

Untersuchungen an Fließbettförderinnen für Getreide, Sämereien und landwirtschaftliche Futtermittel

Institut für Landtechnik, Stuttgart-Hohenheim

Das Verfahren der Fließbettförderung ist für landwirtschaftliche Zwecke bisher kaum angewendet worden. Es wird hier über das Ergebnis mehrjähriger Versuche berichtet, die sich mit der Wirkungsweise und der Anwendung der Fließbettförderung in der Landwirtschaft befassen. Mit den Messungen wurde im Jahre 1955 begonnen [1]. Sie wurden in der Zeit von 1959 bis 1962 im Rahmen einer Forschungsarbeit mit Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Institut für Landtechnik der Landwirtschaftlichen Hochschule Hohenheim fortgesetzt und zu einem gewissen Abschluß gebracht. Ein ausführlicher Bericht über die vorliegenden Ergebnisse findet sich im VDI-Forschungsheft 509 [2]. Das Fließbettverfahren ist vorwiegend zur Förderung von staubförmigem und feinkörnigem Schüttgut verbreitet. Es wurde zuerst 1890 in den USA zur Förderung von grobkörniger Kohle entwickelt und führte sich in Europa in den dreißiger Jahren besonders zur Förderung von Zement ein.

Das Prinzip der Fließbettförderung besteht darin, daß schüttfähiges Gut kleiner Korngrößen durch einen Gasstrom aufgelockert und fließfähig gemacht wird. Als Medium zur Fluidisierung wird meist Luft verwendet. Die Anwendung der Fließbettförderung erfolgt vorwiegend bei leicht abwärts gerichteten Förderwegen. Im allgemeinen wird ein geringes Gefälle bis zu 4%, bei grobkörnigem oder schlecht fließendem Gut bis zu 10% vorgesehen. Falls das

notwendige Gefälle nicht zur Verfügung steht, kann die Rinne unter Umständen waagrecht oder leicht ansteigend verlegt werden. Die Förderwirkung wird dann durch besonders ausgebildete Luftverteilerböden oder Druckkammern sichergestellt.

In Bild 1 ist das Prinzip der Fließbettförderung kenntlich gemacht. In einer offenen oder geschlossenen Förderrinne wird aus einem getrennten Luftkanal von unten her durch einen gasdurchlässigen Boden Druckluft eingeführt. Die wirksam werdenden Luftkräfte heben die auf das Fördergut wirkende Schwerkraft auf und bringen es zum Fließen. Die Förderanlage ist einfach und betriebssicher. Ihre Hauptbestandteile sind die Förderrinne und der Lufterzeuger, meist ein Radialgebläse (Bild 2).

Die Anschaffungskosten einer Fließbettförderanlage sind im Vergleich zu mechanischen Förderern niedrig. Besonders vorteilhaft sind die geringen Betriebskosten, da zur Förderung nur die zur Fluidisierung notwendige Druckluft vom Gebläse aufzubringen ist. Um das Fließen zu bewirken, sind keine bewegten Teile erforderlich, so daß die Beschädigungsgefahr bei Gut und Rinne klein ist. Dadurch wird eine schonende Förderung gewährleistet und eine hohe Lebensdauer der Anlage erreicht.

Die Fließbettförderung stellt eine besondere Art der pneumatischen Förderung dar und läßt sich in der Systematik (Bild 3) als ein bestimmter zweiphasiger Strömungsvorgang darstellen. Die Fließbettförderung entspricht dem unter Nr. 6 dargestellten Wirbelschichtverfahren.

Aus Vereinfachungsgründen ist die Systematik auf den Vorgang im senkrechten Rohr beschränkt. So bezieht sich beispielsweise Nr. 4 auf den Belüftungsvorgang, wie er in Belüftungsanlagen für Trocknungs- und für Kühlzwecke vorliegt. Nr. 7 und Nr. 8 stellen die übliche pneumatische Förderung dar, wobei Nr. 8 sich auf die Förderung von Getreide in landwirtschaftlichen pneumatischen Getreideförderanlagen bezieht. Aus dem in Nr. 6 gezeigten Wirbelschichtvorgang ergibt sich die Fließbettförderung, wenn statt des senkrechten Rohres eine Rinne mit leichter Schrägneigung vorhanden ist. Das aufgewirbelte Gut fließt dann in Richtung des Gefälles abwärts. Bei der Erklärung der Fließbettförderung kann man vom Vorgang des Lüftens einer ruhenden Schüttung mit dem relativen Zwischenraumvolumen ϵ_0 nach Nr. 4 ausgehen. Die Kenndaten der Luft-

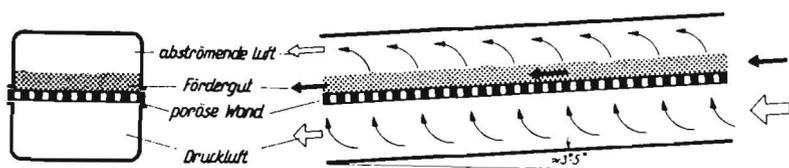


Bild 1: Prinzip der Fließbettförderung

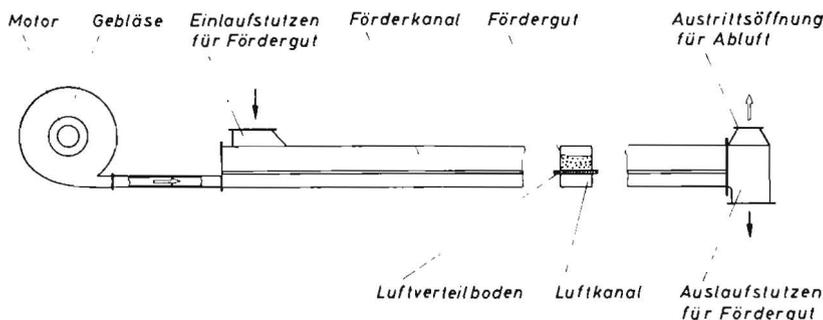


Bild 2: Bauweise einer Fließbett-Förderanlage

Bild 3 (unten): Zweiphasige Strömungsvorgänge

		Luftbewegung aufwärts									
		kein Materialfluß			Materialfluß aufwärts			Materialfluß abwärts			
		dünn	dicht		dicht	dünn	dicht	dünn			
Nr.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		OEG	FH	DH	OAB	BC	BD	VW	IJ	ST	MN
		Luftförderung	Zustand beim Sichten	Übergangszustand von Wirbelschicht zu dichtem Zustand	Lüften	Filtern	Wirbelschichtverfahren	Dichtförderung	allgemeine pneumatische Förderung	Belüftung von Silos, Chemische Reaktionen i. Gegenstrom, Kühlung, Aufheizung	Chemische Reaktionen i. Gegenstrom, Kühlung, Aufheizung

