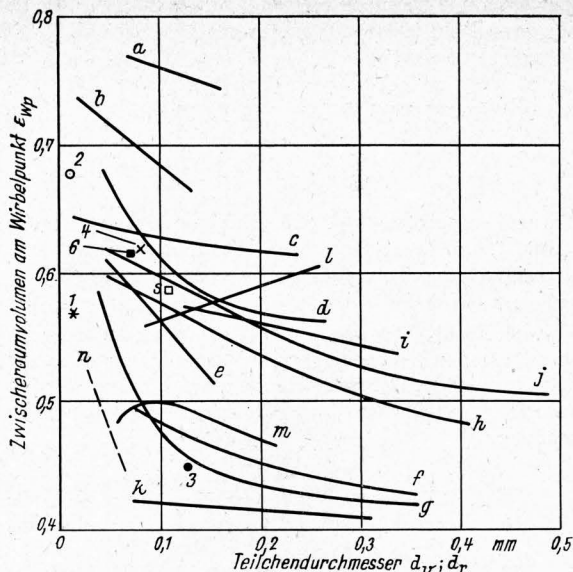


Bild 5. Relatives Zwischenraumvolumen am Wirbelpunkt in Abhängigkeit vom Teilchendurchmesser (d_v bei a bis m; d_r bei n, 1 bis 6).

- a weiche Ziegelteilchen,
- b Filterkohle,
- c gebrochene Raschigringe,
- d Kohle- und Glaspulver
- e Karborund I,
- f Sand,
- g runder Sand (Formfaktor als Verhältnis der Kugeloberfläche zur wahren Teilchenoberfläche $\varphi = 0,86$),
- h scharfkantiger Sand ($\varphi = 0,67$),
- i Fischer-Tropsch-Katalysator ($\varphi = 0,58$),
- j Anthrazit ($\varphi = 0,63$),
- k Mischung aus rundem Sand ($\varphi = 0,68$),
- l Koks,
- m Karborund II,
- n Thomasphosphat,
- 1 Zement, 2 Gips, 3 Kalisalz, 4 Legemehl, 5 Leinkuchenmehl, 6 Weizenschrot

Rohdichte und dem mit Feststoff erfüllten Raum des Fluidisierungs-Behälters, vor und während der Fluidisierung folgt die Abhängigkeit der relativen Schichthöhenzunahme vom relativen Zwischenraumvolumen

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{WP}}{1 - \varepsilon}$$

Aus der Beziehung für die Geschwindigkeit am Wirbelpunkt läßt sich bei Einführung des Geschwindigkeitsexponenten m' zur Berücksichtigung von Teilchenbewegung und Kanalbildung die Zwischenraumvolumenfunktion und daraus die relative Schichthöhenzunahme in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit berechnen

$$\frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon} = \frac{k_1 \eta}{d_r^2 g (\rho_2 - \rho)} v_{WP} \left(\frac{v}{v_{WP}} \right)^{m'}$$

Bei Reynoldszahlen im Übergangsgebiet hängt das Zwischenraumvolumen von v und v^2 ab. Bei reiner Turbulenz verschwindet das lineare Geschwindigkeitsglied.

Mit Hilfe der Gleichungen für die Geschwindigkeit am Wirbelpunkt und für die Schwebegeschwindigkeit eines Einzelteilchens können bei Auftragung der Froudezahl $Fr' = v^2/d_r g$ in Abhängigkeit von der Reynoldszahl $Re' = v d_r \rho/\eta$ Wirbelschichtzustandsdiagramme [6] aufgestellt werden. Es lassen sich die Fluidisierungs- und die Schwebelinie sowie Linien gleicher Teilchendurchmesser, gleicher Gasgeschwindigkeit und gleicher Zunahme der Zwischenraumvolumenfunktion angeben. **Bild 7** zeigt das Wirbelschichtzustandsdiagramm für Thomasphosphat. Unterhalb der Fluidisierungslinie liegt das Gebiet einer durchströmten Schüttung. Oberhalb der Schwebelinie findet eine Austragung der Teilchen mit kleinerem Durchmesser als d_r statt.

