

3. Versuchseinrichtung

3.1 Messung der Luftgeschwindigkeit

Die Messung der Luftgeschwindigkeit erfolgt indirekt durch eine Druckmessung mit Hilfe eines Prandtl-Staurohres in der Achse des Schlauches, wodurch die max. Luftgeschwindigkeit $v_{L,max}$ erfaßt wird. Mit einem Leitungsfaktor, der hier im Mittel 0,84 beträgt, wird die mittlere Luftgeschwindigkeit $v_{L,m}$ errechnet [15]:

$$v_{L,m} = 0,84 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_L} \cdot p_{dyn}}$$

Unmittelbar während der Körnerförderung konnten Druckmessungen durch das Prandtl-Rohr nicht durchgeführt werden, da sonst eine Störung der Körnerfolge zu befürchten war.

Die Luftdichte ρ_L hängt vom Druck, der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit ab. Sie ändert sich durch unterschiedliche relative Luftfeuchtigkeiten innerhalb des Luftdruckbereiches der Untersuchungen nur geringfügig. Bei höheren Luftgeschwindigkeiten wird eine Verringerung der Luftdichte infolge einer Temperaturerhöhung sowohl durch eine gleichzeitige Abnahme der relativen Luftfeuchtigkeit als auch durch eine Erhöhung des Luftdruckes in etwa ausgeglichen. Es wird daher mit einem konstanten Wert für die Luftdichte gerechnet.

3.2 Messung der Korngeschwindigkeit im Schlauch

3.2.1 Meßmethode

Die auch heute noch vielfach verwendete Leimstreifenmethode zur Auswertung der Ablagegenauigkeit von Sägeräten im Prüfstand [4, 16] scheidet bei der Erfassung der Abstände zwischen den aus einer pneumatischen Leitung austretenden Körnern aus, da wegen der relativ hohen Luft- und Korngeschwindigkeit ein sofortiges Haften aller Körner am Leimstreifen nicht mit Sicherheit gewährleistet ist. *Meijer* [17] benutzte wohl aus diesem Grunde eine Lichtschranke, um die nicht belegten Zellen im Zellenrad eines pneumatischen Einzelkornsägerätes zu erfassen. Diese Methode wäre wohl geeignet, die Sicherheit der Kornerfassung in der Lochtrommel zu prüfen, nicht jedoch für die Bestimmung der Körnerfolge innerhalb der Schlauchleitung. Auch die von *Stieger* [18] beschriebene Methode für die Ermittlung der Einzelkornerfassung unmittelbar nach Abgabe des Kornes vom Gerät durch Aufprall auf einen induktiven Aufnehmer scheidet im vorliegenden Fall aus.

Allen bisher erwähnten Methoden gemeinsam ist die Erfassung der Körner unmittelbar nach dem Abwurf. Um jedoch die Körner laufend über die Länge des Schlauches zu erfassen, müssen andere Methoden benutzt werden, [19, 20, 21]. So konnte mit Hilfe von Radioaktivität und Isotopen die Geschwindigkeit eines pneumatisch geförderten Gutes gemessen werden. Die Verwendung von Isotopen ist zweifellos geeignet, das vorliegende meßtechnische Problem zu lösen, schied jedoch wegen des Fehlens geschulten Personals aus.

Hehn [22] konnte die Geschwindigkeit eines mit Preßluft in einer Rohrleitung geförderten Kies-Sand-Gemisches dadurch messen, daß er Stahlkugeln beimischte. Diese rufen beim Durchgang durch Spulen, die mit einer Wechselspannung (5 kHz) gespeist werden, eine Änderung der Induktivität hervor. Die durch die Induktivitätsänderungen erzeugten Signale können über einen Trägerfrequenzverstärker auf einem Lichtstrahloszillographen festgehalten werden. Aus dem Abstand der Spulen und der Zeit zwischen dem Durchgang einer Stahlkugel durch die beiden Spulen kann die Geschwindigkeit dieser Kugel berechnet werden. Die zeitlichen Abstände aufeinanderfolgender Signale, die von einer Spule abgegeben werden, entsprechen der zeitlichen Abstandsfolge der geförderten ferromagnetischen Kugeln.

Dadurch, daß kleine Stahlstifte in Maiskörner eingesteckt bzw. die Körner mit Eisenpulver oberflächlich beklebt wurden, ließ sich die Methode von *Hehn* auch bei den vorliegenden Untersuchungen anwenden.

3.2.2 Aufbau der Versuchseinrichtung

Mit 30 g Kunstharzdispersion Adhesin A 7032 (Henkel) — in 30 g Wasser gelöst — werden 1 kg Maiskörner benetzt und bei gleichmäßigem Umrühren mit Eisenpulver gepudert, anschließend auf einem Maschendraht ausgebreitet und im Warmluftstrom getrocknet. Eine durchschnittliche Masse an Eisenpulver je Korn von 0,01 g — das sind auf die Kornmasse bezogen 3 % — reicht aus, um ein gut auswertbares Signal zu erhalten. Bei einer mittleren Kornmasse von 0,333 g ist die Massenzunahme durch das Eisenpulver in Höhe von 0,01 g unbedeutend und kann vernachlässigt werden; umso mehr als ja alle in der Untersuchung benutzten Körner eine ähnliche Massenzunahme aufweisen.

Die Meßspulen sind so aufgebaut, daß sie mit einer Bohrung im Spulenkörper über die zu untersuchenden Schläuche geschoben und fixiert werden können. Die Windungszahl ergibt sich aus der geforderten Selbstinduktivität und den geometrischen Abmessungen der Spule [22]:

$$L = \mu_r \mu_0 A_W \cdot \frac{W^2}{l_s}$$

Die eigentliche Versuchsanlage, **Bild 2**, besteht im wesentlichen aus einem Druckluftgebläse, das mit einem stufenlos regelbaren Getriebemotor angetrieben wird. Der Anschluß dieses Gebläses an die Versuchsanlage endet mit einer Blende für die Feinregelung des Luftdruckes in einem 60 cm langen Stahlrohr von 25 mm ϕ , auf dessen Ende eine Zellenrad-Körnerschleuse aufgebaut ist, die mit einem luftdichten Deckel verschlossen wird, **Bild 3**. Durch eine 60 mm lange Öffnung in dem Rohr können die Einzelkörner in das Rohr und damit in den Luftstrom gelangen. Das Zellenrad mit 40 Zellen von je 14 mm ϕ wird ebenfalls von einem stufenlos regelbaren Getriebemotor angetrieben. Die Schleuse mit dem Stahlrohr geht über ein auswechselbares Zwischenstück in die zu untersuchende Schlauchleitung über.

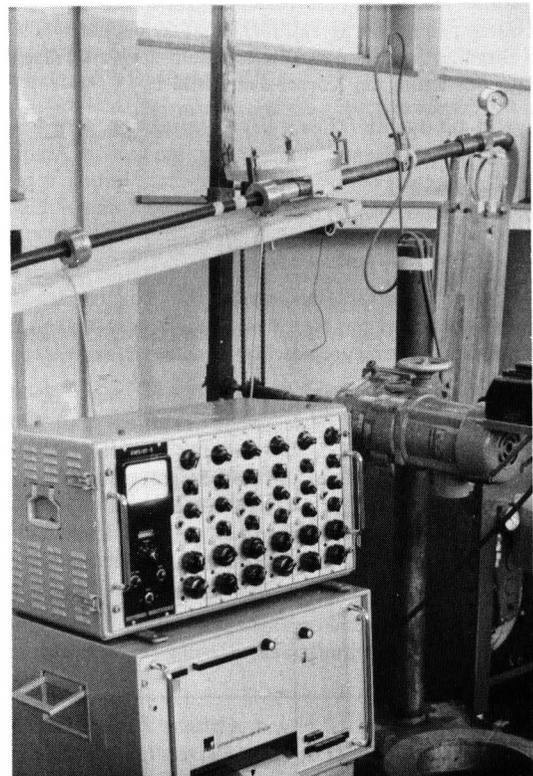


Bild 2. Teil der Versuchsanlage mit Schlauchleitung, Zellenrad, Induktionsspulen, Meßverstärker und Oszillograph.