strömung ergeben sich aus der Teilchengröße, der Schüttdichte und dem relativen Zwischenraumvolumen ϵ_0 des Gutes. Unter relativem Zwischenraumvolumen verstehen wir das Volumen der Zwischenräume in einer Schüttung bezogen auf die Raumeinheit [3]. Wird die Strömungsgeschwindigkeit der Luft erhöht, dann nähert man sich dem Wirbelzustand. Das bedeutet, daß die Schüttschicht sich allmählich ausdehnt und die Schichthöhe des lagernden Gutes größer wird. Dieser Ausdehnungspunkt mit dem Zwischenraumvolumen ϵ_0 stellt sich als Knickpunkt B in der Kurve des Druckverlustes dar, wenn wir diesen über der Luftgeschwindigkeit v auftragen (Bild 4). Es ergibt sich dann der Verlauf der Kurve ABD. Mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit in Verbindung mit einer weiteren Schichthöhenzunahme wird die Schicht bei einem relativen Zwischenraumvolumen ϵ_{WP} aufgewirbelt und nach Erreichen des oberen Fluidisierungspunktes mit dem relativen Zwischenraumvolumen ϵ_F fließfähig. Beim Vorgehen in umgekehrter Richtung, das heißt bei langsamer Verringerung der Geschwindigkeit, entsteht anstelle der ursprünglichen Ruheschüttung mit ϵ_0 eine ausgerichtete Ruheschicht lockerster Teilchenanordnung vom relativen Zwischenraumvolumen ϵ_{WP} mit dem gestrichelt dargestellten Verlauf der Druckverlustkurve. Im Zusammenhang mit der in Bild 3 dargestellten Systematik einiger Zweiphasen-Strömungsvorgänge läßt sich der Druckverlust der Fluidisierung in ein Zustandsdiagramm einordnen. Das Zustandsdiagramm nach ZENZ [4] (Bild 5) zeigt für die aufwärtsgerichtete Bewegung eines Gases in Abhängigkeit von seiner Geschwindigkeit den bezogenen Druckverlust $\frac{p_1 - p_2}{L}$ bei der Strömung durch aufwärts oder abwärts bewegte Schüttkörper. Die je nach Gasgeschwindigkeit und Feststoffmenge G gewählten Beispiele für die Anwendung sind bereits in Bild 3 dargestellt. Der bei einer Fluidisierung von Schüttungen auftretende Druckverlauf ist durch den Kurvenzug ABD gegeben.

Die Fließbettförderung eignet sich hauptsächlich für feinkörniges Gut, da die erforderlichen Luftgeschwindigkeiten niedrig und die zuzuführenden Luftmengen klein sind. Bei grobkörnigem Gut strömt die Luft wegen der absolut größeren Zwischenräume sehr schnell durch die Schicht, so daß mit einem großen Luftbedarf gerechnet werden muß. Bei geschlossenen Rinnen kann in einem solchen Fall sogar der Zustand eintreten, daß die über dem Fließbett abströmende Luft schließlich eine so große Geschwindigkeit annimmt, daß sie im oberen Teil des Förderkanals das Gut auf dem Wege der pneumatischen Förderung mitreißt. Dieser Zustand ist durch einen sehr hohen Druck- und Leistungsbedarf gekennzeichnet. Bereits vor Beginn der Untersuchungen war deshalb damit zu rechnen, daß sich die Förderung von Getreide und Sämereien auf bestimmte Rinnenlängen beschränken muß. Aufgabe der hier beschriebenen Versuche war es, festzustellen, ob und in welchem Maße die Fließbettförderung bei Getreide, feinkörnigen Sämereien und Futtermitteln für die Praxis verwirklicht werden kann.

Eine Vorausberechnung aufgrund der in der Literatur vorhandenen Unterlagen zeigte bereits in groben Umrissen die Grenzen für

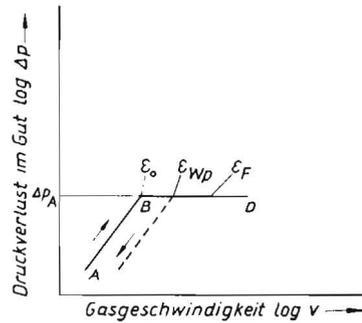


Bild 4: Druckverlust bei der Durchströmung der Fördergutschicht bis zur Fluidisierung

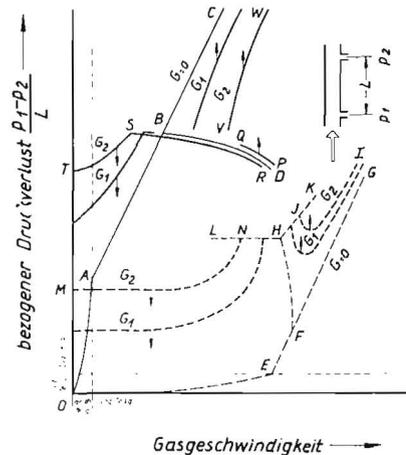
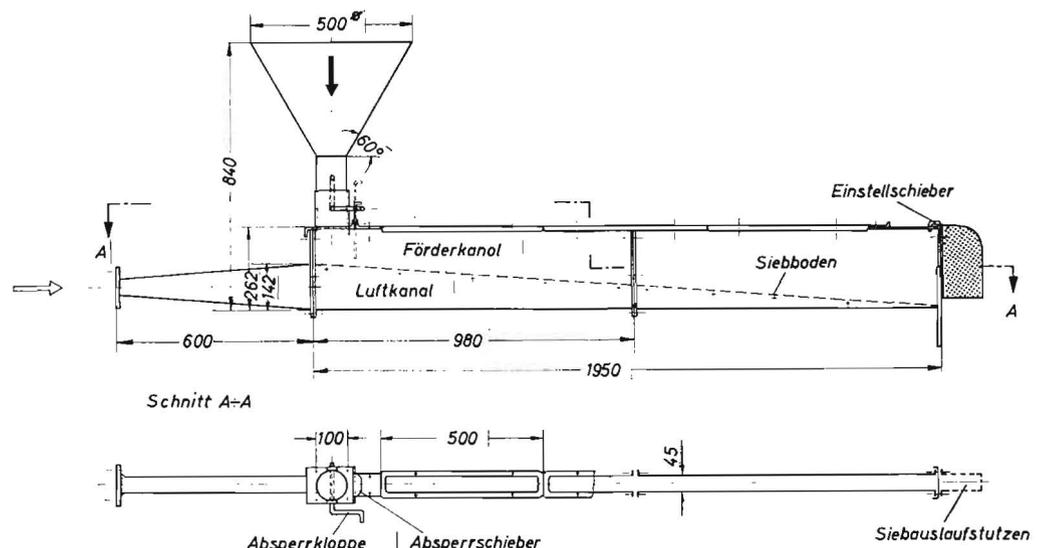


Bild 5: Zustandsdiagramm nach Zenz [4]
Bezogener Druckverlust in Abhängigkeit von der Gasgeschwindigkeit

die Anwendung der Fließbettförderung. So wurde zunächst eine Fließbettrinne aus einem Blechtrug mit Drahtsieb und darüber gelegtem Textilgewebe als Luftverteilerboden (Bild 6) im Institut angefertigt und bei der Förderung von Weizen, Senfsaat und vergleichsweise Sand untersucht [1]. Diese Ausführung mit Siebboden wurde gewählt, weil es sich um bekannte und wenig kostenaufwendige Bauelemente handelt im Vergleich zu den sonst bei Fließbettrinnen üblichen porösen Keramik-, Sintermetall- oder Kunststoffplatten. Bei der Berechnung der Rinnenabmessungen wurde unter Benutzung der Angaben von BROWN und Mitarbeitern [5] von der Geschwindigkeit am Wirbelpunkt ausgegangen.