Von großem Einfluß auf den Fließvorgang ist die Viskosität [7] des fluidisierten Guts. In einer grundlegenden Untersuchung fand *Trawinski* [8] den theoretischen Zusammenhang zwischen

der dynamischen Viskosität und den übrigen Einflußgrößen einer Wirbelschicht. Bei Übertragung der molekular-kinetischen Löchertheorie nach *Schäfer* [9] auf Wirbelschichten ergibt sich ein durch die Austauschbewegung der Teilchen bewirkter Viskositätsanteil η_A . Faßt man die dynamische Viskosität von Wirbelschichten als Summe der Viskosität η des strömenden Mediums und des Anteils η_A auf, so folgt

$$\eta_W = \eta + K'_\eta (1 - \varepsilon_{WP}) \rho_2 d_r v_{WP} \frac{v/v_{WP}}{\Delta L/L_0}$$

mit K'_η als einer Viskositätskonstanten. Vergleichende Viskositätsbestimmungen mit einem Rotationsviskosimeter und nach

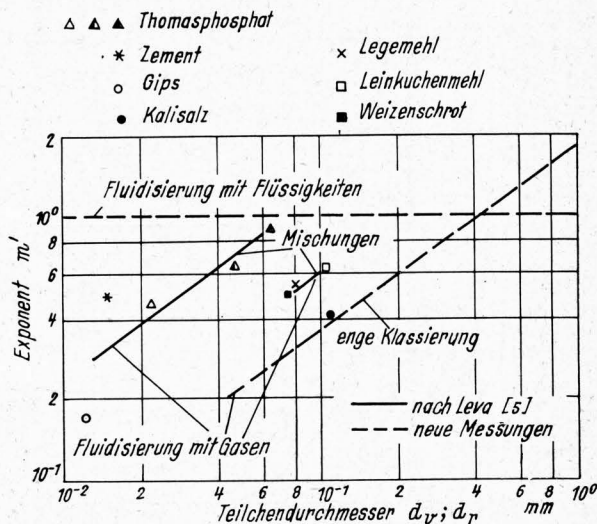


Bild 6. Geschwindigkeitsexponent m' des strömenden Mediums bei Fluidisierung mit Flüssigkeiten und Gasen in Abhängigkeit vom Teilchendurchmesser.

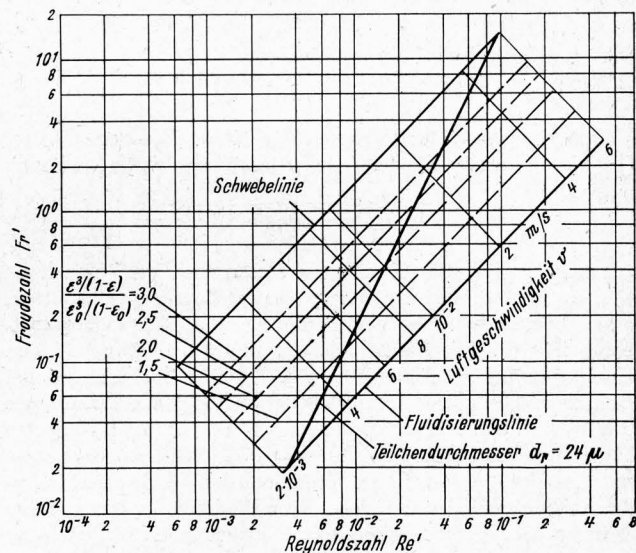


Bild 7. Wirbelschicht-Zustandsdiagramm für Thomasphosphat.