Auf der Schlauchleitung sind mehrere Spulenpaare von je 31 mm Innendurchmesser der Bohrung aufgesetzt, wobei der Abstand zwischen den Spulen in der Regel 50 cm beträgt. Die Körnerschleuse, Förderleitung und Spulen sind schließlich auf einem in der Höhe schwenkbaren Tisch befestigt, um auch Untersuchungen bei geneigter Förderleitung zu ermöglichen. In Hinsicht auf die Anwendung in der Sämaschine sind das Material und auch die Abmessungen des zu untersuchenden Schlauches vorgegeben. Untersucht wurden ein Schlauch aus Polyäthylen (PE-hart, Shore D 60) und ein Schlauch aus Polyvinylchlorid (PVC-weich, Shore A 74) von je 3,50 m Länge und 20 mm lichter Weite; sie entsprechen damit etwa dem Schlauchdurchmesser der zu untersuchenden Sämaschine.

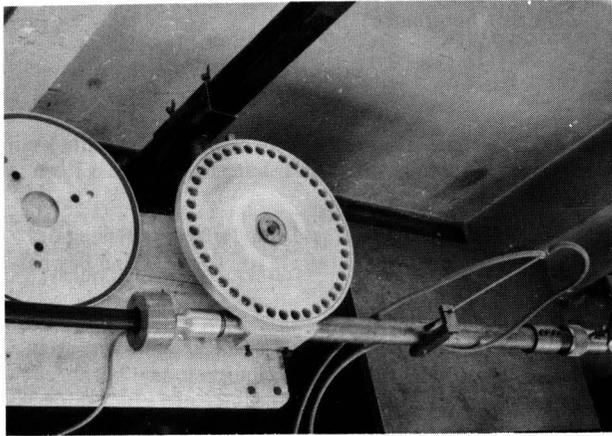


Bild 3. Zellenschleuse, Prandtl-Rohr und Induktionsspule.

4. Versuchsdurchführung

4.1 Meßwerterfassung

Um einen möglichen Einfluß unterschiedlicher Kornformen mit zu erfassen, wurden Sorten unterschiedlicher Kornform, die sich in ihren Dicken-, Breiten- und Längenabmessungen deutlich unterscheiden, benutzt, Bild 4, Tafel 1.

Jeweils 35 Körner werden bei jedem Versuch von Hand in die Körnerschleuse eingelegt. Die Körnerschleuse wird dann mit der Drehzahl, die der gewünschten Kornfolge (Kornzahl je Sekunde) entspricht, angetrieben. Über die Induktionsspulen werden beim jeweiligen Korndurchgang Signale gewonnen und im Oszillographen aufgezeichnet. Am Ende der Förderleitung konnten die Körner in einem porösen Sack aufgefangen und einer erneuten Benutzung zugeführt werden.

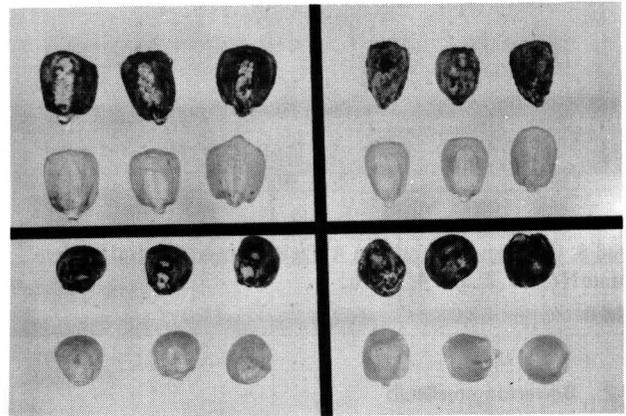


Bild 4. Verwendete Kornformen.

Dunkle Körner mit Eisenpulver beklebt.
oben links: großflach oben rechts: mittelflach
unten links: kleinrund unten rechts: mittelrund

Aus den Signalaufzeichnungen eines Spulenpaares, Bild 5, Zeile 1, 2 läßt sich aus dem Abstand a über den bekannten Papiervorschub des Oszillographen die Korngeschwindigkeit zwischen den Spulen bestimmen. Der Abstand der Signale einer Spule, in Bild 5 z.B. durch b gekennzeichnet, gibt den zeitlichen Abstand aufeinander folgender Körner wieder. So läßt sich jedes der 35 Körner von Spulenpaar zu Spulenpaar 1,2; 3,4; 5,6; usw. verfolgen und eine Änderung sowohl der Fördergeschwindigkeit als auch des Abstandes zu dem vorhergehenden oder nachfolgenden Korn ermitteln.

Sorte	Kornform	mittlere Kornmasse g	Massenanteile [%] in den Größenklassen											
			mm	< 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - 11	11 - 12	12 - 13	13 - 14
Anjou 21	kleinrund	0,248	D B L	1,0	87,0	12,0	2,0	37,0	61,0 44,0	1,0 54,0	2,0			
Prior	mittelrund	0,385	D B L					100,0 3,0	100,0 21,0	52,0	24,0			
Inra früh	mittelflach	0,245	D B L	34,0	66,0			90,0	10,0		17,0	67,0	16,0	
Perdux	großflach	0,336	D B L		68,0	27,3	5,0	1,0	1,0	75,0 2,0	22,0 25,0	1,0 58,0	11,0	4,0
Perdux	großflach klassiert		D B L		71,0	29,0				77,0	23,0 16,0	84,0		

Tafel 1. Kornform, mittlere Kornmasse und die Massenanteile bei verschiedenen Dicken- (D), Breiten- (B), Längenabmessungen (L) der benutzten Maissorten.

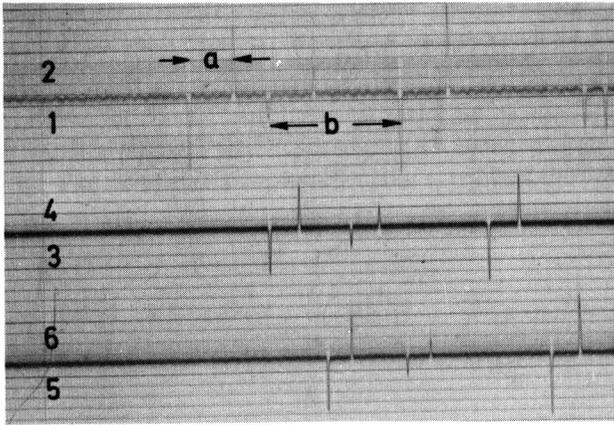


Bild 5. Oszillogramm mit den Aufzeichnungen der drei Spulenpaare Nr. 1 u. 2; 3 u. 4; 5 u. 6.

4.2 Bewertungsmaßstab

Als Maßstab für die Gleichmäßigkeit der Körnerfolge bei den verschiedenen Versuchsvarianten wurde die Abweichung der zeitlichen Kornabstände in den einzelnen Förderstreckenabschnitten von dem mittleren theoretischen zeitlichen Abstand benutzt; ausgedrückt durch den Variationskoeffizienten s in %.

Da auch die Eingabe der Körner in den Luftstrom durch die Körnerschleuse nicht ganz frei von Unregelmäßigkeiten ist, die die Gleichmäßigkeit der Körnerfolge bereits stören, wird auch hier jeweils der Variationskoeffizient s in % mit Hilfe der Aufzeichnungen der ersten Spule festgestellt. Dieser Variationskoeffizient "Null" wird von den Variationskoeffizienten, die an den anderen Spulen ermittelt wurden, abgezogen, das Ergebnis dann im folgenden als Änderung des Variationskoeffizienten Δs in % bezeichnet. Aus jeweils 6 Wiederholungen sind Mittelwerte der Δs -Werte gewonnen worden.

5. Versuchsergebnisse

5.1 Einflüsse auf das Korn, von denen die Gleichmäßigkeit der Körnerfolge bei pneumatischer Förderung abhängt

Über die Vorgänge bei den verschiedenen Arten der pneumatischen Förderung liegen zahlreiche aerodynamische und physikalische Abhandlungen [12, 13, 23 bis 27] vor.

5.1.1 Auftretende Kräfte

Ein Korn bewegt sich demnach bei der pneumatischen Förderung unter der Wirkung folgender Kräfte, Bild 6:

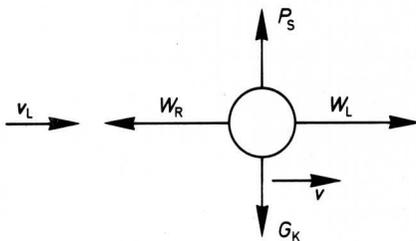


Bild 6. Kräfte, die auf ein Korn bei waagerechter pneumatischer Förderung in einem Rohr oder Schlauch einwirken. Auftrieb durch Luftverdrängung vernachlässigt (nach Siegel [25]).

1. der antreibenden Kräfte, die sich durch den Luftwiderstand W_L und die Luftbewegung ergeben [25]

$$W_L = c_W \frac{\rho_L}{2} (v_L - v)^2 F_K$$

2. der auf das Korn einwirkenden Gewichtskraft G_K

$$G_K = m_K \cdot g$$

3. der Reibungskraft W_R , die durch Rutschen und Stöße zwischen dem Korn und der Rohrwand einerseits und andererseits durch die Stöße einzelner Körner miteinander verursacht werden. Diese Reibungskraft W_R [24] läßt sich folgendermaßen bestimmen:

$$W_R = d_R \pi \mu \frac{v_L v}{2} \rho_L \lambda_Z \frac{1}{4}$$

Wegen der im Vergleich zur Korndichte geringen Luftdichte kann die Auftriebskraft infolge der Luftverdrängung durch das Korn vernachlässigt werden.

Die einzelnen Kräfte wiederum sind von der Beschaffenheit des Kornes, vom Strömungszustand sowie von der Lage und Beschaffenheit der Förderleitung abhängig.

Ein Strömungszustand mit gleichmäßiger Verteilung der Körner in der Leitung ist bei hohen Luftgeschwindigkeiten zu erwarten, während bei abnehmender Luftgeschwindigkeit oder bei zunehmender Gutbeladung eine Entmischung des Gut-Luft-Gemisches stattfinden wird [23], wobei die Körner sich dann im unteren Rohrteil befinden.

Barth [24] kennzeichnet den jeweiligen Strömungszustand als Funktion der Froudeschen Kennzahl $Fr = v_L / \sqrt{g d_R}$ und der Materialbeladung μ , dem Verhältnis der geförderten Gutmasse zur geförderten Luftmasse (jeweils pro Zeiteinheit):

$$\mu = \frac{G}{A v_L \rho_L}$$

Mit zunehmender Froudescher Kennzahl ändert sich der Strömungszustand. Für eine Stopfgrenze gilt bei gleichbleibender Luftgeschwindigkeit

$$\mu / Fr^4 = \text{const.}$$

Siegel [25] berichtet, daß die waagerechte pneumatische Förderung nur möglich ist, wenn durch die Kornbewegung und die Luftströmung eine sekundäre Auftriebskraft P_S entsteht, die dem Korngewicht G_K radial entgegenwirkt. Diese radiale Kraft wird nicht nur durch die mechanischen Kräfte infolge der Kornstöße mit der Rohrwand geliefert, sondern auch durch den axial gerichteten Luftstrom, der bei unsymmetrischer Kornumströmung eine unterschiedliche Druckverteilung an der oberen bzw. unteren Seite des Kornes verursacht. Die unterschiedliche Druckverteilung wiederum kann auf folgenden Ursachen beruhen:

1. es entsteht eine Magnuskraft P_M infolge der Korndrehung [17, 28]:

$$P_M = c_M \frac{\rho_L}{2} (v_L - v)^2 F_K$$

2. liegt ein Korn auf der unteren Rohrwand, so wird die Luftgeschwindigkeit über dem Korn gesteigert; dies führt zu einer Verringerung des statischen Druckes auf dieser Seite [29],
3. es besteht ein Luftgeschwindigkeitsprofil im Rohr, wobei die Luftgeschwindigkeit in unmittelbarer Wandnähe stark absinkt.

5.1.2 Ähnlichkeitsbedingungen

Sollen bei der pneumatischen Förderung zwei Strömungszustände ähnlich sein, so müssen die Kräfte, die den Strömungsablauf bedingen, z.B. die Massenträgheitskräfte, die Zähigkeitskräfte, die

Schwerkraften, untereinander in einem gleichen Verhältnis stehen und folgende Ähnlichkeitsbedingungen erfüllen [24]:

1. geometrische Ähnlichkeit; in beiden Strömungen sollen die Durchmesser der Gutteilchen d_K und der Förderrohre d_R verhältnisgleich sein.
2. Reynoldsche Ähnlichkeit

$$Re = \frac{d_K v_L \rho_L}{\eta} = \frac{d_K v_L}{\nu} = \text{const.}$$

3. Froudesche Ähnlichkeit

$$Fr = \frac{v_L}{\sqrt{d_K g}} = \text{const.}$$

4. Gutbeladungsähnlichkeit

$$\mu = \text{const.}$$

5.1.3 Ermittlung der Reibungsbeiwerte

Unter den Einflüssen, die die Gleichmäßigkeit der Körnerfolge bei der pneumatischen Förderung beeinflussen, ist auch die Haft- und Gleitreibung zwischen Körnern und der Schlauch- bzw. Rohrwand zu nennen [29, 24]. Schon früh hat man erkannt, daß die in gleichen Abständen in eine Saatleitung hineingeworfenen Körner auf ihrem Wege bis zum Austritt verschieden große Verzögerungen infolge der Reibung zwischen den Körnern und der Leitungswand erleiden. Eine anfängliche Gleichmäßigkeit der Körnerfolge wird dadurch stark gestört [16]. *Bainier* [30] schlug schon 1947 vor, die Saatleitung bei den Einzelkornsärgäten abzuschaffen und das Saatzuteilungsorgan direkt über dem Säschar anzubringen.

Um eine Kenntnis von den Haft- und Gleitreibungsbeiwerten bei den unterschiedlichen Schlauchmaterialien für mit Eisenpulver beklebte und normal gebeizte Körner zu erhalten, reichten die in der Literatur beschriebenen Methoden [26, 31, 32, 33] nicht aus. Wohl hat *Barth* [24] eine Methode zur Feststellung der Reibungskräfte beim Aufprall von Festteilchen auf die Wandung einer rotierenden Scheibe beschrieben, doch wurde für diese Untersuchungen eine einfachere Methode benutzt.

In **Bild 7** sieht man eine schiefe Ebene, auf der das zu untersuchende Schlauchmaterial aufgebracht ist und die in ihrer Steigung verändert werden kann. Der Tangens des Winkels zwischen der Horizontalen und der schiefen Ebene, bei dem das Korn aus der Ruhelage in Bewegung gerät, ist der Haftreibungsbeiwert, während der Tangens desjenigen Winkels, bei dem das gleitende Korn wieder in Ruhe kommt, dem Gleitreibungsbeiwert entspricht.

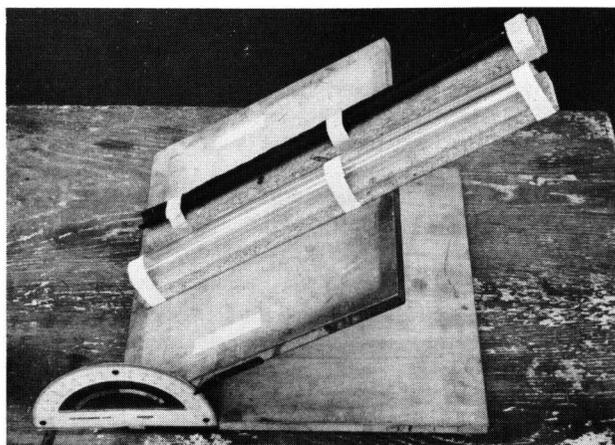


Bild 7. Schiefe Ebene zur Bestimmung der Haft- und Gleitreibungsbeiwerte von Maiskörnern auf verschiedenen Schlauchmaterialien.

Tafel 2 zeigt die Mittelwerte aus diesen Untersuchungen für jeweils 100 Körner der Sorte Perdux mit und ohne Eisenpulver und bei Benutzung eines PVC-Schlauches bzw. eines PE-Schlauches. Man sieht, daß sich die Schlauchmaterialien deutlich in ihren Reibungsbeiwerten unterscheiden. Man sieht auch, daß das mit Eisenpulver belegte Material in seinen Reibungsbeiwerten etwas höher liegt als das nur normal gebeizte Kornmaterial. Es wurden bei den folgenden Versuchen ausschließlich mit Eisenpulver beklebte Körner benutzt, die untereinander in ihren Werten verglichen wurden, so daß der Unterschied der Reibungsbeiwerte zwischen gebeizten und mit Eisenpulver beklebten Kornmaterialien, als Versuchskonstante betrachtet, die Verwendbarkeit der Versuchsergebnisse nicht beeinträchtigt.

Schlauchmaterial	Haftreibungsbeiwert Körner		Gleitreibungsbeiwert Körner	
	mit Eisenpulver belegt	nur gebeizt	mit Eisenpulver belegt	nur gebeizt
Polyäthylen PE	0,71	0,65	0,59	0,51
Polyvinylchlorid PVC	1,04	0,89	0,94	0,68

Tafel 2. Reibungsbeiwerte der mit Eisenpulver belegten und nur gebeizten Körner beim PE- bzw. PVC-Schlauch. Mittelwerte von jeweils 100 Körnern der Sorte Perdux.
GD 5 % $\hat{=}$ 0,018
GD 1 % $\hat{=}$ 0,023

5.2 Messung der Gleichmäßigkeit der Körnerfolge bei verschiedenen Einflußfaktoren

Das Ziel praktischer Versuche war die Feststellung der quantitativen Veränderungen in den Abständen einer Körnerfolge bei einer pneumatischen Förderung unter dem Einfluß unterschiedlicher Förderluftgeschwindigkeit, Art der Förderstrecke, gerade und gekrümmt, Art des Schlauchmaterials, Neigung der Förderstrecke, Schlauchdurchmesser, Kornmasse und -form, Kornklassierung, Kornzahl pro Sekunde.

5.2.1 Förderluftgeschwindigkeit

Um den Einfluß der Förderluftgeschwindigkeit auf die Gleichmäßigkeit der Körnerfolge festzustellen, ausgedrückt durch den Variationskoeffizienten Δ_s , wurden Maiskörner der Sorte Perdux in eine gerade gestreckte waagerechte Schlauchleitung von 2,50 m Länge und 20 mm lichter Weite durch die Zellenschleuse eingebracht und bei verschiedenen mittleren Luftgeschwindigkeiten v_{Lm} mittels der Induktionsspulen beobachtet. An Schlauchmaterialien standen die beschriebenen Schläuche aus Polyäthylen (PE) und Polyvinylchlorid (PVC) zur Verfügung.

Die durch eine Flugförderung gekennzeichnete Bewegung der Einzelkörner [23] wird durch die schon erwähnten an den Körnern angreifenden Luftkräfte hervorgerufen. Das Gewicht und die Trägheit des Kornes sowie die Stöße an der Schlauchinnenwand und die Reibung bremsen die Bewegung. Bei großen mittleren Luftgeschwindigkeiten werden die Körner gleichmäßig heftig an die inneren Schlauchwandungen anschlagen, **Bild 8**, oben. Bei niedrigen mittleren Luftgeschwindigkeiten kommt es dadurch zu einer weitgehenden Entmischung zwischen Luft und Körnern. Dies wirkt sich so aus, daß sich die Körner in kleinen Sprüngen nur über die unteren Innenwandungsflächen bewegen, **Bild 8**, Mitte, und bei

noch kleineren Luftgeschwindigkeiten sich nur auf dem Boden der Schlauchinnenwand entlang fortbewegen oder sogar liegenbleiben, Bild 8, unten, was bei einem durchsichtigen PVC-Schlauch während der Versuche optisch beobachtet werden konnte. Aus der Auftragung der Ergebnisse, Bild 9, sieht man deutlich, daß die Gleichmäßigkeit der Körnerfolge, ausgedrückt durch den Variationskoeffizienten Δ_s , mit zunehmender mittlerer Luftgeschwindigkeit bei beiden Schlaucharten besser wird.

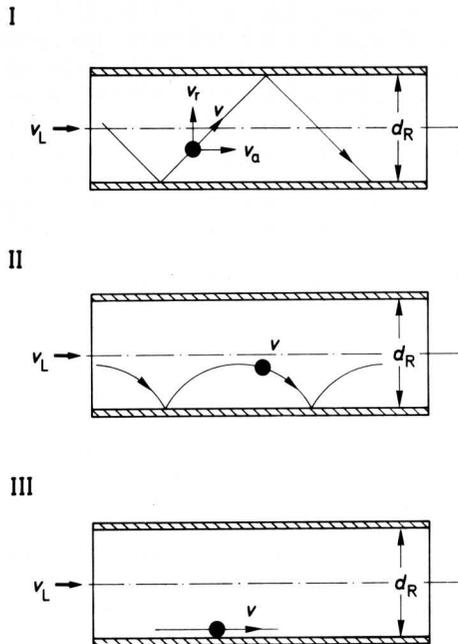


Bild 8. Mögliche Bewegungsbahnen von Einzelkörnern (nach Welsch [23]).

- I: Anschlag an gegenüberliegenden Rohrwandseiten
 $v_r^2/2g > d_R$
 II: Sprünge an der unteren Rohrwand
 $v_r^2/2g < d_R$
 III: Rutschen auf der unteren Rohrwand
 $v_r = 0$

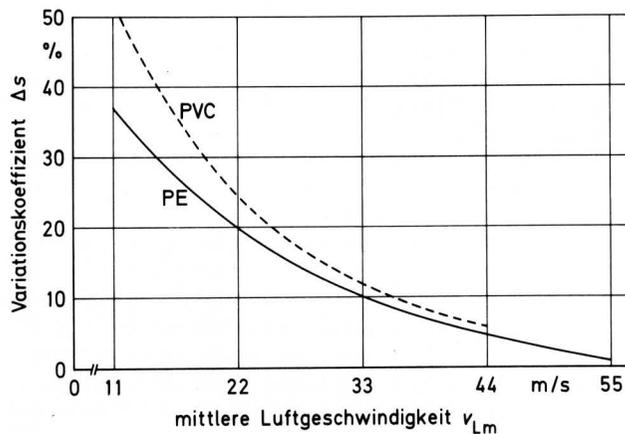


Bild 9. Abweichung der zeitlichen Kornabstände, ausgedrückt durch den Variationskoeffizienten Δ_s , in Abhängigkeit von der mittleren Luftgeschwindigkeit v_{Lm} für verschiedene Schlauchmaterialien.

Waagerechte Förderstrecke, Länge 2,5 m, lichte Weite 20 mm.
 Kornfolge: 10 s^{-1} , Sorte: Perdux
 Statistisch gesicherte Differenzen im Variationskoeffizienten bei einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 5 % (GD 5 %) bzw. von 1 % (GD 1 %) für den Vergleich der Materialien

GD 5 %	$\Delta_s = 3,81 \%$	GD 1 %	$\Delta_s = 5,09 \%$
für die Luftgeschwindigkeit			
GD 5 %	$\Delta_s = 4,99 \%$	GD 1 %	$\Delta_s = 3,81 \%$

Die Reibung verursacht einen Verlust an Bewegungsenergie der Körner, da die Körner häufiger an die Rohrwand anschlagen, hier reflektiert werden und dabei einen Teil ihrer Geschwindigkeit verlieren. Dieser Geschwindigkeitsverlust nimmt von langsamen zu höheren Luftgeschwindigkeiten zuerst ständig zu, um dann bei höheren Werten einen vom Fördergut abhängigen konstanten Wert anzunehmen [24].

Die Sinkgeschwindigkeit des Kornes wird mit kleiner werdender Luftgeschwindigkeit größer. Dies bedeutet auch, daß der Luftwiderstand des Kornes abnimmt, d.h. mit abnehmender Froudescher Zahl und zunehmender Materialbelastung tritt eine Entmischung von Material und Förderluftstrom ein. Der Anstieg des Reibungsverlustes mit zunehmender Entmischung ist auf den Einfluß der Normalkraft des Kornes am Schlauchboden, die bei abnehmendem Auftrieb zunimmt, und der dadurch bedingten zunehmenden Reibung an der Rohrwand zurückzuführen.

5.2.2 Art der Förderstrecke

5.2.2.1 Länge der Förderstrecke

Auch die Länge der Förderstrecke bzw. die Schlauchlänge hat einen Einfluß auf die Gleichmäßigkeit der Körnerfolgen. Bei niedrigen mittleren Luftgeschwindigkeiten ist der Luftwiderstand W_L gering und somit sind auch die Beschleunigungskräfte klein und das Korn wird beim Einfallen in die Schlauchleitung nur langsam beschleunigt. Die mittlere Korngeschwindigkeit ist ebenfalls gering und zeigt eine relativ große Streuung [34].

Bei längeren Förderstrecken erhöht sich die Zahl der Reibungs- und Stoßvorgänge und damit wird die Gleichmäßigkeit der Körnerfolge zunehmend gestört. Steigt jedoch die Korngeschwindigkeit, werden – wie oben gesagt – auch die Reibungskräfte relativ abnehmen und schließlich einen konstanten Wert annehmen.

Dabei konnte beobachtet werden, daß nicht nur die rein mechanische Reibung mit dem Kunststoffmaterial eine bremsende Wirkung ausübt, sondern auch eine elektrische Ladung bremsenden Einfluß hat, die so groß sein kann, daß sie im statischen Versuch ein Korn bei einer Schlauchneigung von bis zu 35 % entgegen der Gleitreibung eine kleine Strecke aufwärts zurückziehen kann.

5.2.2.2 Waagerechter Rohrverlauf

Bild 10 zeigt den Einfluß der Länge der Förderstrecke und der damit verbundenen Reibung auf die Gleichmäßigkeit der Körnerfolge. Demnach verschlechtert sich die Gleichmäßigkeit bei gleicher mittlerer Luftgeschwindigkeit mit länger werdender Förderstrecke. Der Einfluß der unterschiedlichen Luftgeschwindigkeit wird ebenfalls sichtbar: mit geringer werdender Luftgeschwindigkeit tritt eine Verschlechterung in der Gleichmäßigkeit der Körnerfolge ein. Außerdem zeigt sich der Einfluß der unterschiedlichen Gleitreibungswerte einschließlich des hier nicht eingehender untersuchten Einflusses der elektrischen Ladung: das Schlauchmaterial PE ist in allen Fällen günstiger als das Schlauchmaterial PVC.

Bei einer mittleren Luftgeschwindigkeit von $v_{Lm} = 11 \text{ m/s}$ und einem PVC-Schlauch zeigt sich ein Maximum des Variationskoeffizienten Δ_s bei 2 m Förderstrecke. Die Ursache für dieses Maximum und den anschließend wieder abnehmenden Variationskoeffizienten ist wohl darin zu sehen, daß die Stoß- und Reibungsvorgänge zwar eine gleichmäßige Körnerfolge stören, daß sie aber bei stark ungleichmäßigen Verhältnissen auch ausgleichend auf die Verteilung wirken können [9].

Rein theoretisch wird beim Aufprall auf die Wand das Korn und auch die Wand leicht zusammengedrückt, gleichzeitig gleitet das Korn an der Wand. Dabei wirkt außer der durch die Änderung der Normalgeschwindigkeit v_r verursachten Normalkraft eine axiale Reibkraft, die das Korn in Drehung versetzt, so daß es sowohl gleitet als auch rollt, **Bild 11**. Infolge der durch die halbelastische oder elastische Verformung auftretenden Rückstellkräfte und unter gleichzeitiger Wirkung von Zentrifugalkräften infolge der Drehung kann es mit größerer Normalgeschwindigkeit v_{r2} von dem Auftreffpunkt wegfliegen als beim Aufprall vorhanden war. Die

axiale Geschwindigkeitskomponente im Zustand 2, v_{a2} , muß dafür aber kleiner werden, da die gesamte kinetische Energie des Kornes infolge der Energieverluste durch Reibung und Verformung abnimmt [28].

Aus den Versuchen ist zu ersehen, daß das Korn beim elastischen PVC-Schlauch in der axialen Richtung stärker gebremst wird als beim PE-Schlauch.

Der in Bild 10 gezeigte Unterschied zwischen diesen beiden Materialien ist bei niedrigen Luftgeschwindigkeiten signifikant, bei hohen und mittleren Luftgeschwindigkeiten dagegen nicht.

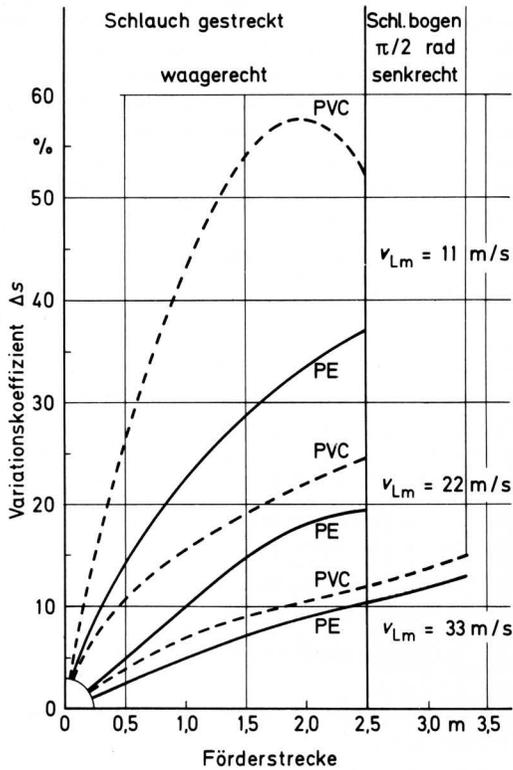


Bild 10. Variationskoeffizient Δs der Kornabstände in Abhängigkeit von der Förderstrecke, verschiedene Ausbildung der Strecke und verschiedene Materialien.

Mittlere Luftgeschwindigkeit $v_{Lm} = 33 \text{ m/s}$, Radius des Rohrbogens 53 cm. Lichte Weite 20 mm, Kornfolge 10 s^{-1} , Sorte Perdux für die Förderstrecke GD 5 % $\Delta s = 3,28 \%$ GD 1 % $\Delta s = 4,53 \%$

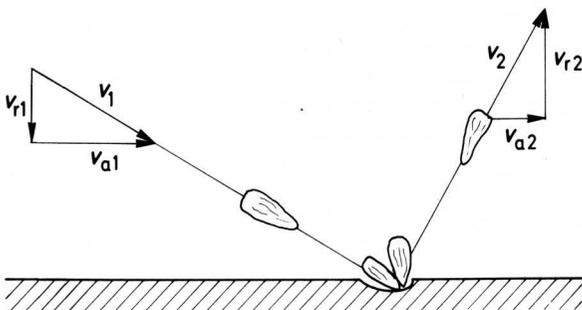


Bild 11. Schematische Darstellung der Drehung eines Kornes beim Aufprall auf eine elastische Wand bei kleinem Aufprallwinkel (nach *Muschelknautz* [28]).

5.2.2.3 Schlauchbogen

Anders dagegen, wenn die Schlauchstrecke nicht gerade gestreckt, sondern in einem Bogen verläuft. Infolge der Zentrifugalkräfte werden die Körner an die Bogenaußenseite gedrückt und daher wohl andere gleitende oder springende Bewegungen vollführen. Auch können die Reibungskräfte sich durch die zusätzlichen Zentrifugalkräfte erhöhen.

In der Versuchsanlage wurde ein waagrecht liegender Rohrbogen mit einer Änderung der Förderrichtung von $1,32 \pi \text{ rad}$ (238°) und nach einer anschließenden waagerechten Förderstrecke ein Rohrbogen, der in einer vertikalen Ebene liegt, mit einer Abweichung der Förderrichtung von $\pi/2 \text{ rad}$ (90°) untersucht. Die mittlere Luftgeschwindigkeit betrug $v_{Lm} = 33 \text{ m/s}$.

Es zeigte sich, **Bild 12**, daß der Variationskoeffizient als Maß für die Gleichmäßigkeit der Körnerfolge sich bei dem PE-Material gegenüber einem gestreckten Rohrverlauf – wie in Bild 10 gezeigt – praktisch nicht verändert, während für das elastische PVC-Material mit gleichzeitig höherem Gleit- und Haftreibungsbeiwert eine deutliche Verschlechterung gegenüber dem gestreckten Rohr auftritt. Das elastischere Material zeigt also einen deutlich ungünstigeren Einfluß auch bei gekrümmtem Schlauchverlauf, wie er bei der eingangs erwähnten Maschine vorkommt.

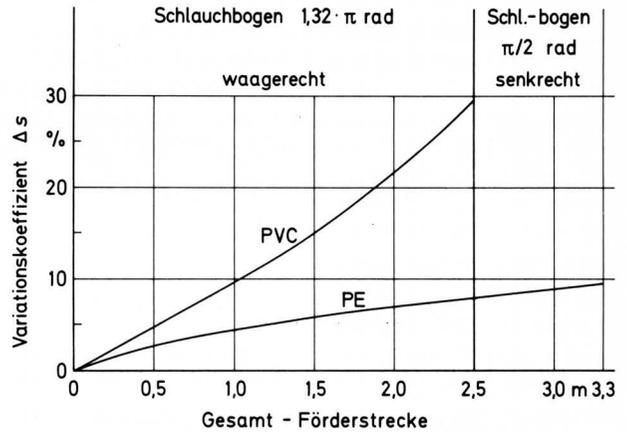


Bild 12. Variationskoeffizient Δs der Kornabstände in Abhängigkeit von der Förderstrecke bei waagrecht und senkrecht Bogenstück.

Mittlere Luftgeschwindigkeit $v_{Lm} = 33 \text{ m/s}$, lichte Weite 20 mm, Kornfolge 10 s^{-1} , Sorte Perdux für die Förderstrecke GD 5 % $\Delta s = 3,79 \%$ GD 1 % $\Delta s = 2,84 \%$

5.2.2.4 Geneigte Förderstrecke

Nicht nur Schlauchbögen, auch Neigungen werden bei einer Schlauchleitung vorkommen; um diesen Einfluß kennenzulernen, wurde bei einer gerade gestreckten Schlauchleitung von 2,5 m die Veränderung der Variationskoeffizienten bei einer Schlauchneigung von $\pi/12 \text{ rad}$ (15°) und $\pi/6 \text{ rad}$ (30°) nach unten und einer Schlauchsteigung von $\pi/12 \text{ rad}$ (15°) nach oben untersucht. Derartige Steigungen sind bei dem erwähnten neuen pneumatischen Einzelkornsäger vorhanden.

Sowohl bei der ansteigenden Förderleitung, **Bild 13**, als auch bei der abfallenden Förderleitung zeigt sich eine Verbesserung der Variationskoeffizienten gegenüber der horizontalen Förderrichtung. Die Sprungweite l_{KS} läßt sich nach *Welschhof* [23] berechnen, wobei der Rohrdurchmesser die Sprunghöhe begrenzt.

$$l_{KS} = 2 \frac{v_{am} v_{r1}}{g \cos a} \left(1 - \sqrt{\frac{1 - 2 g d_R \cos a}{v_{r1}^2}} \right)$$

S.a. Bild 11.

Der Steigungs- bzw. Gefällewinkel geht in diesem Ausdruck ein. Mit zunehmendem Winkel wird die Sprungweite größer. Gleichzeitig ist aber auch die steigende oder fallende Richtung durch das Vorzeichen berücksichtigt. Demnach wird bei gleichem Steigungs- bzw. Gefällewinkel bei abfallender Förderrichtung die Sprungweite größer als bei ansteigender Förderrichtung, was sich in den Ergebnissen für die mittleren Luftgeschwindigkeiten $v_{Lm} = 33$ und $v_{Lm} = 44 \text{ m/s}$ deutlich ausgedrückt.

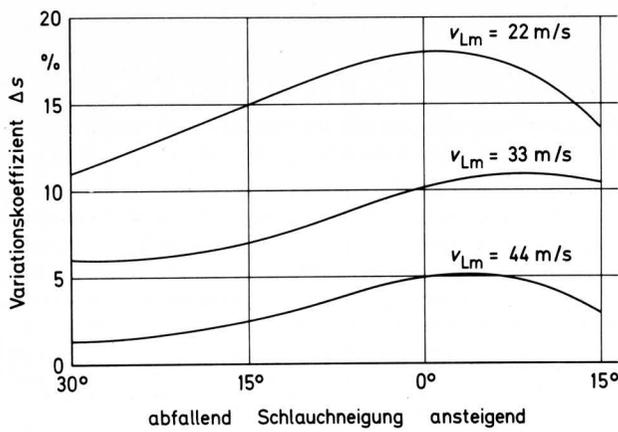


Bild 13. Variationskoeffizient Δs der Kornabstände in Abhängigkeit von der Neigung einer geraden Förderstrecke von jeweils 2,5 m.

PE-Schlauch, lichte Weite 20 mm, Kornfolge 10 s^{-1} , Sorte Perdux für die:

Neigung		Luftgeschwindigkeit
GD 5 %	$\Delta s = 2,08 \%$	GD 5 % $\Delta s = 1,81 \%$
GD 1 %	$\Delta s = 1,55 \%$	GD 1 % $\Delta s = 1,35 \%$

5.2.2.5 Schlauchdurchmesser

Auch der Einfluß des Schlauchdurchmessers läßt sich experimentell zeigen. Zwei PVC-Schläuche mit 20 und 24 mm lichter Weite bei 2,5 m gerader waagerechter Förderstrecke wurden hierzu benutzt. Entsprechende PE-Schläuche waren leider nicht erhältlich.

Bild 14 zeigt, daß bei dem Schlauch größeren Durchmessers mit Ausnahme höherer mittlerer Luftgeschwindigkeiten größere Variationskoeffizienten auftreten und damit eine schlechtere Abstandsverteilung vorliegt als bei dem Schlauch geringeren Durchmessers.

Die Ergebnisse zeigen, daß man bei gleichen mittleren Luftgeschwindigkeiten, aber unterschiedlichen Durchmessern der Förderleitung nicht ähnliche Ergebnisse bezüglich der Gleichmäßigkeit der Körnerfolge erwarten darf, es sei denn, es handelt sich um recht hohe Luftgeschwindigkeiten. Zu erklären ist dies durch die Luftgeschwindigkeitsverteilung, die nach der von *Prandtl* angegebenen $1/7$ -Potenzgleichung [15] zu:

$$\frac{v_L}{v_{Lmax}} = \left(\frac{2y}{d_R} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{mit } n = 7$$

zu errechnen ist.

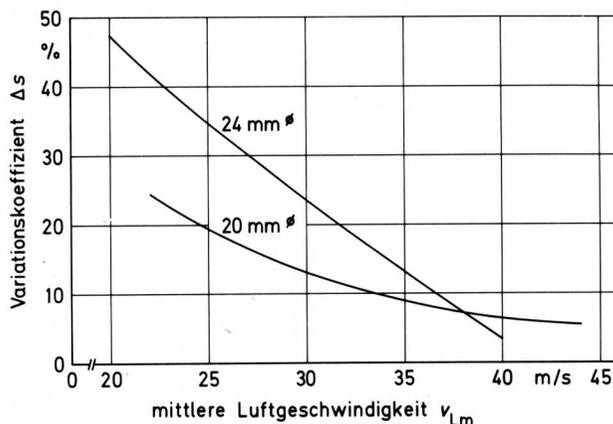


Bild 14. Variationskoeffizient Δs der Kornabstände in Abhängigkeit von der mittleren Luftgeschwindigkeit v_{Lm} bei lichten Weiten von 20 und 24 mm.

Waagerechte, gerade Förderstrecke von 2,5 m eines PVC-Schlauches. Kornfolge 10 s^{-1} , Sorte Perdux für die Luftgeschwindigkeit

GD 5 %	$\Delta s = 4,43 \%$
GD 1 %	$\Delta s = 5,97 \%$

Demnach ist die Luftgeschwindigkeit an einem Punkt mit dem Abstand y von der Wand für einen Schlauch größeren Durchmessers kleiner als bei einem engen Schlauch, **Bild 15**. *Flatow* und *Siegel* [27] haben festgestellt, daß ein in der Rohrleitung liegendes relativ großes Maiskorn gegenüber dem relativ kleinen Weizenkorn mit abnehmendem Rohrdurchmesser bei gleicher mittlerer Luftgeschwindigkeit mehr in dem Bereich höherer Luftgeschwindigkeit liegt. Außerdem wirkt sich im engen Rohr eine Ablagerung von Körnern stärker auf die örtliche Luftgeschwindigkeit aus als im weiten Rohr.

Die im Verhältnis zur Schlauchquerschnittsfläche bei 20 mm ϕ relativ großen Maiskornabmessungen verstärken die Annahme, daß die Einzelkornförderung in solch engen Leitungen z.T. als Schubförderung [23] bezeichnet werden kann. Bei größeren Schlauchdurchmessern geht die Bedeutung der Schubförderung allmählich zurück, das Korn wird mehr und mehr durch die schon besprochenen sekundären Auftriebskräfte gefördert. Von den notwendigen Ähnlichkeitsbedingungen ist also zumindest die geometrische Bedingung $d_K/d_R = \text{const.}$ nicht erfüllt.

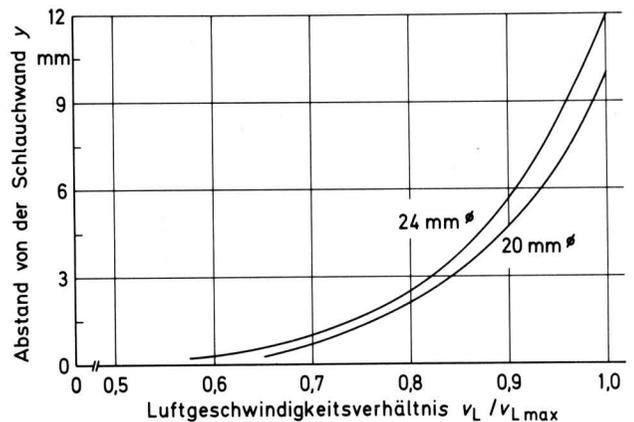


Bild 15. Luftgeschwindigkeitsprofil bei lichten Weiten von 20 und 24 mm.

5.2.2.6 Kornmasse und Kornform

Wie bereits mehrfach erwähnt, ist auch die Kornmasse und die Kornform von Einfluß auf das Förderverhalten in einer solchen pneumatischen Schlauchleitung. Die Versuche wurden auf 4 Maisarten ausgedehnt, die sich nach Form und Kornmasse deutlich voneinander unterscheiden, wie dies aus *Tafel 1* zu ersehen ist.

Die Ergebnisse in *Tafel 3* zeigen, daß sowohl die Kornform als auch die Kornmasse einen hochsignifikanten Einfluß auf den Variationskoeffizienten und damit auch auf die Gleichmäßigkeit der Kornfolge ausüben. Körner mit geringerer Masse werden schneller beschleunigt, und der Reibungsverlust an der Schlauchwand ist geringer als bei einem Korn mit größerer Masse. Es ist deshalb nicht verwunderlich, daß leichtere Körner eine bessere Gleichmäßigkeit der Kornfolge zeigen als die schwereren. Auch die Form spielt eine Rolle, die mehr die Rollfähigkeit betrifft. Runde Körner halten eine bessere Gleichmäßigkeit der Körnerfolge ein, da die Rollreibung kleiner als die Haft- und Gleitreibung flacher Körner ist. Es

Kornform	mittlere Kornmasse	
	0,245 - 0,248 g	0,372 - 0,385 g
flach	8,3 (Inra früh)	10,3 (Perdux)
rund	4,8 (Anjou)	6,3 (Prior)

Tafel 3. Variationskoeffizient Δs der Kornabstände [%] in Abhängigkeit von Kornform und Kornmasse für einen geraden, waagerechten Schlauch aus Polyäthylen mit 20 mm lichter Weite. GD 1 % $\Delta s = 1,40$; GD 5 % $\Delta s = 1,03$

ist anzunehmen, daß die runden Körner durch Gleiten, Rollen und beim Aufprall an der Schlauchwand eine größere Drehfähigkeit und damit einen größeren Auftrieb im Luftstrom infolge des Magnus-Effektes besitzen.

Wenn auch – wie oben gesagt – die Kornform einen deutlichen Einfluß auf die Gleichmäßigkeit der Kornfolge ausübt, so zeigte sich doch bei einer geraden waagerechten Strecke eines 2,5 m langen PE-Schlauches, daß bei Körnern derselben Sorte Perdux, die einmal eng klassiert, zum anderen unklassiert benutzt wurden, s. Tafel 1, bei einer mittleren Luftgeschwindigkeit $v_{Lm} = 33$ m/s der Variationskoeffizient Δs 10,3 bzw. 11,1 % beträgt und damit keinen signifikanten Unterschied zwischen klassierten und nicht klassierten Körnern aufweist. Wenn also innerhalb des Kornsortiments keine sehr großen Unterschiede in der Masse und in der Kornform vorhanden sind, dürfte eine Klassierung keinen Einfluß auf die Gleichmäßigkeit der Kornfolge ausüben.

5.2.2.7 Gutdurchsatz

Bei Berechnung des Druckverlustes in pneumatischen Förderleitungen berücksichtigt man neben dem Druckabfall der reinen Gasströmung, der durch die Reibungsschubspannung an der Wand entsteht, auch einen zusätzlichen Druckabfall infolge der vom Gas auf die festen Teilchen übertragenen Kräfte [28].

Einen weiteren großen Einfluß auf das Luftgeschwindigkeitsprofil in der Leitung hat der Gutdurchsatz. Mit zunehmender Gutbeladung wandert die Zone höchster Luftgeschwindigkeit von der Rohrmitte zur oberen Rohrwand hin. Die Luftgeschwindigkeiten in der unteren Rohrhälfte gehen dabei zurück [23].

Der Strömungszustand ist – wie oben angeführt – von der Froudeschen Kennzahl Fr und der Gutbeladung μ abhängig.

Die bisher besprochenen Versuche wurden mit einem Körnerdurchsatz von 10 Körnern/s durchgeführt, wie er bei einer Aussaat mit 20 cm Kornabstand und 2 m/s Fahrgeschwindigkeit auftritt. Die Perdux-Körner (klassiert) ergaben bei einer mittleren Luftgeschwindigkeit von 33 m/s eine Materialbeladung von $\mu = 1,2$, wenn 10 Körner/s gefördert werden. Erhöht man den Körnerdurchsatz auf das Doppelte, auf 20 Körner/s, so erhält man eine Materialbeladung von $\mu = 2,4$. Diese Werte treten in der Praxis auf bei 10 cm Kornabstand und 2 m/s Fahrgeschwindigkeit.

Bild 16 zeigt, daß eine Verdoppelung des Körnerdurchsatzes von 10 auf 20 Körner/s – eine Förderung von Körnern, deren Masse 2,4 mal so groß ist wie die erforderliche Förderluftmasse – eine hochsignifikante Verschlechterung der Gleichmäßigkeit der Körnerfolge nach sich zieht. Der größere Körnerdurchsatz führt u.a. zur Entmischung mit dadurch größerer Reibung und größerem Variationskoeffizienten.

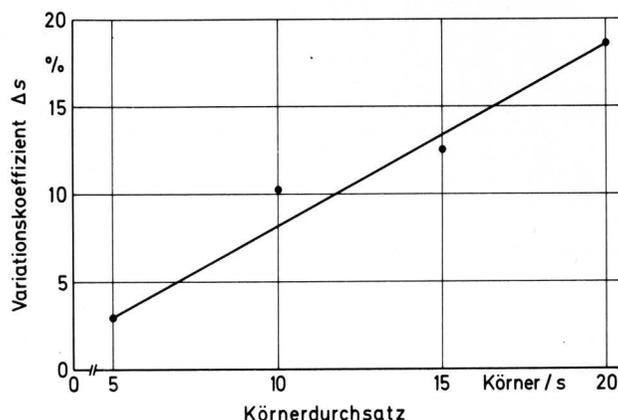


Bild 16. Variationskoeffizient Δs der Kornabstände in Abhängigkeit von der Kornfolge oder Kornzahl pro Zeiteinheit.

Waagerechte, gerade Förderstrecke von 2,5 m eines PE-Schlauches.

Mittlere Luftgeschwindigkeit $v_{Lm} = 33$ m/s, Sorte Perdux

für die Kornfolge: GD 5 % $\Delta s = 4,66$ %
GD 1 % $\Delta s = 6,33$ %

6. Zusammenfassung

Bei einer neuartigen pneumatischen Einzelkornsämaschine werden die Körner an einer zentralen Stelle einzeln erfaßt und über Schlauchleitungen unterschiedlicher Länge und Krümmung mit Hilfe eines Förderluftstromes jeweils einem Sächar zugeleitet.

Zur Untersuchung der Korngeschwindigkeit pneumatisch in einer Schlauchleitung geförderter Maiskörner wurde ein induktives Meßverfahren entwickelt und an dieser Einzelkornsämaschine eingesetzt. Es gelang damit, Aussagen über die Gleichmäßigkeit der Körnerfolge innerhalb der Schlauchleitung abhängig von den verschiedensten Einflußfaktoren zu erarbeiten.

Dabei wurden sehr verschiedene physikalische Gesetzmäßigkeiten berücksichtigt, die einen Einfluß auf die Gleichmäßigkeit einer Einzelkornfolge in einer pneumatischen Schlauchleitung haben. Darüber hinaus konnten an Versuchsergebnissen teils diese physikalischen Gesetzmäßigkeiten bestätigt, teils Erfahrungswerte über die Einflüsse, die die Kornfolge in einer solchen Schlauchleitung stören, aufgezeigt werden.

Alle diese Überlegungen und Ergebnisse sagen nur wenig darüber aus, wie die tatsächlichen Abstände der Körner im Boden aussehen, wenn diese von einem zentralen Einzelerfassungsorgan über eine pneumatische Schlauchleitung zu den Säscharen gefördert werden. Diese Fragen sind Gegenstand weitergehender Untersuchungen.

Verwendete Formelzeichen

A	Querschnittsfläche der Rohr- oder Schlauchleitung
A_W	Windungsfläche der Spule
c_W	Widerstandsbeiwert eines umströmten Kernes
c_M	Auftriebswert für die Magnuskraft
d_K	Durchmesser der Gutteilchen
d_R	Durchmesser der Förderleitung
F_K	Querschnittsfläche eines Kernes senkrecht zur Anströmrichtung
Fr	Froudesche Kennzahl
g	Fallbeschleunigung
G	geförderte Gutmasse
G_K	einwirkende Gewichtskraft auf das Korn
l	Schlauchlänge
l_S	Spulenlänge
l_{KS}	Sprungweite des Korns
L	Selbstinduktivität
m_K	Kornmasse
p_{dyn}	dynamischer Luftdruck
P_M	Magnuskraft
P_S	sekundäre Auftriebskraft
Re	Reynoldssche Kennzahl
s; Δs	Variationskoeffizient
v_L	Luftgeschwindigkeit
v_{Lmax}	max. Luftgeschwindigkeit
v_{Lm}	mittlere Luftgeschwindigkeit
v	Korngeschwindigkeit
v_r	Korngeschwindigkeit in radialer Richtung des Schlauches
v_a	Korngeschwindigkeit in Achsenrichtung des Schlauches
v_{am}	mittlere Korngeschwindigkeit in Achsenrichtung des Schlauches
W	Windungszahl der Spule
W_L	Widerstand des Kernes im Luftstrom
W_R	Kornreibungskraft
y	Abstand von der Schlauchwand
α	Neigungswinkel des Schlauches gegen die Horizontale
ν	kinematische Zähigkeit
η	dynamische Zähigkeit
μ	Gutbeladung, Verhältnis von Gutmasse zu Luftmasse
μ_r	relative Permeabilität
μ_0	absolute Permeabilität
ρ_L	Luftdichte
λ_Z	Widerstandsbeiwert

- Bücher sind durch ● gekennzeichnet
- [1] *Mahlstedt, J.*: Pneumatische Saatgutzuteilung bei Sämaschinen für die Getreidebreitsaat. Diss. Bonn 1971.
- [2] *Zähres, W.*: Untersuchungen zur pneumatischen Saatgutzuteilung. Diss. Bonn 1974.
- [3] *Frizen, H.W., W. Stieger u. W. Brinkmann*: Pneumatische Maissäegeräte in der Erprobung. Landtechnik Bd. 29 (1974) Nr. 3, S. 110/15.
- [4] *Hempsch, K. u. W. Brinkmann*: Pneumatische oder mechanische Einzelkornsäegeräte für die Rübenausaat. Landtechnik Bd. 30 (1975) Nr. 5, S. 223/29.
- [5] *Pichenez, J.*: Essais comparatifs de semoirs und Enquete sur les graines monogermes genetiques nues. In: Publications de l'institut technique francais de la betterave industrielle; compte rendu des travaux effectués en 1972, Paris.
- [6] *IH develops air force planter*. Agricultural Engineering, Bd. 52 (1971) Nr. 4, S. 182.
- [7] *Bauman, J.L. u. V.A. Erickson*: The "International" 400 Cyclo Planter a pneumatic system. ASAE Technical paper ML 71-A 612.
- [8] *Estler, M.*: Unveröffentlichter Zwischenbericht über den Einsatz der pneumatischen Einzelkornsämaschine "IHC-Cyclo-Planter", Sept. 1974.
- [9] ● *Dencker, C.H.*: Handbuch der Landtechnik, S. 652/53, Hamburg: Verlag Paul Parey 1961.
- [10] *Horne, S.B.*: Accuracy of seed placement of corn planters. ASAE-Paper Nr. 73-148.
- [11] *Brenner, W.G.*: Beiträge zur Kenntnis des Sortiervorganges bei der Sichtung von Saatgetreide durch Windströme. RKTl, H. 2 (1928).
- [12] *Gasterstädt, J.*: Experimentelle Untersuchung des pneumatischen Fördervorganges. VDI-Forschungsheft 265 (1924).
- [13] *Segler, G.*: Untersuchungen an Körnergebläsen und Grundlagen für ihre Berechnung. Mannheim: Verf. Selbstverlag 1934.
- [14] *Rühle, K.*: Die Mineraldüngerverteilung unter besonderer Berücksichtigung pneumatischer Streugeräte. Diss. Bonn 1975.
- [15] ● *Eck, B.*: Technische Strömungslehre, S. 113, 423. Berlin: Springer-Verlag 1966.
- [16] *Kühne, G.*: Das Problem der maschinellen Einzelkornsäat. Z. VDI Febr. 1924, S. 113.
- [17] *Meijer, E.N.*: Pneumatische Maissäsysteme sind wenig abhängig von der Saatgutfraktionierung. Landbouwmechanisatie, Bd. 23 (1972) S. 75/79.
- [18] *Stieger, W.*: Einzelkornfassung pneumatischer Maissäegeräte. Diss. Bonn 1974.
- [19] *Petersen, H.*: Messung der Teilchengeschwindigkeit in pneumatischen und in Wurförderanlagen mit Hilfe von Isotopen. Grundl. Landtechnik Bd. 24 (1974) Nr. 2, S. 64/67.
- [20] *Rall, W. u. O. Riedel*: Geschwindigkeitsmessungen an feststoffbeladenen Gasströmen mit bruttoradioaktivierten Testteilchen. Chem.-Ing.-Techn. Bd. 37 (1965) Nr. 4, S. 418/22.
- [21] *Wavra, A.*: Geschwindigkeitsverlauf bei pneumatischer Förderung von körnigem Gut. Zemedelska technika Bd. 11 (1965) Nr. 10, S. 601/22 und Bd. 12 (1966) Nr. 5, S. 251/72.
- [22] *Hehn, K.-H.*: Messung der Geschwindigkeit eines mit Preßluft beförderten Kies-Sand-Gemisches. Hottinger Meßtechnische Briefe (1968) Nr. 2, S. 28/29.
- [23] *Welschhof, G.*: Pneumatische Förderung bei großen Fördergutkonzentrationen. VDI-Forschungsheft 492, Bd. 28, Düsseldorf: VDI-Verlag 1962.
- [24] *Barth, W.*: Strömungsvorgänge beim Transport von Festteilchen und Flüssigkeitsteilchen in Gasen. Chem.-Ing.-Techn. Bd. 30 (1958) Nr. 3, S. 171/80.
- [25] *Siegel, W.*: Experimentelle Untersuchungen zur pneumatischen Förderung körniger Stoffe in waagerechten Rohren und Überprüfung der Ähnlichkeitsgesetze. VDI-Forschungsheft 538, Bd. 36, Düsseldorf: VDI-Verlag 1970.
- [26] *Barth, W.*: Strömungstechnische Probleme der Verfahrenstechnik. Chem.-Ing.-Techn. Bd. 26 (1954) Nr. 1, S. 29/34.
- [27] *Flatow, J. u. W. Siegel*: Pneumatische Förderung von Körnermais in waagerechten Rohren. Grundl. Landtechnik Bd. 19 (1969) Nr. 4, S. 125/28.
- [28] *Muschelknautz, E.*: Theoretische und experimentelle Untersuchungen über die Druckverluste pneumatischer Förderleitungen unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses von Gutreibung und Gutgewicht. VDI-Forschungsheft 476, Bd. 25, Düsseldorf: VDI-Verlag 1959.
- [29] *Segler, G.*: Pneumatic grain conveying. Braunschweig: Verf. Selbstverlag 1951.
- [30] *Bainer, R.*: Precision planting equipment. Agr. Engng. Bd. 28 (1947) Nr. 2, S. 49/54.
- [31] *Brubaker, J.E. u. J. Pos*: Determining static coefficients of friction of grains on structural surfaces. Transactions ASAE Bd. 8 (1965) Nr. 1, S. 53/55.
- [32] *Snyder, L.H., W.L. Roller u. G.E. Hall*: Coefficients of kinetic friction of wheat on various metal surfaces. Transactions ASAE Bd. 10 (1967) Nr. 3, S. 411/13; 419.
- [33] *Stewart, B.R., Q.A. Hossain u. O.R. Kunze*: Friction coefficients of sorghum grain on steel, teflon and concrete surfaces. Transactions ASAE Bd. 12 (1969) Nr. 4, S. 415/18.
- [34] *Fouad, H.A. u. W. Brinkmann*: Geschwindigkeitsverlauf der Maiskörner in einer pneumatischen Schlauchleitung; in Vorbereitung.