Als charakteristische Größen des durchströmten Schüttgutes gelten dabei das relative Zwischenraumvolumen ϵ , ein mittlerer Teilchendurchmesser d_v als Durchmesser einer Kugel, deren Volumen multipliziert mit der Teilchenzahl das Gesamtvolumen ergibt, ein Formfaktor Φ und die Schüttdichte ρ_s . Der Formfaktor Φ ist als

Bild 6: Versuchs-Förderanlage für Weizen und Senfsaat



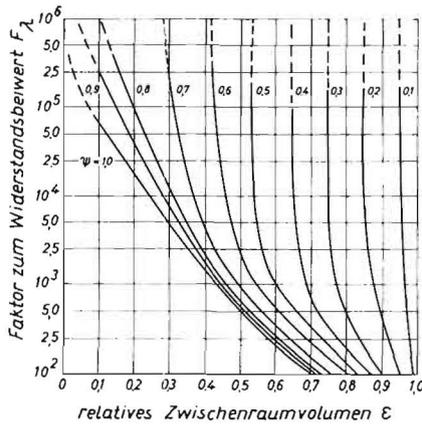


Bild 7: Faktor zum Widerstandsbeiwert in Abhängigkeit vom relativen Zwischenraumvolumen und vom Formfaktor nach BROWN [5]

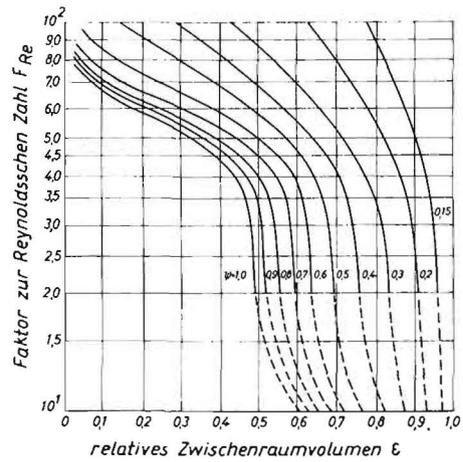


Bild 8: Faktor zur Reynoldsschen Zahl in Abhängigkeit vom relativen Zwischenraumvolumen und vom Formfaktor nach BROWN [5]

Verhältnis von Kugeloberfläche zu Teilchenoberfläche bei gleichem Volumen beider Körper definiert.

Zur Bestimmung des Widerstandsbeiwertes λ und der REYNOLDSschen Zahl Re' bezogen auf einen Teilchendurchmesser sind folgende Gleichungen zugrunde zu legen:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \Delta p \cdot d_p}{F_\lambda \cdot L \cdot \rho \cdot v^2}, \quad Re' = \frac{F_{Re'} \cdot d_p \cdot v}{\nu}$$

mit v als der auf den freien Querschnitt bezogenen Geschwindigkeit, L der Schichthöhe, ρ der Dichte und ν der kinematischen Viskosität des strömenden Mittels und zweier Faktoren F_λ und $F_{Re'}$ [5].

Diese beiden Faktoren zum Widerstandsbeiwert beziehungsweise zur REYNOLDSschen Zahl können in Abhängigkeit vom relativen Zwischenraumvolumen und vom Formfaktor aus Diagrammen bestimmt werden (Bilder 7 und 8). Zur Ermittlung der Geschwindigkeit am Wirbelpunkt kann für den Druckverlust je Schichthöhe die Wichte $g \cdot \rho_s$ der Schüttung als maximal möglicher Wert eingeführt werden. Setzt man alle bekannten Werte in die Gleichungen für λ und Re' ein, so lassen sich beide Ausdrücke nach λ auflösen. Durch Gleichsetzen folgt eine neue Beziehung $\lambda = f(Re')$. Wird diese Funktion mit der in Bild 9 vorliegenden Widerstandsfunktion für die Strömung durch Schüttungen zum Schnitt gebracht, so erhält man die gesuchten Werte für λ und Re' , für die beide Funktionen erfüllt sind. Mit Hilfe einer der nach v aufgelösten Gleichungen abhängig von λ oder Re' läßt sich schließlich die Geschwindigkeit am Wirbelpunkt leicht bestimmen.

Für die zunächst untersuchte Förderung von Weizen wurde bei der Berechnung des mittleren Teilchendurchmessers das Weizenkorn als ellipsenförmiger Körper aufgefaßt und die beiden Halbachsen mit einer Schieblehre ausgemessen. Die Ermittlung des relativen Zwischenraumvolumens und der Schüttdichte erfolgte nach dem Flüssigkeitspyknometerverfahren [6]. Die rechnerisch bestimmten Werte für die Geschwindigkeit am Wirbelpunkt wurden in einem Versuchsbehälter experimentell bestätigt. Damit lag die Größenordnung der zur Fließbettförderung notwendigen Luftgeschwindigkeit fest. Der dabei auftretende Druckverlust in der Rinne mit Siebboden nach Bild 6 ist in Bild 10 dargestellt. Da wegen der verhältnismäßig geringen Werte, auch bei zusätzlicher Verwendung eines Textilgewebes, keine gleichmäßige Luftverteilung über die Länge des Siebbodens zu erreichen war, mußte die Luftkanalhöhe zum Rinnenende hin verkleinert werden, wie es in Bild 6 dargestellt ist. Entsprechend vergrößerte sich die Höhe des Förderkanals. Dadurch wurden gleichmäßigere Luftgeschwindigkeiten erzielt.

Ferner ergab sich folgender Nachteil bei der Versuchsausführung. Die Verwendung eines Siebbodens gewährleistet zwar die nötige freie Fläche zum Durchströmen der erforderlichen Luftmenge, um das jeweilige Schüttgut zu fluidisieren, hat aber den Nachteil, daß die Erscheinungen einer ungleichmäßigen Luftführung innerhalb des fließenden Gutes nicht auszugleichen sind. Bei dem verwendeten Drahtsieb wird auch bei zusätzlich darüber gelegtem Textilgewebe die Luftströmung nur sehr grob aufgelöst. In der ebenfalls grob porösen Weizenschicht bilden sich Luftstrahlen, die zu

inhomogenen Fließverhältnissen führen. Bei kleinen Schichthöhen war die Kanalbildung besonders stark, so daß es erforderlich war, eine bestimmte Höhe einer nicht fließenden Schicht durch einen Schieber am Rinnenende einzustellen. Für Weizen und Senfsaat ergab sich bei ungefähr 60 mm Schieberhöhe ein optimales Verhältnis von Gutdurchsatz zu Luftleistung (Bild 11).

Die zur Förderung notwendigen Luftgeschwindigkeiten waren nur geringfügig höher als die Geschwindigkeiten am Wirbelpunkt. Auch der Druckverlust lag in der Größenordnung des zu erwartenden Wertes, nämlich dem Produkt aus Wichte der fließenden Schicht und Schichthöhe zuzüglich dem Druckverlust in der Rinne. Die bei der Förderung erzielten Massendurchsätze der einzelnen Güter waren allerdings sehr niedrig. Mit 12% Rinnenneigung wurde bei Weizen ein maximaler Durchsatz von 0,45 t/h erreicht, und bei Senfsaat betrug er bei 8% 1,6 t/h. Diese Ergebnisse zeigen, daß eine Fließbettförderung von grobkörnigem Gut möglich ist.

Infolge einer Mindesthöhe von nicht fließendem Gut bei Verwendung eines Siebes als Luftverteiltboden wird der Bauaufwand größer als bei feinporeigen Luftverteiltböden. Trotzdem ist die Anwendung des Fließbettverfahrens für Getreide, besser aber für Feinsämereien geeignet. Die Förderlänge ist bei Getreide wegen des größeren Gefälles und der erhöhten Zunahme des Leistungsbedarfs auf wenige Meter begrenzt. Für die Praxis ergibt sich daraus ein beschränkter Anwendungsbereich. Durchaus brauchbar ist die Fließbettförderung beispielsweise innerhalb von Trocknern oder für den Transport von einem Silo zum anderen. Im Vergleich zu mechanischer und pneumatischer Förderung hat sie den Vorteil einer schonenden Behandlung des Gutes und eines geringen Leistungsbedarfs.