der Kugelfallmethode an Teilchenmischungen, die mit Luft fluidisiert wurden, ergaben die in **Bild 8** angegebenen Werte. Zur formelmäßigen Erfassung dieser Versuchskurven ist die von *Trawinski* angegebene Beziehung in ihrer ursprünglichen Form nicht geeignet. Die einer gasdurchströmten Wirbelschicht zugeführte Energie wird hauptsächlich zum Aufrechterhalten des Schwebezustands und durch Reibung infolge der intensiven Teilchenbewegung verbraucht. Die Reibungskräfte nehmen bei abnehmender Teilchengröße erheblich zu. Berücksichtigt man Teilchenreibung und Kanalbildung mit Hilfe des Geschwindigkeitsexponenten m' und bei Teilchenmischungen die unterschiedliche Teilchenmasse sowie die Viskositätsabhängigkeit von der Schichthöhenzunahme mit einem Exponenten s , so läßt sich

eine Beziehung zur angenäherten Berechnung der Viskosität gasdurchströmter Schüttungen angeben

$$\eta_w = \eta + K_\eta \frac{1 - \varepsilon_{WP}}{\varepsilon_{WP}} \frac{v_{WP}}{d_r^2} \frac{(v/v_{WP})^{m'}}{(\Delta L/L_0)^s}$$

Als dynamische Viskositätskonstante wurde ein Mittelwert von $K_\eta = 3,75 \cdot 10^{-10}$ kp s²/m bestimmt.

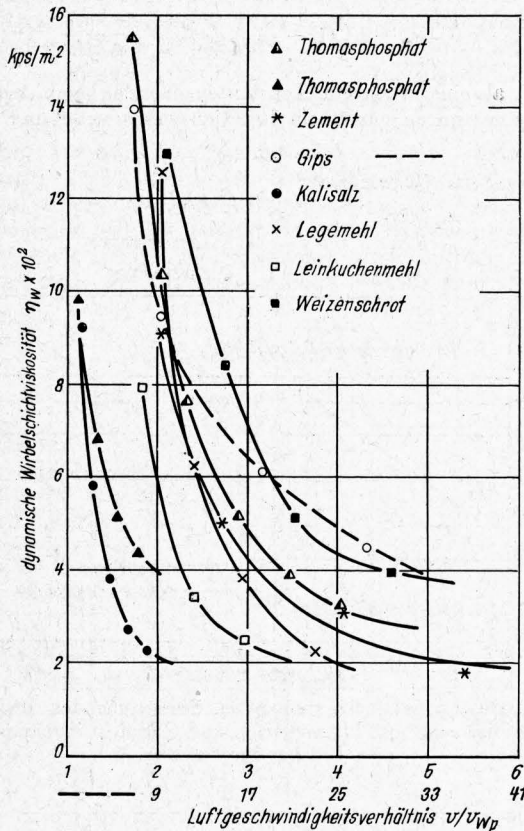


Bild 8. Dynamische Wirbelschichtviskosität in Abhängigkeit vom Luftgeschwindigkeitsverhältnis.

Zum Berechnen der Fließgeschwindigkeit fluidisierter Güter [10] wird die aus der Bernoullischen Gleichung folgende Beziehung

$$g(h_1 - h_2) + \frac{p_1 - p_2}{\rho} = \lambda l \frac{U}{4F} \frac{w^2}{2}$$

zugrunde gelegt. Darin bedeuten h_1, h_2 die Ortshöhen sowie p_1, p_2 die statischen Drücke an verschiedenen Querschnitten, ρ die Dichte des strömenden Mediums, λ den Rohrwiderstandsbeiwert, w die Fließgeschwindigkeit und l die Länge, U den Umfang und F den Querschnitt des Rohres. Bezieht man bei Rohren mit beliebiger Querschnittsform die Reynoldszahl auf den hydraulischen Durchmesser, so ergibt sich bei turbulenter Strömung Übereinstimmung im Verlauf des Widerstandsgesetzes mit dem des Kreisrohres. Bei Laminarströmung dagegen beeinflussen die Reibungsvorgänge an einer Wand die an den anderen Wänden. Der Widerstandsbeiwert läßt sich nach der Beziehung $\lambda = 64 \varphi_r / Re$ mit φ_r als einem von F und U abhängigen Formbeiwert ermitteln. Die Herleitung des Gesetzes für die Geschwindigkeitsverteilung in geraden Rohren mit Rechteckquerschnitt erfolgt unter Annahme völlig ausgebildeter Laminarströmung mit Hilfe der Navier-Stokesschen Gleichung [11]. Während bei gefüllten Rohren die Flüssigkeit an allen Seiten von festen Wänden umgeben ist, liegt bei offenen Gerinnen eine freie Oberfläche als Trennungsfäche zwischen der strömenden Flüssigkeit und der Luft vor. Bei turbulenter Strömung in einem offenen rechteckigen Gerinne tritt die maximale Geschwindigkeit nicht in der freien Oberfläche, sondern in etwa einem Fünftel der Tiefe auf. Der Strömungswiderstand kann unter Verwendung des hydraulischen Durchmessers wie bei vollständig gefüllten Rohren berechnet werden. Bei Laminarströmung ändert sich die Geschwindigkeit an der freien Oberfläche in vertikaler Richtung kaum [12], so daß maximale Werte vorliegen.

Bei Annahme gleicher Geschwindigkeitsverteilung wie im geschlossenen Rohr gleichen Querschnitts ergibt sich als Volumendurchsatz

$$V = - \frac{2}{3} \frac{dp}{\eta dl} a b^3 \left\{ 1 - \frac{192}{\pi^5} \frac{b}{a} \left[\mathfrak{Eg} \left(\frac{\pi a}{2b} \right) + \frac{1}{3^5} \mathfrak{Eg} \left(\frac{3\pi a}{2b} \right) + \dots \right] \right\}$$

mit a und b als großer bzw. kleiner Halbseite des Rechteckquerschnitts. Damit lassen sich die Widerstandsbeiwerte λ und die Abhängigkeit des Formbeiwerts φ_r vom Seitenverhältnis b/a , **Bild 9**, ermitteln.

Da die Fließbettförderung praktisch raumbeständig in geneigten, geraden rechteckigen Kanälen mit konstantem Querschnitt nur infolge der potentiellen Energie des zu fördernden Guts erfolgt, gilt für die mittlere Fließgeschwindigkeit folgende Beziehung

$$c_m = \sqrt{\tan \alpha \frac{2g}{\lambda_F} \frac{4F}{U}}$$

mit $\tan \alpha \approx \frac{h_1 - h_2}{l_R}$ und l_R als der Rinnenlänge.

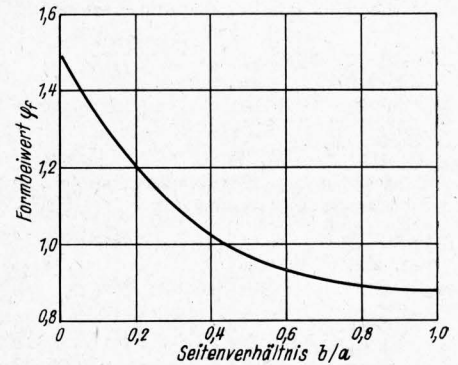


Bild 9. Formbeiwert φ_r in Abhängigkeit vom Seitenverhältnis für Rohre mit Rechteckquerschnitt.

Bei Versuchen über die Fließeigenschaften verschiedener Güter stellte sich heraus, daß kein laminares Strömungsprofil vorliegt. Aus Messungen mit einem Dehnungsmeßstreifengeber lassen sich die Geschwindigkeitsverteilungen im Querschnitt feststellen. **Bild 10** zeigt als Beispiel die Verteilung für Kalisalz. Die Geschwindigkeiten sind über den Querschnitt ziemlich ausgeglichen. Ein Maximum liegt nicht an der Oberfläche der Rinnenmitte, sondern tiefer. Ferner kann auf ein mehr oder weniger starkes Gleiten an den Rinnenwänden und am Boden geschlossen werden. Eine Abschätzung der auftretenden Reynoldszahlen ergab Werte in der Größenordnung von 10 bis 1000. Strömungsversuche mit luftdurchsetztem Wasser bestätigten die Annahme, daß die vom Laminarprofil abweichende Geschwindigkeitsverteilung infolge Verwirbelung des Guts allein durch die zur Fluidisierung notwendige Luft erfolgt. Damit behält die laminare Widerstandsgleichung Gültigkeit.

