

schiebung und plastischer Verformung der Körner und nicht durch die Elastizität der Körner bedingt. Bei größerer Fallhöhe während des Einfüllens würden die Körner von vorn herein schon dichter lagern, und der Strömungswiderstand würde sich mit zunehmender Belastung nur entsprechend dem Einfluß der plastischen Verformung ändern.

Unbedeutender ist der Einfluß der Belastung bei trockenem Mais, Bild 7. Hier liegen die Punkte bei Belastung mit 25 kp und nach der Entlastung ziemlich genau auf einer Kurve. Wenn bei trockenem Mais der Strömungswiderstand in den unteren Schichten größer als in den oberen ist, dann ist das weniger auf die größere Kornbelastung der unteren Schichten als auf die größere Fallhöhe zu Beginn der Einlagerung zurückzuführen.

## 5 Folgerungen für die Maistrocknung

Nach den Ausführungen in Abschnitt 4 kann der Strömungswiderstand bei einer Maisschüttung durch ungünstige Einlagerung der Körner 100% oder 150% höher als im günstigsten Fall liegen. Um den Strömungswiderstand und damit die Gebläseleistung klein zu halten, empfiehlt es sich, den Mais vorzureinigen und von gleichmäßig geringer Fallhöhe sanft einzulagern.

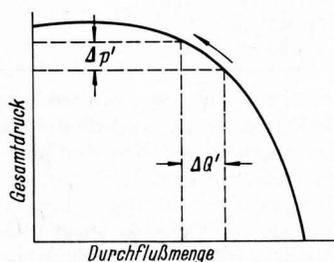


Bild 8. Gebläsekennlinie eines Radialgebläses.

$\Delta p'$  Druckänderung  
 $\Delta Q'$  Durchflußänderung

Bei den gewöhnlich verwendeten Axial- oder Radialgebläsen mit flacher Gebläsekennlinie, Bild 8, ist die geförderte Luftmenge stark druckabhängig. Durch ungünstige Einlagerung und dadurch bedingten hohen Strömungswiderstand sinkt nach Bild 8 die Luftmenge und damit die Trocknungsleistung. Beim Bau von Trocknern empfiehlt es sich, das Gebläse für den Strömungswiderstand bei ungünstigster Einlagerung auszulegen und die erforderliche Luftgeschwindigkeit bei kleinerem Strömungswiderstand durch eine Drosselklappe einzustellen.

DK 621.867.8

# Pneumatische Förderung von Körnermais in waagerechten Rohren

Von J. Flatow und W. Siegel, Hohenheim

Aus den Arbeiten des Instituts für Landtechnik der Universität Hohenheim

Für die Auslegung von pneumatischen Förderanlagen für Körnermais ist es vor allem notwendig, den Druckverlust in der Behälterstrecke, die Stopfgrenze und die Kornbeschädigung zu kennen. Da im Schrifttum hierüber nur unvollständige Angaben vorhanden waren, wurden an vier Meßanlagen mit verschiedenem Rohrdurchmesser Förderversuche mit feuchtem und trockenem Körnermais durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche zeigen, daß sich pneumatische Getreideförderanlagen für die Förderung von Körnermais verwenden lassen.

## 1 Einleitung

Begünstigt durch die Züchtung von neuen Maissorten hat der Maisanbau in Europa in den letzten Jahren stark zugenommen. Nach der Ernte durch den Mähdrescher ist der Mais wegen seines meist hohen Feuchtegehalts noch nicht lagerfähig, sondern muß erst getrocknet werden. Für die dabei notwendigen Förder-

Dipl.-Ing. Jürgen Flatow und Dipl.-Ing. Wolfgang Siegel sind wissenschaftliche Mitarbeiter im Institut für Landtechnik (Direktor: Prof. Dr.-Ing. Georg Segler) der Universität Hohenheim.