Nach diesen Vorversuchen wurden weitere eingehende theoretische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt mit dem Ziel, eine genauere Berechnung der Fließbettförderung zu ermöglichen [2]. Dabei wurde von dem Gedanken ausgegangen, die Berechnung auf dem gleichen Verfahren aufzubauen, wie sie für die Strömung von Flüssigkeiten in Rohren gelten. Die Untersuchungen erstreckten sich zunächst auf staubförmiges bis feinkörniges Gut. Später wurden sie im Zusammenhang mit der Automatisierung der Fütterung auch auf Futtermittel

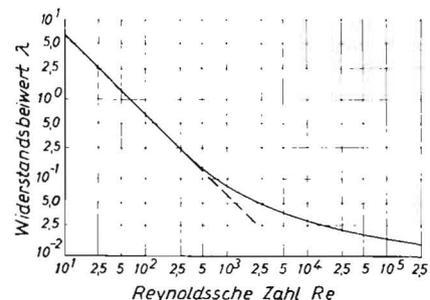


Bild 9: Widerstandsbeiwert in Abhängigkeit von der Reynoldsschen Zahl nach BROWN [5]

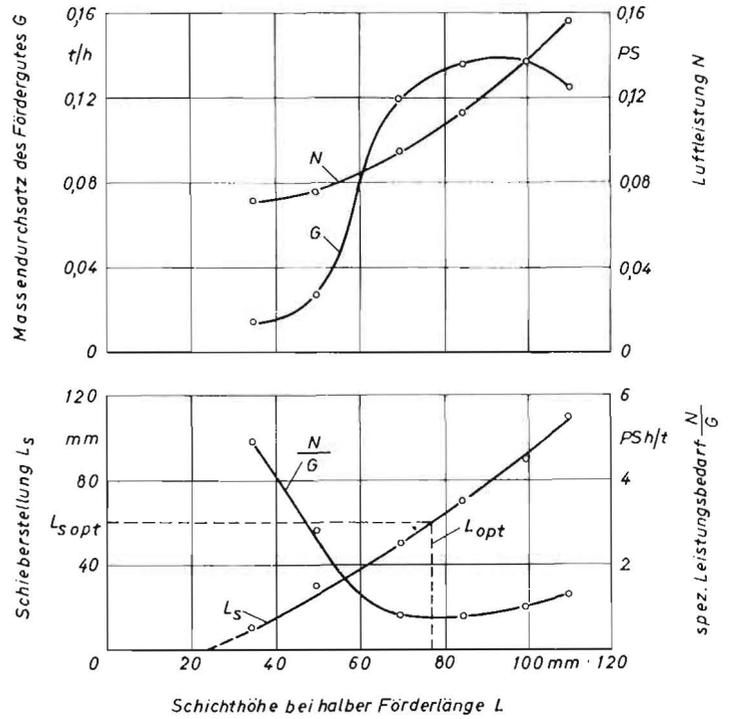
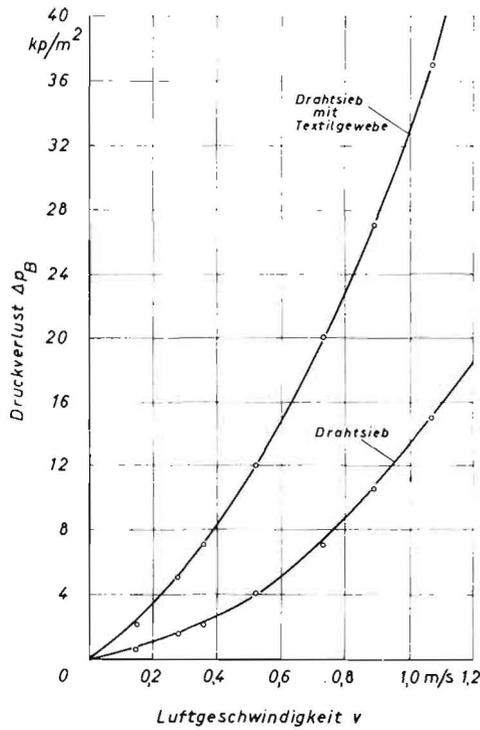


Bild 10: Druckverlust in der Versuchs-Förderanlage nach Bild 6 für Weizen und Senfsaat

Bild 11: Ermittlung der optimalen Schichthöhe für die Fließbettförderung von Weizen und Senfsaat

ausgedehnt. Hier bestehen weit bessere Möglichkeiten für die Anwendung der Fließbettförderung als für Getreide. Für die Versuche wurde als weit verbreitete Futtermittelart „Legemehl“ verwendet¹⁾. Als Korngrößenkennwerte wurden die Durchmesser d_m und d_r durch eine Korngrößenanalyse nach Siebung und Sichtung ermittelt. Bei Annahme von Kugelgestalt der Teilchen bezeichnet der Durchmesser $d_m = \Delta R \cdot d_a$ mit ΔR als Klassenrückstand und d_a als Klassenmitte ein arithmetisches Mittel unter Berücksichtigung der Häufigkeit. Der Durchmesser $d_r = \frac{1}{\sum \Delta R/d_a}$ stellt einen mittleren Durchmesser aus dem Verhältnis Volumen zu Oberfläche der Teilchen einer Mischung dar. Für d_m wurden 414μ und für $d_r = 80 \mu$ bestimmt. Die Ermittlung der Rohdichte erfolgte nach dem Flüssigkeitspyknometerverfahren und lieferte den Wert $\rho_2 = 1690 \text{ kg/m}^3$. Vor der Förderung erfolgte eine Durchströmung und Fluidisierung in einem Versuchsbehälter zur Bestimmung des relativen Zwischenraumvolumens am Wirbelpunkt, $\epsilon_{WP} = 0,615$, des Druckverlustes und der Schichthöhenzunahme in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit. Um diese Vorversuche mit Gut in ruhendem Zustand auf fließende Verhältnisse in Rinnen übertragen zu können, mußte eine Kanalbildung möglichst vermieden werden, da diese Form der Inhomogenität durch das Fließen weitgehend unterbunden wird. Im Bereich der Schichthöhenzunahme wurden deshalb vor jeder Messung die Verhältnisse einer etwa gleichmäßig fluidisierten Schicht durch Röhren geschaffen. Den gemessenen Druckverlust im Gut in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit zeigt Bild 12. Diese Abhängigkeit konnte auch theoretisch nach einer von ERGUN und ORNING [7] zur Berechnung vorgeschlagenen Zweisummandengleichung bestätigt werden. Bei beginnender Schichthöhenzunahme sind der archimedische Auftrieb des Gutes in der Luft und der Strömungswiderstand als tragende Kräfte der Schicht gleich dem Gesamtgewicht der Teilchen. Durch Gleichsetzen dieser Kräfte je Querschnittseinheit mit der Druckverlustgleichung für die Ruheschüttung erhält man die Beziehung zur Ermittlung der Geschwindigkeit am Wirbelpunkt. In Bild 12 liegt etwa Übereinstimmung am Wirbelpunkt als Schnittpunkt zwischen der Druckverlustgeraden im belüfteten Bereich mit dem konstanten Druckverlust in der Wirbelschicht hinsichtlich des berechneten Wertes vor. Nach Überschreiten des Druckverlustes am Wirbelpunkt beginnt die Schicht sich auszudehnen, wobei die gegenseitige Beeinflussung der Teilchen langsam aufgehoben und eine begrenzte, voneinander unabhängige Bewegung möglich wird. In diesem Bereich sinkt der Druckverlust mit zunehmender