Im Hinblick auf eine möglichst wirtschaftliche Förderung sind die von der Rinneineigung, der Rinnenbreite und vom Durchsatz abhängigen Mindestluftgeschwindigkeiten von Bedeutung. **Bild 11** zeigt die ermittelten maximalen und minimalen Mindestluftgeschwindigkeiten einiger Güter in Abhängigkeit vom Teildurchmesser d_r . Ferner können die auftretenden Widerstandsbeiwerte λ_F bei der Fließbettförderung berechnet werden. Durch Einsetzen der mittleren Geschwindigkeit c_m , die sich aus dem Massendurchsatz G , den Abmessungen b_R und L_m der Fließschicht und ihrer Dichte

$$\rho_F = \frac{\rho_2 (1 - \varepsilon_{WP})}{L/L_0}$$

ermittelt, folgt

$$\lambda_F = 8g \tan \alpha \frac{b_R^3 \rho_F^2}{G^2} \frac{L_m^3}{b_R + 2L_m}$$

Die dazugehörigen Reynoldszahlen ergeben sich über

$$Re = \frac{c_m D_h \rho_F}{\eta_F} \text{ mit } D_h = \frac{4F}{U} = \frac{4b_R L_m}{b_R + 2L_m}$$

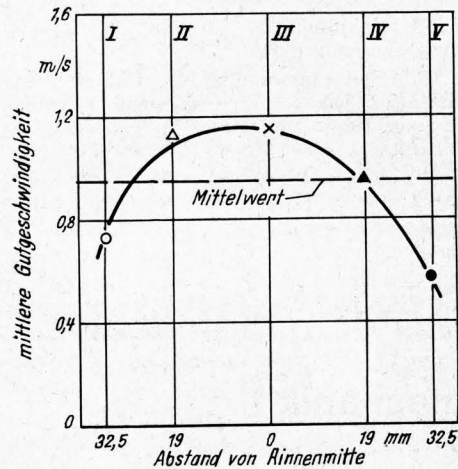
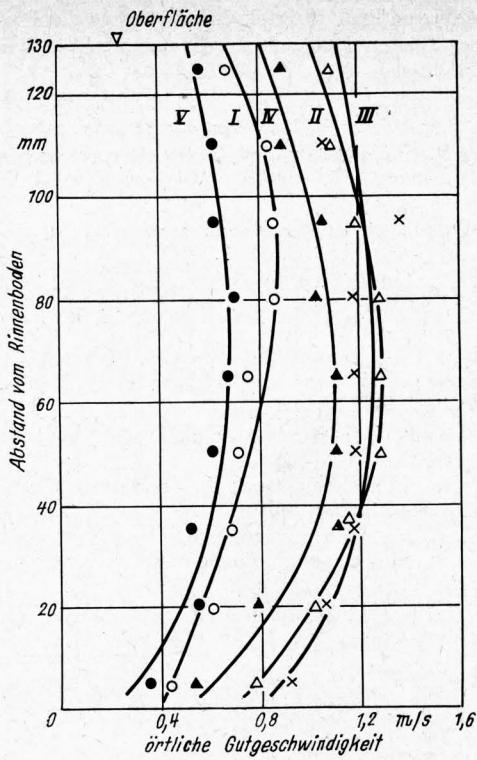


Bild 10. Geschwindigkeitsprofil bei einer Fließbettförderung von Kalisalz. Rinnenbreite 0,075 m, Rinnenneigung 4%, Massendurchsatz 8,4 kg/s, $Re \approx 504$, Anlaufstrecke 5 m

als hydraulischem Durchmesser zu

$$Re = \frac{4G}{\eta_F (b_R + 2L_m)}$$

Durch die entsprechenden Formbeiwerte φ_f läßt sich die Abhängigkeit des Widerstandsbeiwerts von den Schichtabmessungen in Form des Quotienten L_m/b_R berücksichtigen. Eine Auftragung der auf den Formbeiwert φ_f bezogenen Widerstandsbeiwerte λ_F/φ_f über der Reynoldszahl bei Kalisalz zeigt **Bild 12**. Für eine mittlere Widerstandslinie liegt annähernd gleicher Verlauf wie bei der laminaren Widerstandsfunktion $\lambda_F/\varphi_f = 64/Re$ vor. Ferner liegen bei Kalisalz die gemessenen Versuchspunkte eindeutig unterhalb der laminaren Widerstandsfunktion als Folge des während der Förderung aufgetretenen Gleitvorgangs. Auch bei anderen Gütern kann ein Gleiteinfluß vorliegen. Als Maß für das je nach Gut während der Fließbettförderung auftretende Gleiten können die aus den Messungen ermittelten Widerstandsbeiwerte in Beziehung zur laminaren Widerstandsfunktion für runde Rohre gesetzt werden. Für eine Strömung von Gasen mit Gleiten an der Wand gilt

$$\lambda_g = \frac{64}{Re \left(1 + 8 \frac{a^*}{D} \right)}$$

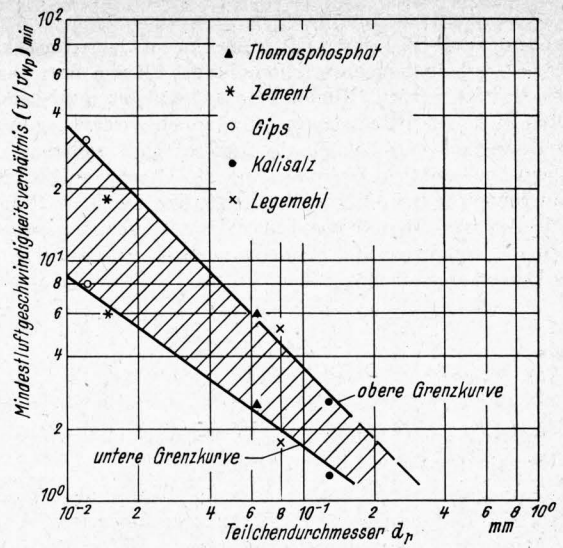


Bild 11. Bereich des Mindestluftgeschwindigkeitsverhältnisses (v/v_{WD}) min in Abhängigkeit vom Teilchendurchmesser d_p . Rinnenlänge 6 m; Förderkanalhöhe 0,2 m; $n_R = 100 \tan \alpha$

	Rinnenbreite b_R m	Massen- durchsatz G kg/s	Rinnen- neigung n_R %
Thomasphosphat	0,05 — 0,1	2,7 — 19,2	0,5 — 4
Zement	0,05 — 0,1	1,4 — 7,4	1,5 — 5,5
Gips	0,075 — 0,15	1 — 5	6 — 7
Kalisalz	0,05 — 0,1	1,4 — 10,9	1 — 5
Legemehl	0,075 — 0,1	1,1 — 4,2	4,5 — 7

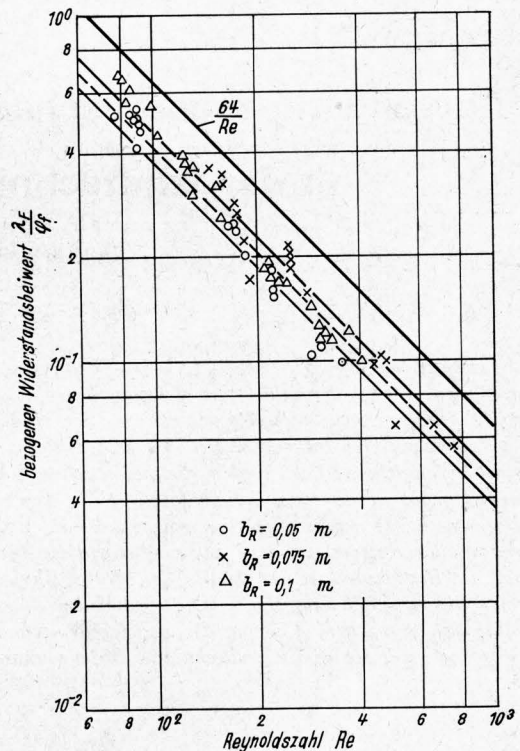


Bild 12. Bezogener Widerstandsbeiwert für die Fließbettförderung von Kalisalz in Abhängigkeit von der Reynoldszahl bei verschiedener Rinnenbreite.