Beim Satzrockner mit größerer Schütthöhe, der von einem Punkt aus beschickt wird, nimmt die Fallhöhe der Körner mit wachsender Schütthöhe ab. Dadurch wird nach Abschnitt 4.1 der Strömungswiderstand oben in der Schüttung kleiner als unten. Wird ein derartiger Trockner waagrecht von der Trocknungsluft durchströmt, Bild 9, dann ist die Luftgeschwindigkeit im oberen Teil der Schüttung größer als im unteren. Bis die Trocknung im unteren Teil des Trockners abgeschlossen ist,

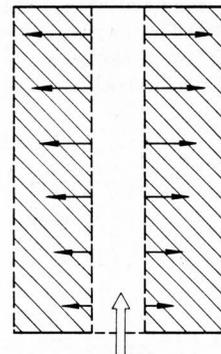


Bild 9. Schema eines Satzrockners mit waagrechttem Luftstrom.

strömt oben ein Teil der Trocknungsluft ungenutzt ins Freie, und die Kornfeuchte wird nach der Trocknung unten größer als oben sein. Deshalb arbeiten Trockner mit senkrechtem Luftstrom besser als Trockner mit waagrechttem, wenn es nicht gelingt, den Strömungswiderstand über die Schütthöhe konstant zu halten.

## 6 Schrifttum

- [1] Barth, W.: Strömungstechnische Probleme der Verfahrenstechnik. Chemie-Ing.-Techn. **26** (1954) Nr. 1, S. 29/34.
- [2] Mathies, H. J.: Der Strömungswiderstand beim Belüften landwirtschaftlicher Erntegüter. Diss. TH Braunschweig 1954 [VDI-Forsch.-heft 454. Düsseldorf: VDI-Verl. 1956].
- [3] Segler, G.: Untersuchungen an Körnergebläsen und Grundlagen für ihre Berechnung. Diss. TH München 1934.
- [4] Shedd, C. K.: Resistance of grains and seeds to air flow. Agric. Engng **34** (1953) Nr. 9, S. 616/19.
- [5] Welschhof, G.: Pneumatische Förderung bei großen Fördergutkonzentrationen. Diss. TH Stuttgart 1962 [VDI-Forsch.-heft 492. Düsseldorf: VDI-Verl. 1962].

vorgänge hat sich bei anderen Getreidearten die pneumatische Förderung bewährt. Bisher sind nur wenige Untersuchungen der pneumatischen Förderung von Körnermais bekannt [1]. In der vorliegenden Arbeit soll deshalb untersucht werden, inwieweit die pneumatische Förderung für den Transport von Körnermais geeignet ist.

## 2 Versuchsdurchführung

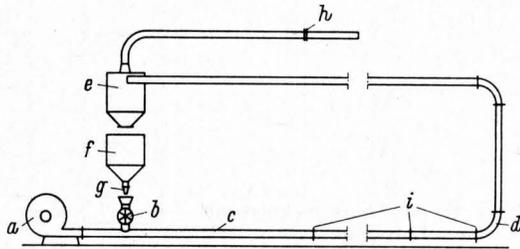
Die pneumatischen Förderversuche wurden an vier mit Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft aufgebauten waagerechten Förderanlagen mit 50, 100, 200 und 400 mm Rohrdurchmesser durchgeführt, Bild 1. Die wichtigsten Daten der Anlagen sind aus Tafel 1 ersichtlich.

Dem vom Gebläse gelieferten Luftstrom wird der Mais durch eine Zellenradschleuse zugeführt. Das Korn-Luft-Gemisch strömt in geraden Rohrstrecken und Krümmern zum Zyklonabscheider, wo die Körner abgeschieden werden. Aus dem Abscheider gelangt das Versuchsgut durch eine Meßdüse wieder in die Rohrleitung. Der Luftdurchsatz wird nach dem Zyklonabscheider mit einer Meßblende nach DIN 1952 gemessen.

Als Fördergut wurde feuchter und trockener, vorgereinigter, durch Mähdrusch geernteter Mais der Sorte Velox verwendet. Die für die pneumatische Förderung wichtigen Korneigenschaften zeigt **Tafel 2**.

Der feuchte Mais hat einen größeren mittleren Korndurchmesser als der trockene Mais, jedoch eine etwas kleinere Korndichte; für feuchten Mais ergibt sich eine etwas größere Schwebegeschwindigkeit als für trockenen.

Beim feuchten Mais ist der Gleitreibungsbeiwert gegen blankes Stahlblech etwa doppelt so groß wie beim trockenen. Dagegen liegt der Stoßfaktor [2] beim trockenen Mais wesentlich höher als beim feuchten.