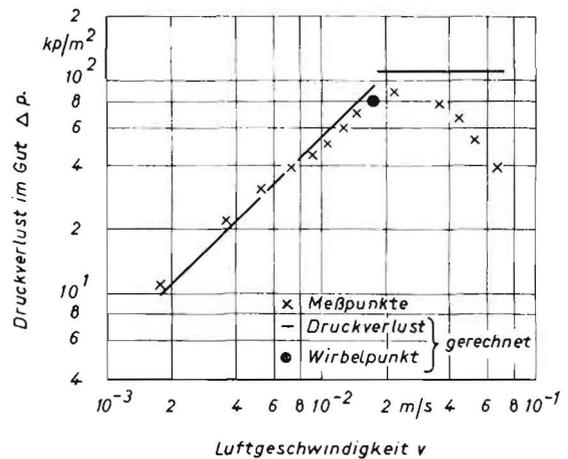


Bild 12: Druckverlust in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit bei der Durchströmung von Legemehl mit 200 mm Schichthöhe

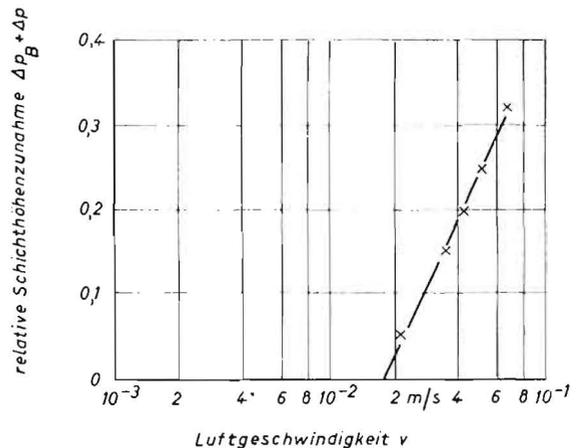


Bild 13: Relative Schichthöhenzunahme in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit bei Legemehl

¹⁾ Das „Legemehl“ hatte folgende Zusammensetzung: 20% Eiweißkonzentrat (Mischfutter), 15% Weizenkleie, 15% Weizenfuttermehl, 10% Maltschrot, 10% Roggenschrot, 10% Haferschrot, 7,25% Tapiokamehl, 2,5% kohlenaurer Futterkalk, 2% Mineralstoffmischung, 0,25% Vitamine

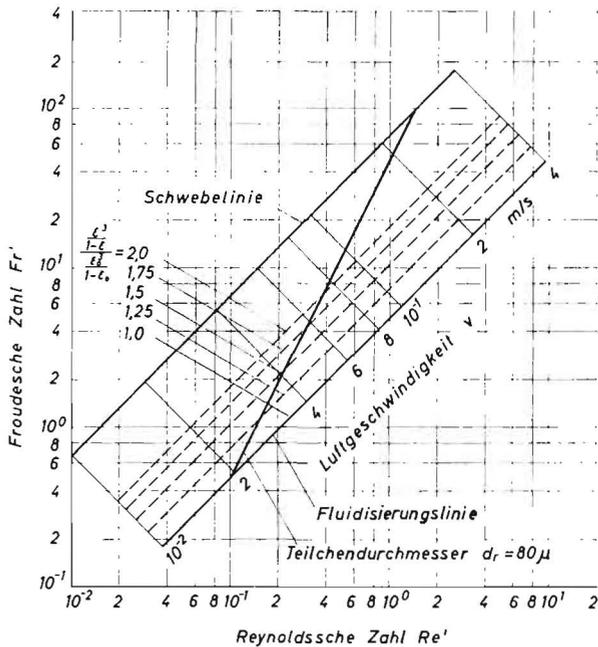


Bild 14: Wirbelschichtzustandsdiagramm von Legemehl

Luftgeschwindigkeit infolge der sehr starken Kanalbildungseigenschaften. Die relative Schichthöhenzunahme $\frac{\Delta L}{L_0}$ mit ΔL als Schichthöhenzunahme und L_0 als Höhe der ruhenden Schicht in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit zeigt Bild 13. Aus der Beziehung für die Geschwindigkeit am Wirbelpunkt läßt sich bei Einführung eines Geschwindigkeitsexponenten zur Berücksichtigung von Kanalbildung und Teilchenbewegung auch die Schichthöhenzunahme in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit berechnen.

Eine allgemeinere Darstellung der wichtigsten Kenngrößen für ein Wirbelschichtsystem in Abhängigkeit von der REYNOLDSSchen und FROUDESchen Zahl bezogen auf einen Teilchendurchmesser läßt sich nach SCHYTL [8] leicht durchführen. Mit Hilfe der Gleichungen für die Geschwindigkeit am Wirbelpunkt und für die Schwebegeschwindigkeit eines Einzelteilchens können die Fluidisierungs- und die Schwebelinie als FROUDESche Zahl $Fr' = \frac{v^2}{d_p \cdot g}$

in Abhängigkeit von der REYNOLDSSchen Zahl $Re' = \frac{v \cdot d_p}{\nu}$ mit ν als kinematischer Viskosität der durchströmenden Luft bestimmt werden. Ferner lassen sich die Beziehungen für Linien gleichen Teilchendurchmessers, gleicher Luftgeschwindigkeit und gleicher Zunahme einer Zwischenraumvolumenfunktion ermitteln. Bild 14 zeigt das Wirbelschichtzustandsdiagramm für Legemehl, in dem ϵ das relative Zwischenraumvolumen der fluidisierten

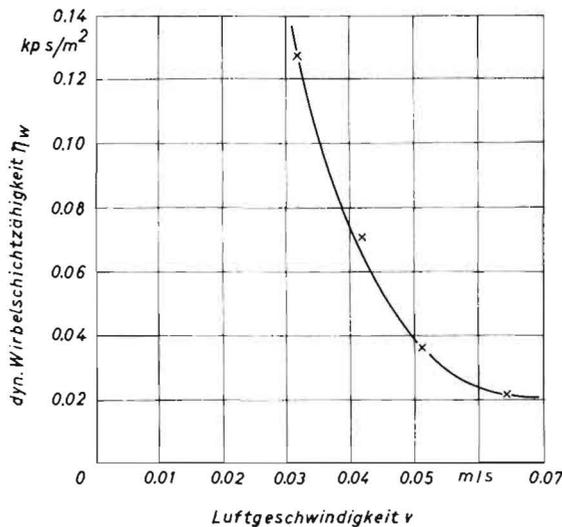


Bild 15: Gemessene dynamische Wirbelschichtviskosität in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit für Legemehl

Schicht bezeichnet. Unterhalb der Fluidisierungslinie liegt das Gebiet einer durchströmten Schüttelschicht. Oberhalb der Schwebelinie findet eine Austragung der Teilchen mit kleinerem Durchmesser als d_p statt.