$$\text{bezogener Widerstandsbeiwert } \frac{\lambda_F}{\varphi_f} = 8g \tan \alpha \frac{b_R^3 e_F^2}{\varphi_f G^2} \frac{L_m^3}{b_R + 2L_m}$$

$$\text{Reynoldszahl } Re = \frac{4G}{\eta_F (b_R + 2L_m)}$$

mit α^* als einem vom Rohrdurchmesser unabhängigen Gleitmaß. Der Gleiteinfluß bei Rohren mit rechteckigem Querschnitt kann über die Geschwindigkeitsverteilung für das Fließen ohne Gleiten berücksichtigt werden. Nimmt man an, daß bei auftretendem Gleiten das Geschwindigkeitsprofil ähnlich verläuft und die Geschwindigkeit null um ein bestimmtes Maß außerhalb der Rinnenwände liegt, so lassen sich aus der Geschwindigkeitsverteilung ohne Gleiten mit Einführung fiktiver Rechteck-Halbseiten der Volumendurchsatz und über die mittleren Geschwindigkeiten die entsprechenden Widerstandsbeiwerte ermitteln. Zu ihrer Berechnung gilt angenähert

$$\lambda_g = \frac{64 \varphi_f}{\text{Re} \left(1 + 12 \frac{\alpha^*}{D_h} \right)}$$

Für Kalisalz und Thomasphosphat beispielsweise wurde ein mittleres Gleitmaß von 0,005 m gefunden.

Zusammenfassend können folgende Berechnungsgrundlagen bei der Fluidisierung und Fließbettförderung verwendet werden. Aus einer Zwischummandelgleichung zum Ermitteln des Druckverlusts durchströmter Schüttungen lassen sich Beziehungen zur Bestimmung der Geschwindigkeit am Wirbelpunkt und der Schichthöhe bei idealer Ausdehnung ableiten. Die Gleichungen für den Druckverlust und die Geschwindigkeit am Wirbelpunkt sind allgemein gültig. Zur Berechnung der Schichthöhenzunahme ist die Kenntnis von Geschwindigkeitsexponenten erforderlich, die hauptsächlich vom Teilchendurchmesser und von der Teilchenverteilung abhängen. Eine Beziehung für die Viskosität bei der Durchströmung von Schüttgut mit Flüssigkeiten führt unter Berücksichtigung des Geschwindigkeitsexponenten, der Teilchengröße und der Korngrößenverteilung zur formelmäßigen Darstellung der dynamischen Wirbelschichtviskosität bei der Fluidisierung mit Gasen. Für die Fließbettförderung gilt die laminare Widerstandsgleichung für eine Strömung in geraden, rechteckigen Kanälen, da die Verwirbelung des Guts allein durch

die zur Fluidisierung nötige Luft erfolgt. Ein während des Fließens auftretendes Gleiten läßt sich durch ein gutabhängiges Gleitmaß berücksichtigen.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] ● *Keuncke, K.*: Fluidisierung und Fließbettförderung von Schüttgütern kleiner Teilchengröße. VDI-Forsch.-heft 509. Düsseldorf 1965.
- [2] *Brötz, W.*: Grundlagen der Wirbelschichtverfahren. Chemie-Ing.-Techn. **24** (1952) Nr. 2, S. 60/81.
- [3] ● *Zenz, F. A.*, und *D. F. Othmer*: Fluidization and fluid particle systems. New York: Reinhold Publishing Corp. 1960.
- [4] *Ergun, S.*, und *A. A. Orning*: Fluid flow through randomly packed columns and fluidized beds. Industr. Engng. Chem. **41** (1949) Nr. 6, S. 1179/84.
- [5] ● *Leva, M.*: Fluidization. New York/Toronto/London: McGraw-Hill Book Comp. 1959.
- [6] ● *Schyttil, F.*: Wirbelschichttechnik. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer Verlag 1961.
- [7] *Schügerl, K.*, *M. Merz* und *F. Fetting*: Rheologische Eigenschaften von gasdurchströmten Fließbettsystemen. Chem. Engng. Sci. **15** (1961) Nr. 1 und 2, S. 1/38.
- [8] *Trawinski, H.*: Effektive Zähigkeit und Inhomogenität von Wirbelschichten. Chemie-Ing.-Techn. **25** (1953) Nr. 5, S. 229/38.
- [9] *Schäfer, K.*: Über den Selbstdiffusionskoeffizienten und die Viskosität einatomiger Flüssigkeiten. Kolloid-Z. **100** (1942) Nr. 3, S. 313/20.
- [10] *Siemes, W.*: Förderung von körnigem Gut in geneigten Fließbetten. Chemie-Ing.-Techn. **31** (1959) Nr. 3, S. 212/13.
- [11] ● *Richter, H.*: Rohrhydraulik. 2. Aufl. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer Verlag 1954.
- [12] *Straub, L. G.*, *E. Silbermann* und *H. C. Nelson*: Some observations on open channel flow at small Reynolds numbers. J. Engng. Mech. Div. Paper 1031 (Juli 1956) S. 1/28.

DK 624.131:631.51

Anwendung theoretischer Grundlagen aus dem Grundbau in der landtechnischen Bodenmechanik¹⁾

Von **Wolfgang Vornkahl**, Hannover

Professor Dr.-Ing. Georg Segler zum 60. Geburtstag

Man hat sich schon sehr früh damit befaßt, eine Theorie des Pfluges aufzustellen. Wegen der zahlreichen Schwierigkeiten ist es bis heute nicht gelungen, eine befriedigende Theorie der landtechnischen Bodenmechanik zu entwickeln. In den beiden letzten Jahrzehnten ist mit Erfolg versucht worden, die theoretischen Erkenntnisse des Grundbaues auf das Forschungsgebiet der landtechnischen Bodenmechanik anzuwenden, insbesondere auf die Bodenbearbeitung und das Fahren auf dem Acker. Wenn diese Theorien auch (wie die Festigkeitslehre der Metalle) von idealen Werkstoffen mit idealen Eigenschaften ausgehen, so sind sie doch der Ausgangspunkt für eine brauchbare Klärung der verwickelten technologischen Vorgänge, mit der es die landtechnische Bodenmechanik zu tun hat.

¹⁾ Der Inhalt dieser Arbeit geht teilweise auf Untersuchungen zurück, die im Institut für Landtechnik Stuttgart-Hohenheim (Direktor: Professor Dr.-Ing. G. Segler) im Rahmen eines Forschungsvorhabens mit Mitteln des Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Nordrhein-Westfalen durchgeführt wurden.

Dipl.-Ing. Wolfgang Vornkahl ist in der Versuchsabteilung für Radschlepper der Rhein Stahl Hanomag AG, Hannover tätig.

Die landtechnische Bodenmechanik untersucht die Wechselwirkungen zwischen Ackerboden und landwirtschaftlichen Werkzeugen [1]. Dazu ist die Kennzeichnung der Spannungsverhältnisse wichtig, die im Boden unter der Einwirkung äußerer Kräfte entstehen. Von den verschiedenen Bodenkennziffern ist vor allem die Scherfestigkeit für die Spannungsverhältnisse maßgebend. Sie muß mit Hilfe von Werkzeugen, wie beispielsweise Grubberzinken oder Baggerschaufeln, überwunden werden, wenn der Bruchzustand im Boden erreicht werden soll. In die Berechnung des Bodenwiderstandes geht die Scherfestigkeit als eine wichtige Größe ein. Das Fahren mit Luftreifen oder Gleisketten auf unbefestigter Fahrbahn steht in enger Beziehung mit den Bodenkennziffern, die die Scherfestigkeit bestimmen. Die Größe der übertragbaren Triebkräfte hängt von der Eigenschaft des Bodens ab, die erforderlichen Schubkräfte aufzunehmen. Auch die Tragfähigkeit des Bodens, die ein Maß für die zu transportierenden Lasten ist, steht im Zusammenhang mit der Scherfestigkeit.

Theoretische Grundlagen aus dem Grundbau

In der aus dem Jahre 1776 stammenden Arbeit, die die Grundlage der heutigen Bodenmechanik darstellt, hat *Coulomb* [2] als