**Bild 1.** Schema der Meßanlagen.

- a Gebläse
- b Körnerschleuse
- c Rohrleitung
- d Krümmer
- e Zyklonabscheider
- f Zwischenbehälter
- g Auslaufdüse
- h Meßblende
- i Druckmeßstellen

### 3 Druckverluste

In **Bild 2 bis 7** ist der auf die Rohrlänge  $L$  bezogene Druckverlust im Beharrungszustand über der Luftgeschwindigkeit  $v$  bei verschiedenem Gutdurchsatz  $Q_K$  aufgetragen. Im Beharrungszustand ist  $\Delta p/L$  über der Rohrlänge konstant. Um ein Verstopfen der Förderleitung zu vermeiden, wurde nur bei Luftgeschwindigkeiten oberhalb der Stopfgrenze (siehe Abschnitt 4.1) gefördert.

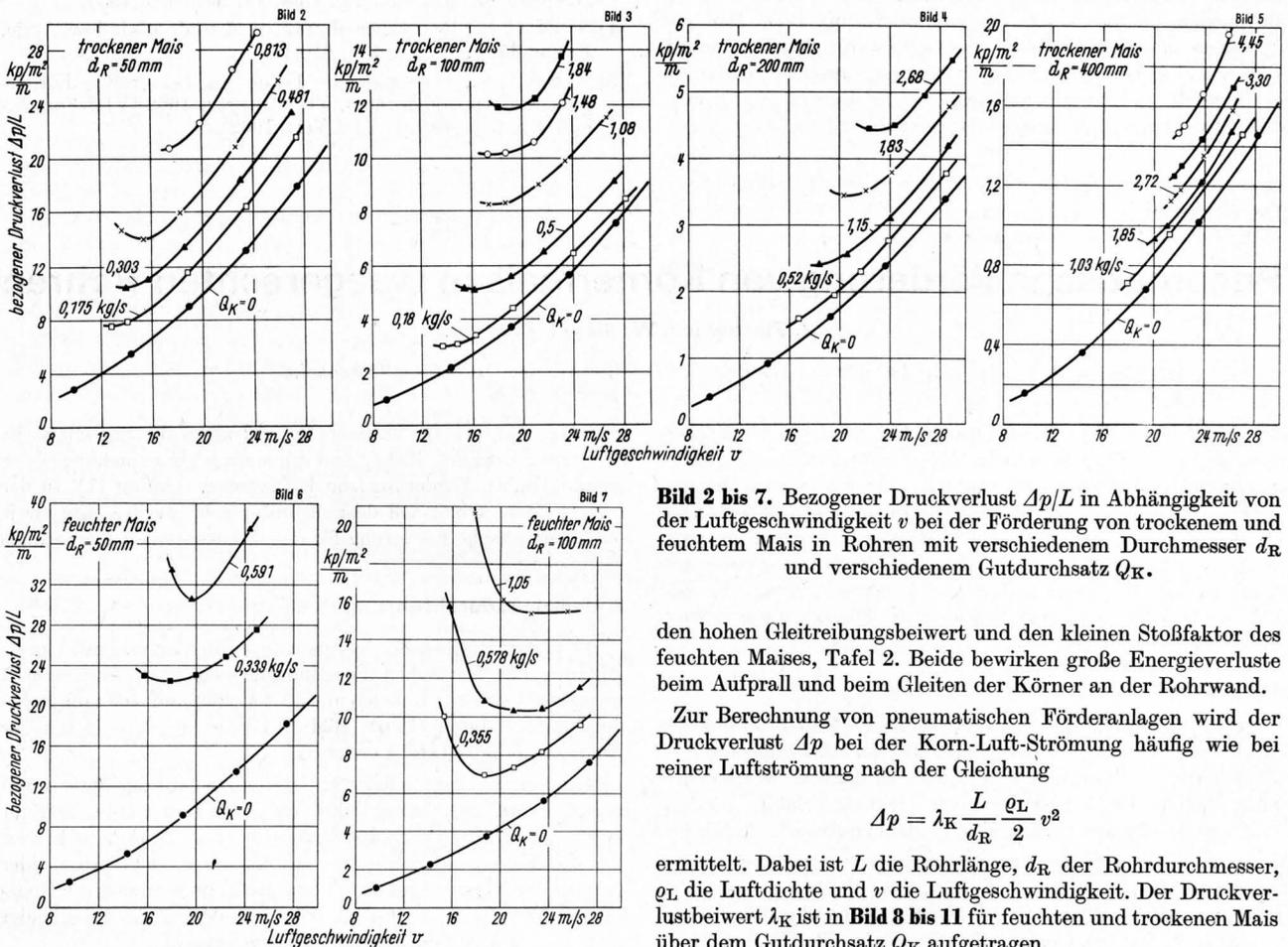
**Tafel 1.** Abmessungen und Eigenschaften der Meßanlagen.