Da ferner die Viskosität fluidisierten Gutes größten Einfluß auf den Fließvorgang hat, wurden mit einem Rotationsviskosimeter Vergleichsmessungen durchgeführt. Dazu wurde ein Drei-Stufen-Epprecht-Viskosimeter mit Meßsystemen für vergleichende Viskositätsbestimmungen verwendet. Die Meßwerte wurden in einem Versuchsbehälter mit 200 mm Durchmesser im Querschnitt halber Schichthöhe bei 200 U/min ermittelt. Durch Eichung mit Öl bekannter Viskosität wurden die den Meßwerten entsprechenden Größen bestimmt. Die so erhaltenen Viskositäten als Mittelwerte mehrerer Messungen sind in Bild 15 aufgetragen.

Wie schon früher übereinstimmend festgestellt wurde [9; 10; 11], nimmt die Viskosität mehr oder weniger stark mit zunehmender Luftgeschwindigkeit ab. Am Wirbelpunkt liegen sehr große Werte vor. Bei größeren Geschwindigkeiten wird eine etwa konstante Viskosität im Bereich der nicht stoßenden Wirbelschicht erreicht. Zur Entwicklung einer Bestimmungsgleichung wurde eine von TRAWINSKI [10] abgeleitete Beziehung zugrunde gelegt. Durch Erweiterungen zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Verhältnisse bei gasdurchströmten und flüssigkeitsdurchströmten Schichten und des Einflusses von Teilchengrößenmischungen war es möglich, die Viskosität von Wirbelschichtsystemen in ihrer Größenordnung zu berechnen. Die für Legemehl gültigen Werte stimmten mit den gemessenen verhältnismäßig gut überein.

Nach diesen Untersuchungen wurden in einer 6 m langen Rinne mit veränderlicher Breite von 50 bis 150 mm bei 160 mm Förderkanalhöhe Förderversuche durchgeführt. Zur Aufgabe des Legemehls diente eine Zellenradschleuse. Über ein stufenlos regelbares Getriebe konnte der Durchsatz variiert werden. Die zum Fließen notwendigen Luftmengen wurden mit Normblenden gemessen. Die Höhe der fließenden Schicht ließ sich an Schaugläsern ablesen. Eine Messung der Höhe der ruhenden Schicht nach Abschalten der Luftzufuhr war durch das große Lufthaltevermögen des Gutes nicht möglich. Die relative Schichthöhenzunahme konnte daher nur rechnerisch aus den durch frühere Messungen erhaltenen Beziehungen ermittelt werden.

Die gemessenen Druckverluste der leeren Rinne vor und nach der Förderung zeigt Bild 16. Die zum Fließen erforderlichen Luftgeschwindigkeiten waren im Vergleich zu denen bei Weizen und Senfsaat niedrig. Allerdings bestand die Gefahr der Entmischung, da das Legemehl sich aus sehr groben Teilen, wie Schrot und Spelzen und sehr feinen Teilchen zusammensetzt. Nur für einen bestimmten Luftgeschwindigkeitsbereich ließ sich eine Förderung durchführen. Bei kleinen Luftgeschwindigkeiten war die Fluidisierung so schlecht, bei hohen lagerten sich die groben Teile am Boden ab und führten zum Verstopfen.

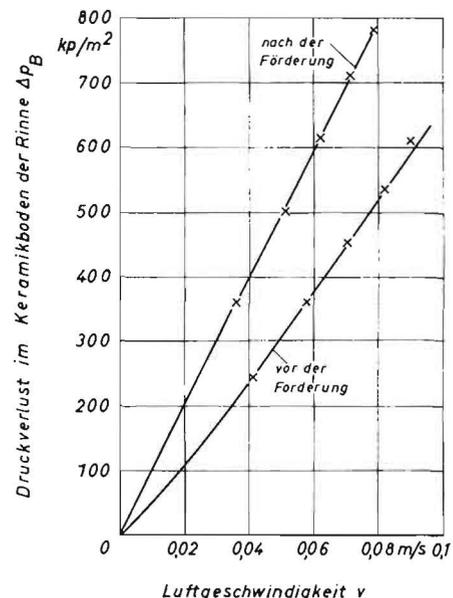


Bild 16: Druckverlust im Luftverteiltboden aus Keramikplatten in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit

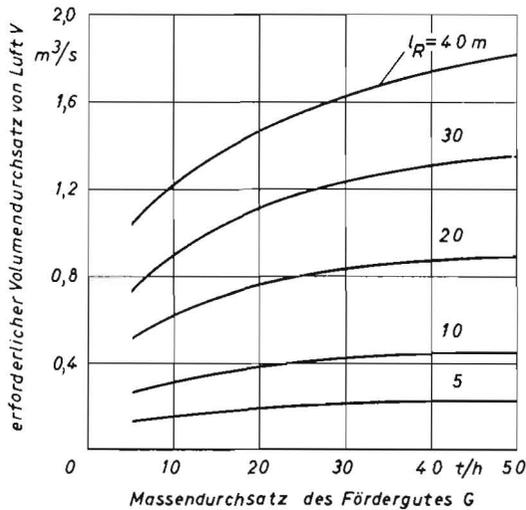


Bild 17: Erforderlicher Luftvolumendurchsatz für die Fließbettförderung von Legemehl bei verschiedenen Durchsätzen und Rinnenlängen

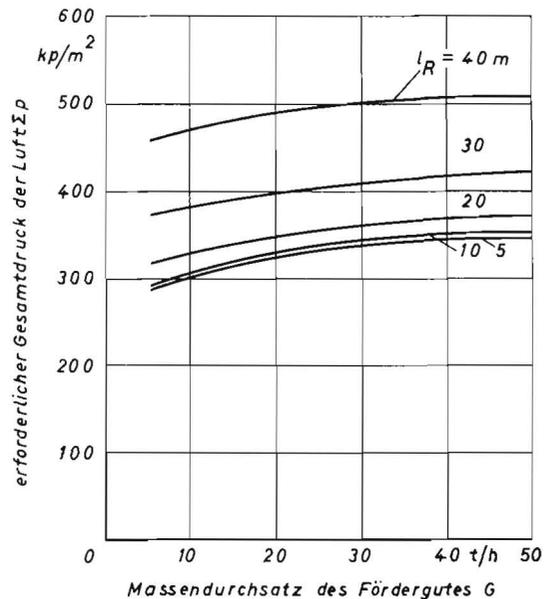


Bild 18: Erforderlicher Gesamtdruck für die Fließbettförderung von Legemehl bei verschiedenen Durchsätzen und Rinnenlängen

Im Hinblick auf eine wirtschaftliche Förderung wurden die Versuche bei möglichst niedrigen Luftgeschwindigkeiten durchgeführt. Die so erhaltenen Werte lagen dicht an der Stopfgrenze für eine Rinne von 160 mm Förderkanalhöhe. Für Legemehl ließ sich erst ab 5,5% Gefälle eine Förderung erreichen. Da die Rinne nur bis 7% geneigt werden konnte, wurden Versuche bei 5,5; 6; 6,5 und 7% durchgeführt. In Abhängigkeit von Rinnenneigung und Durchsatz wurden die erforderlichen Luftgeschwindigkeiten bestimmt. Sie waren bei geringen Durchsätzen und Rinnenneigungen hoch, bedingt durch ungleichmäßige Luftverteilung und geringes Lufthaltevermögen. Bei einem Durchsatz von 4 t/h und 5,5% Rinnenneigung betrug $v \approx 0,08$ m/s gegenüber $v_{wp} = 0,017$ m/s als der Geschwindigkeit am Wirbelpunkt. Der Stopfvorgang begann durch Ablagerung von groben Teilen am Ende der Förderrinne. Mit zunehmender Rinnenneigung und bis zu einem Optimum auch mit zunehmendem Durchsatz des Fördergutes erfolgte eine Abnahme der Luftgeschwindigkeit bis zu $v \approx 0,05$ m/s bei 8 t/h Durchsatz und 7% Neigung. Größere Durchsätze bis zu 11 t/h mit Stopfbeginn am Einlauf erforderten eine Verringerung der Viskosität, also wieder erhöhte Luftgeschwindigkeit, damit eine Zunahme der Schichtgeschwindigkeit und somit größerer Durchsatz erzielt werden konnte. Mit zunehmender, bei den Versuchen veränderter Rinnenbreite nahm die erforderliche Luftgeschwindigkeit ab. Bei 0,1 m Breite waren kleinere Luftgeschwindigkeiten für gleiche Gutdurchsätze und gleiche Rinnenneigungen als für 0,075 m zur Förderung ausreichend, da durch Vergrößern der Rinnenbreite das Verhältnis Schichtquerschnitt zu Schichtumfang einem Optimalwert für Schichthöhen gleich halber Rinnenbreite zustrebt. Nach Überschreiten dieses Wertes würden sich die Fließeigenschaften wieder verschlechtern und eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit erfordern.

Der zu erwartende Gesamtdruckverlust als Summe des Druckverlustes im Rinnenboden (abhängig von der Luftgeschwindigkeit nach Bild 16) und im Gut (Produkt aus Wichte und Schichthöhe), wurde durch die Messungen während der Förderung bestätigt. Mit der Voraussetzung, daß sich die fließende Schicht wie eine Flüssigkeit verhält und laminare Strömung vorliegt, konnte zur rechnerischen Bestätigung der Förderversuche die Durchsatzgleichung für Laminarströmung in rechteckigen Kanälen nach STRAUB, SILBERMANN und NELSON [12] zugrunde gelegt werden. Bei der Auslegung einer Anlage muß zur Wahl des günstigsten Gebläses die erforderliche Gebläseleistung bekannt sein. Der notwendige Luftvolumendurchsatz ergibt sich aus der Mindestluftgeschwindigkeit und den Rinnenabmessungen. Der Gesamtdruckverlust setzt sich aus den Verlusten im Luftkanal, im Luftverteiboden und im Gut sowie aus dem dynamischen Druck der strömenden Luft zusammen. Als Beispiel wurden für optimale Schichtabmessungen, daß heißt für Schichthöhen gleich halber Rinnenbreite und 6% Rinnenneigung bei konstanter Luftgeschwindigkeit $v = 0,07$ m/s die erforderlichen Luftvolumendurchsätze, Gesamtdrucke und Gebläseleistungen in Abhängigkeit vom Massendurchsatz des Fördergutes und der Rinnenlänge bestimmt und in den

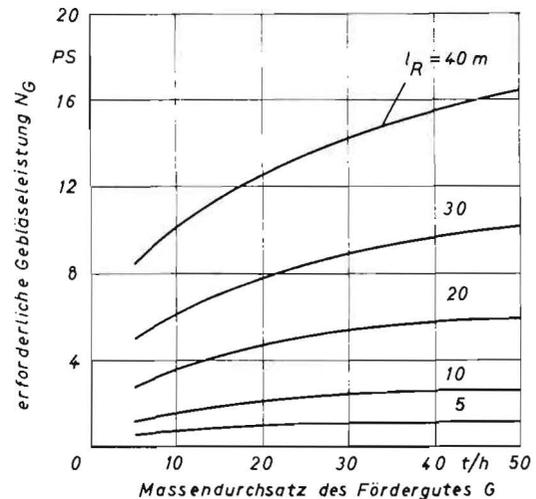


Bild 19: Erforderliche Gebläseleistung für die Fließbettförderung von Legemehl bei verschiedenen Durchsätzen und Rinnenlängen (Wirkungsgrad des Gebläses mit 0,7 angenommen)

Bildern 17 bis 19 aufgetragen. Für die Höhe des Luftkanals wurden dabei 0,1 m, für den Widerstandsbeiwert 0,03 und für die Dichte der Luft 1,2 kg/m³ zugrunde gelegt.

Zusammenfassung

Es wurden Untersuchungen über die Eignung der Fließbettförderung für landwirtschaftliche Güter wie Getreide, Senfesaat und Futtermehl durchgeführt. Dieses Förderprinzip eignet sich besonders für feinkörniges Gut. Der Leistungsbedarf ist gering im Vergleich zu anderen pneumatischen und zu mechanischen Förderverfahren. Die Anlagekosten sind niedrig.

Schrifttum

- [1] BUTTENSCHÖN, K.: Unveröffentlichter Bericht des Instituts für Landmaschinen an der Technischen Hochschule Braunschweig 1955
- [2] KEUNEKE, K.: Fluidisierung und Fließbettförderung von Schüttgütern kleiner Teilchengröße. VDI-Forschungshft 509. Düsseldorf 1965
- [3] BARTH, W.: Der Druckverlust bei der Durchströmung von Füllkörpersäulen und Schüttgut mit und ohne Berieselung. Chem.-Ing.-Techn. 23 (1951), S. 289—293
- [4] ZENZ, F. A.: Visualizing gas-solid dynamics in catalytic processes. Petrol. Refiner 32 (1953), S. 123—128
- [5] BROWN, G. G. u. Mitarb.: Unit Operations. New York/London 1956
- [6] MATTHIES, H. J.: Der Strömungswiderstand beim Belüften landwirtschaftlicher Erntegüter. VDI-Forschungshft 454. Düsseldorf 1956
- [7] ERGUN, S. und A. A. ORNING: Fluid flow through randomly packed columns and fluidized beds. Industr. Engng. Chem. 41 (1949), S. 1179—1184
- [8] SCHYTL, F.: Wirbelschichttechnik. Berlin/Göttingen/Heidelberg 1961

- [9] MATHESON, G. H., W. H. HERBST und P. H. HOLT: Characteristics of fluid solid systems. *Industr. Engng. Chem.* 41 (1949), S. 1099—1104
- [10] TRAWINSKI, H.: Effektive Zähigkeit und Inhomogenität von Wirbelschichten. *Chem.-Ing.-Techn.* 25 (1953), S. 229—238
- [11] SCHÜGERL, K., M. MERZ und F. FETTING: Rheologische Eigenschaften von gasdurchströmten Fließbettsystemen. *Chem. Engng. Sci.* 15 (1961), S. 1—38
- [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

Résumé

Georg Segler and Klaus Keuneke: "Examinations with Continuous Chutes for Grain, Seeds and Agricultural Feeding Stuffs."

It was examined as to what extent agricultural feeding stuffs such as grain, mustard-seeds and meal feed can be conveyed by continuous chutes. This conveying principle is especially suited for finely ground material. Compared with other pneumatic and mechanical conveying methods, the requirement of power is more favourable. The purchasing costs are low.

Georg Segler et Klaus Keuneke: «Recherches sur les rigoles pneumatiques destinées au transport par écoulement de céréales et de produits fourragers.»

Les auteurs ont effectué des recherches pour savoir si le transport par écoulement convient pour les produits agricoles comme par exemple les céréales, les semences de moutarde et les farines destinées à l'alimentation des bêtes et ils ont constaté que ce mode de transport se prête particulièrement bien aux produits finement fragmentés. Les besoins en énergie sont minimes par rapport aux autres procédés de transport pneumatiques et aux procédés mécaniques. Le coût d'une telle installation est modeste.