Rohr-durchmesser mm	Gebläse	Schleuse	gerade Förderlänge m	Krümmer		
				Anzahl	Radius m	Ausführung
50	Kreis-kolben	Zellen-rad	62	4	0,3	gezogen
100	Kreis-kolben	Zellen-rad	67	4	0,6	gezogen
200	Radial	Zellen-rad	50	2	1,2	Segment
400	Radial	Zellen-rad	52	2	1,6	Segment

**Tafel 2.** Mechanische Eigenschaften der Maiskörner.  
Sorte Velox, Erntejahr 1968

		trockener Mais	feuchter Mais
Feuchtegehalt	%	15	37
mittl. Korndurchmesser	mm	7,7	8,7
Korndichte	kg/m <sup>3</sup>	1297	1250
1000-Korn-Gewicht	kg	0,314	0,424
mittl. Schwebegeschwindigkeit	m/s	10,4	11,3
Gleitreibungsbeiwert gegen Stahl		0,27	0,52
Stoßfaktor		0,75	0,30

Bei der Förderung von trockenem Mais, Bild 2 bis 5, nimmt der Druckverlust oberhalb der Stopfgrenze fast bei allen Rohrdurchmessern  $d_R$  und Gutdurchsätzen  $Q_K$  mit der Luftgeschwindigkeit  $v$  zu. Bei feuchtem Mais, Bild 6 und 7, zeigt sich dagegen ein eindeutiges Druckverlustminimum. Bei kleinen Luftgeschwindigkeiten steigt insbesondere im Rohr mit  $d_R = 100$  mm, Bild 7, der Druckverlust stark an. Ein Vergleich von Bild 2 mit Bild 6 und von Bild 3 mit Bild 7 zeigt, daß der Druckverlust bei der Förderung von feuchtem Mais wesentlich höher als bei der Förderung von trockenem ist. Das ist bedingt durch



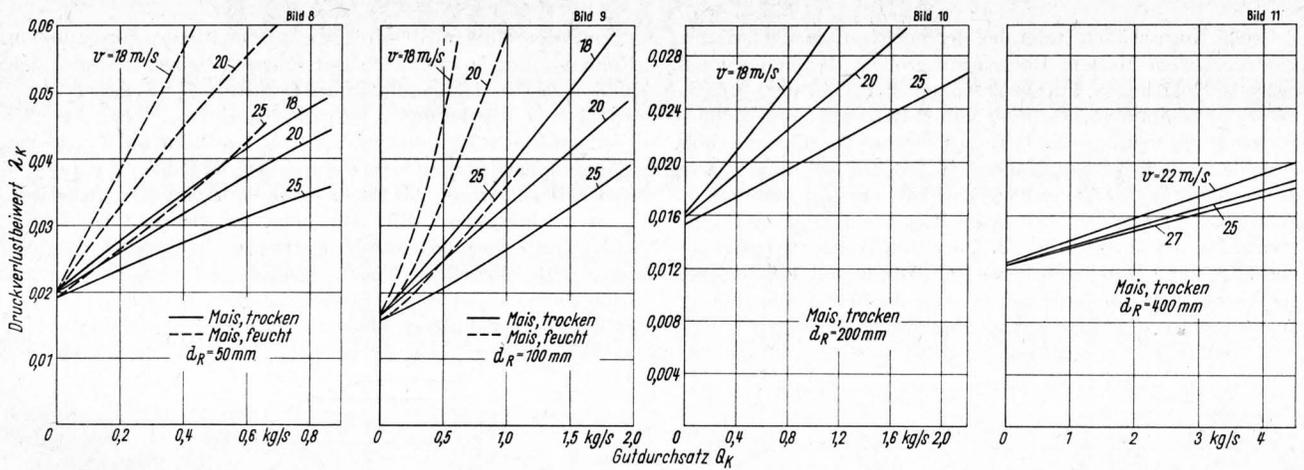
**Bild 2 bis 7.** Bezogener Druckverlust  $\Delta p/L$  in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit  $v$  bei der Förderung von trockenem und feuchtem Mais in Rohren mit verschiedenem Durchmesser  $d_R$  und verschiedenem Gutdurchsatz  $Q_K$ .

den hohen Gleitreibungsbeiwert und den kleinen Stoßfaktor des feuchten Maises, Tafel 2. Beide bewirken große Energieverluste beim Aufprall und beim Gleiten der Körner an der Rohrwand.

Zur Berechnung von pneumatischen Förderanlagen wird der Druckverlust  $\Delta p$  bei der Korn-Luft-Strömung häufig wie bei reiner Luftströmung nach der Gleichung

$$\Delta p = \lambda_K \frac{L}{d_R} \frac{\rho_L}{2} v^2$$

ermittelt. Dabei ist  $L$  die Rohrlänge,  $d_R$  der Rohrdurchmesser,  $\rho_L$  die Luftdichte und  $v$  die Luftgeschwindigkeit. Der Druckverlustbeiwert  $\lambda_K$  ist in **Bild 8 bis 11** für feuchten und trockenen Mais über dem Gutdurchsatz  $Q_K$  aufgetragen.



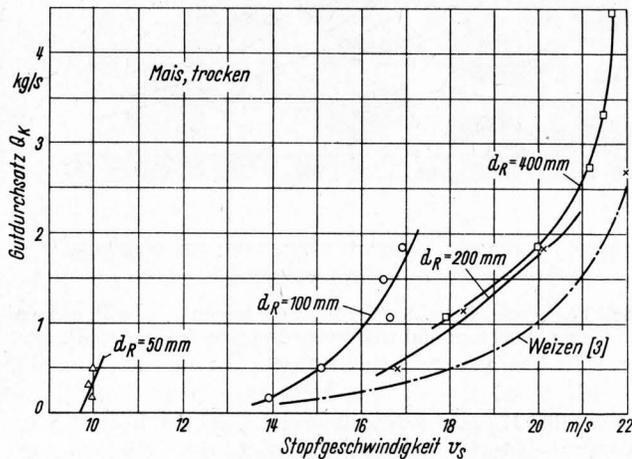
**Bild 8 bis 11.** Widerstandsbeiwert  $\lambda_K$  in Abhängigkeit vom Gutdurchsatz  $Q_K$  bei der Förderung von feuchtem und trockenem Mais mit verschiedener Luftgeschwindigkeit  $v$  in Rohren mit verschiedenem Durchmesser  $d_R$ .

#### 4 Fördergrenzen

Wählt man bei der pneumatischen Förderung die Luftgeschwindigkeit zu hoch, dann werden der Leistungsbedarf und die Kornbeschädigung groß. Bei zu niedriger Luftgeschwindigkeit besteht die Gefahr, daß das Rohr verstopft und die Förderung zusammenbricht. Die optimale Luftgeschwindigkeit liegt etwas über der im folgenden beschriebenen Stopfgrenze.

##### 4.1 Stopfgrenze

Als Stopfgrenze wird nach Segler [3] die Luftgeschwindigkeit bezeichnet, bei der erstmals Gutablagerungen in der Förderleitung auftreten. Unterbricht man bei Luftgeschwindigkeiten unterhalb der Stopfgrenze die Gutzufuhr, so kann man hören, wie der Luftstrom die abgelagerten Körner allmählich zum Zyklon befördert. Die Luftgeschwindigkeit, bei der dieser „Nachrauscheffekt“ erstmals auftritt, ist als Stopfgeschwindigkeit definiert.

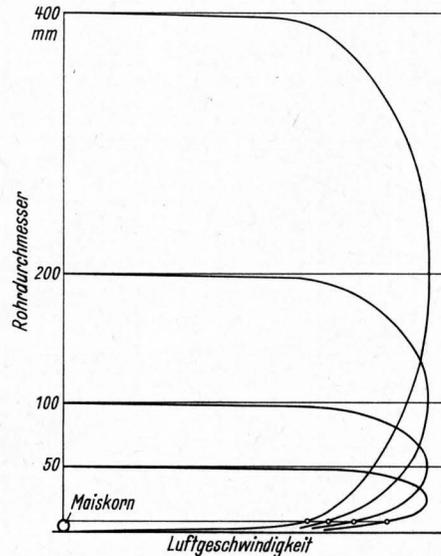


**Bild 12.** Abhängigkeit der Stopfgeschwindigkeit  $v_s$  vom Gutdurchsatz  $Q_K$  bei der Förderung von trockenem Mais in Förderanlagen mit verschiedenem Rohrdurchmesser  $d_R$ . Zum Vergleich ist die vom Rohrdurchmesser unabhängige Stopfgeschwindigkeit von Weizen nach Segler [3] eingezeichnet.

Die Stopfgeschwindigkeit  $v_s$  der vier Förderanlagen ist in Bild 12 in Abhängigkeit vom Gutdurchsatz aufgetragen. Die Stopfgeschwindigkeit  $v_s$  ist bei großem Rohrdurchmesser nur wenig vom Rohrdurchmesser abhängig. Das stimmt mit den Beobachtungen von Segler [3] bei der Förderung von Weizen überein. Bei kleinem Rohrdurchmesser ist die Stopfgeschwindigkeit

#### Verwendete Formelzeichen

$d_R$	Rohrdurchmesser	$v$	Luftgeschwindigkeit
$L$	Rohrlänge	$v_s$	Stopfgeschwindigkeit
$\Delta p$	Druckverlust	$\lambda_K$	Druckverlustbeiwert
$Q_K$	Gutdurchsatz	$\rho_L$	Luftdichte



**Bild 13.** Anströmung eines abgelagerten Maiskornes in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser bei gleicher mittlerer Luftgeschwindigkeit. Die Kurven zeigen die Geschwindigkeitsverteilung über dem jeweiligen Rohrquerschnitt.

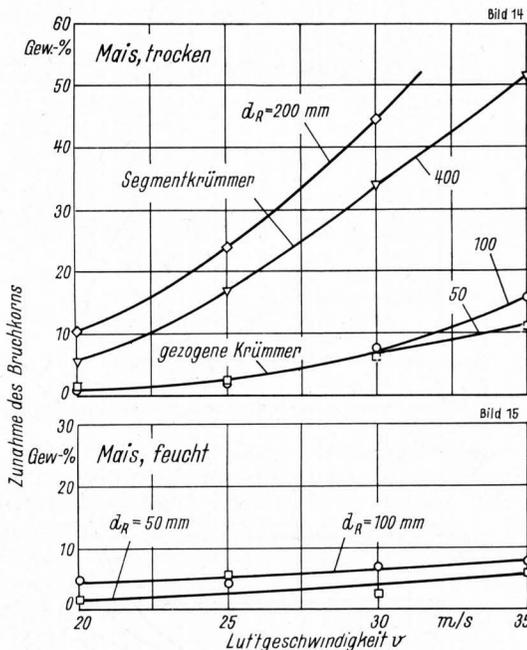
keit jedoch niedriger als in weiten Rohren. Diese Tatsache wird durch Bild 13 veranschaulicht. Setzt man sehr kleinen Gutdurchsatz voraus, so kann nach Messungen von Welsch [4] für den radialen Verlauf der Luftgeschwindigkeit annähernd das Prandtl-Profil angenommen werden. Aus Bild 13 ergibt sich dann, daß ein in der Rohrleitung liegendes, gegenüber Weizen relativ großes Maiskorn mit abnehmendem Rohrdurchmesser bei gleicher mittlerer Luftgeschwindigkeit immer mehr in den Bereich großer Luftgeschwindigkeiten kommt. Außerdem wirkt sich im engen Rohr eine Ablagerung von Körnern stärker auf die örtliche Luftgeschwindigkeit aus als im weiten Rohr.

Aus Bild 12 ergibt sich noch, daß die Stopfgeschwindigkeit bei der pneumatischen Förderung von trockenem Mais niedriger liegt als bei Weizen.

##### 4.2 Kornbeschädigung

Da die sichtbare Kornbeschädigung bei der Maisförderung ziemlich groß ist, wurde nur der Bruchkornanteil aus Probenmengen von etwa 0,5 kg ausgewogen und die Keimfähigkeit nicht berücksichtigt. Die Proben hatten vor der Förderung einen Bruchkornanteil von etwa 12%, der vom Mähdrusch herrührte. Sie wurden einmal gefördert. Bei mehrmaliger Förderung nahm der Bruchkornanteil zu, jedoch nicht proportional zur Anzahl der Förderungen. In Bild 14 und 15 ist die Zunahme des Bruchkorns bei etwa 12% Bruchkorn im Ausgangsmaterial aufgetragen. Der Bruchkornanteil wächst mit der Luftgeschwindigkeit, besonders stark bei trockenem Mais, Bild 14. Nach Bild 15 beschädigt bei feuchtem Mais der Mähdrusch die Körner stärker (12%) als die pneumatische Förderung in nicht zu großen Rohren (< 8%).

Große Kornschäden treten bei der pneumatischen Förderung von trockenem Mais in Rohren mit großem Durchmesser auf, besonders bei hohen Luftgeschwindigkeiten. Bei den Anlagen mit  $d_R = 200$  mm und  $d_R = 400$  mm waren zwei handelsübliche Segmentkrümmer eingebaut, Tafel 1, worauf vor allem der hohe Bruchkornanteil zurückzuführen ist. Beim Rohrdurchmesser  $d_R = 200$  mm tritt die größte Beschädigung auf, weil dort die Schweißnähte zwischen den Segmenten nicht glatt geschliffen waren. Daraus ist ersichtlich, daß der Bruchkornanteil nicht nur von Länge und Durchmesser der Rohrleitung und von der Luftgeschwindigkeit, sondern auch von der Ausführung der Förderanlage (Schleuse, Krümmer und Abscheider) abhängt.



**Bild 14 und 15.** Zunahme des Bruchkorns in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit bei einmaliger Förderung von trockenem und feuchtem Mais in Förderanlagen mit verschiedenem Rohrdurchmesser  $d_R$  bei etwa 12% Bruchkorn im Ausgangsmaterial.

Nach Segler [3] nimmt die Keimfähigkeit von Getreide bei der Förderung mit zu hohen Luftgeschwindigkeiten ab. Eine mit unbeschädigt erscheinenden Maiskörnern angestellte Triebkraftuntersuchung<sup>1)</sup> ergab ein ähnliches Verhalten. Nach der Förderung von feuchtem Mais durch Anlage 1 (50 mm Rohrdurchmesser) nahm bei Luftgeschwindigkeiten von 30 m/s die Triebkraft um 20% ab.

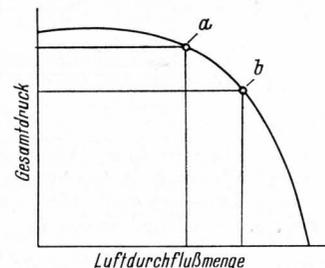
## 5 Folgerungen

Wie die Messungen gezeigt haben, ist die pneumatische Förderung zum Transport von Körnermais geeignet. Da die Stopfgeschwindigkeit und die Kornbeschädigung mit dem Rohrdurchmesser stark zunehmen, empfiehlt es sich, den Mais in Rohren mit möglichst kleinem Durchmesser zu fördern. Dazu sind Gebläse mit hohen Gesamtdrücken erforderlich. Förderanlagen mit kleinem Rohrdurchmesser haben außerdem geringeren Energieverbrauch bei gleichem Gutdurchsatz, denn die für die reine Luftförderung benötigte Leistung nimmt etwa linear mit dem Rohrdurchmesser zu.

Zur Erzeugung der Druckluft werden häufig Radialgebläse den teuren Kreiskolbengebläsen vorgezogen. Deswegen arbeiten viele Körnergebläse mit großem Rohrdurchmesser bei hohem Luftdurchsatz und kleinem Gesamtdruck (bis 600 mm WS). Für die Förderung von Körnermais sind derartige Niederdruckgebläse weniger geeignet. Will man den Preisvorteil der Radialgebläse ausnützen, empfehlen sich Hochdruckradialgebläse, die die Industrie heute einstufig bis zu Gesamtdrücken von 2300 mm WS anbietet.

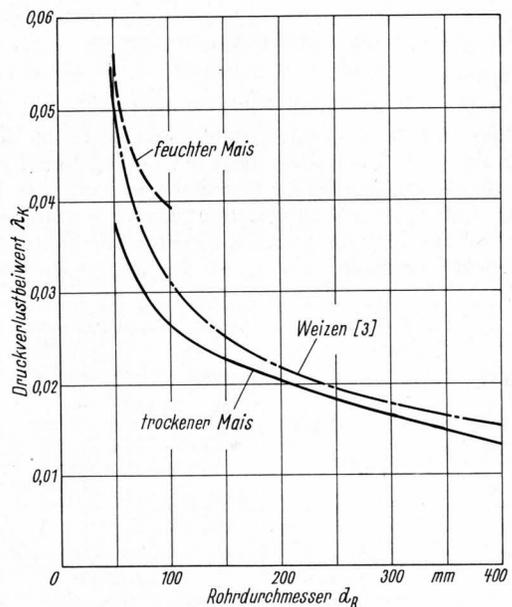
<sup>1)</sup> Die Keim-Triebkraftuntersuchung wurde freundlicherweise von Dr. agr. E. Bewer, Institut für Landtechnik in Stuttgart-Hohenheim, durchgeführt.

Feuchter Mais wird durch die pneumatische Förderung in Rohren mit nicht zu großem Durchmesser weniger als durch den Mähdrusch beschädigt. Die Druckverluste sind wesentlich höher als bei der Förderung von trockenem Mais. Stellt man eine Förderanlage mit Radialgebläse von feuchtem auf trockenem Mais um, muß darauf geachtet werden, daß dann die Luftgeschwindigkeit wegen der flachen Kennlinie von Radialgebläsen nicht zu hoch wird, **Bild 16**; denn bei gleichem Gutdurchsatz steigt infolge der geringeren Druckverluste der Luftdurchsatz. Dadurch nehmen der Leistungsbedarf und die Kornbeschädigung zu. Bei umgekehrter Umstellung besteht die Gefahr, daß die Anlage durch zu kleinen Luftdurchsatz verstopft.



**Bild 16.** Betriebspunkte einer Förderanlage mit Radialgebläse bei gleichem Gutdurchsatz von feuchtem und trockenem Mais.

a feuchter Mais  
b trockener Mais



**Bild 17.** Vergleich der  $\lambda_K$ -Werte für die pneumatische Förderung von feuchtem und trockenem Mais sowie Weizen [3].

$Q_K = 0,6$  kg/s  
 $v = 20$  m/s

Aus **Bild 17** ergibt sich, daß pneumatische Förderanlagen für Weizen bei gleicher Luftgeschwindigkeit für die Förderung von trockenem Mais verwendet werden können. Der mögliche Gutdurchsatz erhöht sich, da der Druckverlust bei trockenem Mais geringer ist und die Stopfgeschwindigkeit niedriger liegt als bei Weizen. Soll mit derartigen Anlagen feuchter Mais gefördert werden, so ist der Gutdurchsatz zu verkleinern, damit der Druckverlust gleich bleibt wie bei der Förderung von Weizen.

## 6 Schrifttum

- [1] van der Lingen, T. W., und R. Koppe: Moving granular materials by air line. *Engineering* **196** (1963) S. 345/51.
- [2] Hütte I. Theoretische Grundlagen. 28. Aufl. Berlin: Verlag von W. Ernst & Sohn 1955. S. 733.
- [3] Segler, G.: Untersuchungen an Körnergebläsen und Grundlagen für ihre Berechnung. Diss. TH München 1934. [RKTL-Schrift 55.]
- [4] Welschow, G.: Pneumatische Förderung bei hohen Fördergutkonzentrationen. Diss. TH Stuttgart 1962. [VDI-Forschungsheft 492, Düsseldorf: VDI-Verl. 1962.]