Georg Segler y Klaus Keuneke: «Investigaciones de canales de transporte para trigo, semillas y piensos.»

Se hicieron estudios sobre la conveniencia de este procedimiento de transporte para productos agrícolas, como cereales, semilla de mostaza y piensos en forma de harina. Este procedimiento resulta muy conveniente para productos de grano fino. En comparación con otros sistemas neumáticos y mecánicos es poca la energía que requiere, siendo la instalación de poco precio.

AUS DEM FACHSCHRIFTUM

Grundlagen der Ölhydraulik

Band 7 der Schriftenreihe „Ölhydraulik und pneumatik“. Krauskopf-Verlag, Mainz 1965. 118 Seiten, 177 Abbildungen, 2 Tabellen. DIN B 5. Preis: kart. 19,80 DM.

Dieses Buch basiert auf einer Sammlung von Aufsätzen, die in den letzten Jahren in der Zeitschrift „Ölhydraulik und pneumatik“ erschienen sind, aber vielen Interessenten nicht mehr zugänglich gemacht werden können, erst recht nicht in der hier gebotenen thematischen Konzentration als Arbeitsgrundlage. Die Aufsätze enthalten alles Wissenswerte über die Bauelemente der Ölhydraulik (allein 30 Seiten) und über die ölhydraulischen Anlagen und Systeme; auch die Geschichte der Hydraulik wird gestreift. Da die Literatur, die vor allem dem Ingenieurnachwuchs auf diesem technischen Fachgebiet zur Verfügung steht, noch schmal ist, muß eine solche Darstellung der Grundlagen begrüßt werden.

*

Wirtschaftliche Voraussetzungen und Entwicklungslinien der Mechanisierung in der Landwirtschaft der Bundesrepublik Deutschland seit 1949

VON PETER VON HARDER. Berichte über Landtechnik Nr. 85, herausgegeben vom Kuratorium für Technik in der Landwirtschaft. Hellmut-Neureuter-Verlag, Wolfratshausen 1965. 200 Seiten, 80 Abbildungen und Übersichten. DIN A 5. Preis: kart. 7,00 DM.

Die rückblickende Betrachtung der Mechanisierung in der Bundesrepublik geht auf die Ursachen der technischen Entwicklungen ein, die im Anfang zunächst vom Ausland beeinflusst wurden, dann aber die deutsche Landmaschinen-Industrie zu einem außerordentlich großen Eigenangebot beflügelten. Agrarstrukturelle Bedingungen, die die technische Entwicklung steuerten beziehungsweise auch hinderten, sind mit in die Betrachtungen einbezogen.

Im ersten Teil werden die wirtschaftlichen Voraussetzungen für die Mechanisierung durchleuchtet: Der Autor geht dabei auf die Ursachen ein, die zum Austausch von menschlicher Arbeits- und tierischer Zugkraft gegen Maschinenkapital geführt haben. Er vergleicht hin und wieder die Situation in der Bundesrepublik mit der in den USA, um schließlich die Veränderung der Arbeitsproduktivität als Ergebnis der hohen Investitionen zu erläutern. Ein weiterer Abschnitt befaßt sich mit den Wandlungen der Agrarstruktur seit 1949: Flurzersplitterung, Hanglage und ihre Auswirkungen sowie Übersichten über die Organisation der Betriebe verschiedener Größen werden besprochen, um daran Möglichkeiten einer betriebsorganisatorischen Anpassung bei einer Hochmechanisierung zu erläutern.

Danach werden die Ergebnisse einer Analyse wiedergegeben, die auf der Grundlage von statistischem Material der Landwirtschaftszählung von 1960 angestellt wurden. Sorgfältig werden Art und Umfang des Maschineneinsatzes herausgearbeitet und durch zahlreiche Darstellungen veranschaulicht. Der Mechanisierungsprozeß von 1949 bis 1960 wird ferner daraufhin untersucht, wie er sich in den verschiedenen Betriebsgrößenklassen der Bundesländer Schleswig-Holstein, Nordrhein-Westfalen und Bayern ausgewirkt hat.

Abschließend werden aufgrund bestimmter Annahmen über erreichbare Mechanisierungsstufen in verschiedenen Betriebssystemen und Größenklassen kalkulatorische Ersparnisse an Vollarbeitskräften ermittelt, die Aussagen über den vermutlichen Umfang und die Grenzen der Freisetzung von Arbeitskräften aus der Landwirtschaft ermöglichen.

*

Die Arbeitsverfahren in der Rindvieh- und Schweinehaltung

VON HERMANN MÖLBERT. BLV-Verlagsgesellschaft München-Basel-Wien in Zusammenarbeit mit Landwirtschaftsverlag Hiltrop, ohne Jahr. 208 Seiten, 96 Abbildungen. DIN A 5. Preis: Halbleinen 15,80 DM.

Zu dem Thema „Arbeitsverfahren“ wurde in den letzten Jahren viel gesagt und geschrieben. Eine abgerundete Übersicht aber, die die vielen Verfahrensmöglichkeiten einander gegenüberstellt und einordnet, fehlte bisher. Dieser Aufgabe hat sich der Verfasser angenommen und im vorliegenden Buch die Ergebnisse dargelegt. Er ging dabei von den Gesichtspunkten für die Auswahl eines Verfahrens aus: Arbeitszeitbedarf, Kostenverhalten und Kapitalbedarf. Nach diesen Gesichtspunkten wurden Milch- und Mastviehhaltung und Mast- und Zuchtschweinehaltung bei verschiedenen Bestandsgrößen untersucht. Die besten Verfahren sind am Schluß eines jeden Abschnittes zusammengestellt. Außerdem sind die technischen Einrichtungen beschrieben, die für die einzelnen Verfahren gebraucht werden.

*

Jahrbuch 1965

Mit seinem Jahrbuch 1965 „Das wissenschaftliche Leben in Deutschland“ legt der Stifterverband der Öffentlichkeit eine verbesserte und ergänzte Neuauflage des unter dem gleichen Titel erschienenen Jahrbuches 1956 vor.

Neben kurzen Einführungen über die Beziehungen zwischen Wissenschaft und Staat und das Verhältnis zwischen Wissenschaft und Wirtschaft werden der Wissenschaftsrat, die Akademien der Wissenschaften sowie die wissenschaftlichen Hochschulen in Einzeldarstellungen behandelt. Die angegebenen Fakten stützen sich auf Erhebungen, die im Laufe des Wintersemesters 1964/1965 vorgenommen worden sind. In einem Sonderkapitel werden die „Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften“ und unter dem Titel „Selbstverwaltung, Standesvertretung und Förderung im Bereich der Wissenschaft“ vor allem die großen wissenschaftsfördernden Institutionen behandelt. Auch die staatliche sowie die wirtschaftseigene Forschung werden dem heutigen Stande entsprechend eingehend berücksichtigt. Die Abschnitte über die in der Bundesrepublik arbeitenden wissenschaftlichen Gesellschaften und Vereinigungen sowie das Kapitel „Fundstätten der Wissenschaft“ geben — wenn auch nur in einer kleinen Auswahl — weitere Hinweise. Der Anhang bringt einige aufschlußreiche Tabellen und Zusammenfassungen.

Das Jahrbuch wird zum Preise von 10.— DM von der Gemeinnützigen Verwaltungsgesellschaft für Wissenschaftspflege mbH, 4300 Essen-Bredency, Postfach 360, vertrieben.

(Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft)