

Umschaltung kann wahlweise von Hand und Fuß oder vom linken Fuß allein mit Überschaltweg am Kupplungspedal vorgenommen werden.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, zwei Kriechgänge wahlweise zu haben, so daß sich folgende Fahrbereiche ergeben:

Straßengruppe:	25 bis 5,50 km/h
Ackergruppe:	8 bis 1,78 km/h
Kriechganggruppen:	3,15 bis 0,80 km/h 1,57 bis 0,35 km/h.

Die Rückwärtsfahrgeschwindigkeiten entsprechen den Vorwärtsfahrgeschwindigkeiten. Die Zahnräder für die Kriechganggruppe werden z. T. für den Antrieb der Hydraulikpumpen und der Steuerpumpen für den Kettenwandler verwendet. Da die meisten landwirtschaftlichen Arbeiten bei Fahrgeschwindigkeiten über 5,5 km/h durchgeführt werden, kann der Acker Schlepper in der Straßengruppe überwiegend stufenlos gefahren werden.

Die Hinterachse entstammt einem leistungsgleichstarken Normalschleppertriebwerk der ZF-Baureihe 300. Beide Triebwerke, sowohl das Normaltriebwerk als auch das Triebwerk mit dem Kettenwandler, sind einbaugleich. Das Triebwerk kann auch wahlweise mit Vierradantrieb ausgerüstet werden.

Daneben ist die Zapfwellenanordnung voll unabhängig vom Fahrtrieb und mit den Drehzahlen 540 und 1000 U/min bei Motornendrehzahl ausgerüstet. Ferner besteht bei diesem Triebwerk die Möglichkeit, eine weitere Zapfwelle im stufenlosen Drehzahlbereich von 300 bis 1300 U/min vorzusehen, wobei diese Drehzahlen in beiden Drehrichtungen gegeben sind.

Zwischen Motor und Antriebskettensatz ist eine Abschaltklau für Kaltstart vorgesehen.

### Erprobung

Über den Einsatz von Ackerschleppern mit Kettenwandlern im praktischen Fahrbetrieb wurden die ersten Versuche vom Institut für Schlepperforschung, Braunschweig-Völkenrode, im Jahre 1957 durchgeführt. Darüber hinaus haben die Reimers-

Getriebe KG und die Zahnradfabrik Friedrichshafen Versuche im eigenen Hause und bei landwirtschaftlichen Großbetrieben in Einsätzen von längerer Dauer durchführen lassen.

Neben den vielen Versuchsläufen auf den Prüfständen und in landwirtschaftlichen Einsätzen wurden bei der Zahnradfabrik Friedrichshafen mit dem Baumuster ASR-210 der 35 PS-Klasse 2000 harte Anfahrten auf griffiger Betonbahn und erhöhtem Fahrzeuggewicht, 50 Stunden schwere Zugarbeiten und bis heute 4500 Einsatzstunden in mehreren landwirtschaftlichen Großbetrieben gefahren. Der Einsatz entspricht bei den Gewaltversuchen einer Lebensdauererwartung von drei Jahren. Der Motor wurde bei den Einsätzen dauernd knapp unter der Vollastgrenze gefahren; dabei arbeitete die Automatik auf die Dauer zufriedenstellend. Der Verschleiß von Kette und Scheibensatz hielt sich im üblichen Rahmen.

Nachteilig hat sich bei den Versuchen mit diesem Baumuster ausgewirkt, daß die Hauptkupplung für das Anfahren und Schalten des Zusatzgetriebes zwischen Motor und Kettenwandler angeordnet war. Die Umschaltdauer von einem Gang zum anderen oder von vorwärts auf rückwärts war für den praktischen Einsatz zu lang, weil die Auslaufzeit des Wandlers zu lange gedauert hat, bis einwandfrei geschaltet werden konnte. Dieser Mangel ist aber durch das eben beschriebene neue Baumuster beseitigt; nach Auffassung des Herstellers ist der Kettenwandler heute in dieser neuen Baureihe für den Einsatz in Nutzfahrzeugen geeignet. Die landwirtschaftlichen Vorteile einer stufenlosen Änderung der Fahrgeschwindigkeit sind an anderer Stelle [3] eingehend dargelegt worden.

### Schrifttum

- [1] *Wendeborn, J. O.*: Unter Last und stufenlos schaltbare Fahrtriebe für Schlepper. *Grundl. Landtechn.* **16** (1966) Nr. 2 S. 51/59.
- [2] *Dittrich, O.*: Ein stufenloses Hochleistungsgetriebe mit „Stahlriemen“. *VDI-Z.* **108** (1966) Nr. 6, S. 227/32.
- [3] *Dietrich, H., G. Wrede und U. Schünke*: Stufenlose Schleppergetriebe im Einsatz. *Landtechn.* **19** (1964) Nr. 10, S. 324/34.

DK 621.867.8

## Druckabfall und Bewegung der Gutteilchen in Krümmern pneumatischer Förderleitungen bei kleiner Gutbeladung

Von **Yoshinobu Morikawa**, Osaka/Japan

*Rohrkrümmer sind ein wichtiger Bestandteil von pneumatischen Förderanlagen. Ihre Bemessung erfolgt nach Gesichtspunkten des Strömungswiderstandes, der Beschädigung des Fördergutes und der Wirtschaftlichkeit. Seit den Untersuchungen von K. Wagner und G. Segler in den zwanziger und dreißiger Jahren hat erst Yoshinobu Morikawa das Gebiet der Krümmerforschung wieder aufgenommen. Er berichtet über seine an der Universität Osaka (Japan) durchgeführten Forschungen und über seine Untersuchungen, die er als Gastwissenschaftler 1965/66 am Institut für Landtechnik Stuttgart-Hohenheim fortgesetzt hat.*

Die Kenntnis des Druckabfalls in Krümmern von Rohrleitungen ist vom strömungstechnischen Standpunkt aus von großer Bedeutung. Für reine Luft- und Wasserströmung wurden daher die Strömungsvorgänge bisher schon von vielen Forschern untersucht. Dagegen sind die Strömungsverhältnisse in Krümmern pneumatischer Förderleitungen bisher nur wenig geklärt.

*Dr.-Ing. Yoshinobu Morikawa ist ordentlicher Professor an der Universität Osaka/Japan und war von Mai 1965 bis Februar 1966 als Gastwissenschaftler im Institut für Landtechnik (Direktor Prof. Dr.-Ing. G. Segler) Stuttgart-Hohenheim tätig. Der Verfasser dankt dem Deutschen Akademischen Austauschdienst sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung seiner Forschungstätigkeit in Stuttgart-Hohenheim.*

Da die pneumatische Förderung auf vielen Gebieten immer mehr zur Anwendung gelangt, ist es von größter Bedeutung, die Gesetzmäßigkeiten des Druckabfalls in Krümmern von Förderleitungen zu ermitteln. Von den Ergebnissen der bisherigen Untersuchungen über den Druckabfall bei reiner Luft- und Wasserströmung ausgehend, behandelt die vorliegende Arbeit den durch das Fördergut verursachten zusätzlichen Druckabfall. Durch ausführliche Versuche an der Universität Osaka/Japan konnte der Verfasser ferner die Bewegung der Gutteilchen in Krümmern klären.

### 1. Krümmungsverhältnis

Der Druckverlustbeiwert beim Strömen von Flüssigkeit durch Rohrkrümmer ist bei glatter Rohrwand im allgemeinen von der Reynoldszahl  $Re = ud/\nu$  sowie vom Ablenkungswinkel  $\Theta$  und vom Krümmungsverhältnis  $R/d$  abhängig; dabei ist  $u$  die mittlere Geschwindigkeit der Strömung,  $d$  der Rohrrinnendurchmesser und  $\nu$  die kinematische Zähigkeit der Luft. Der Druckabfall  $\Delta p$  werde durch die Gleichung

$$\Delta p = \zeta_b \frac{\rho}{2} u^2 \quad (1)$$

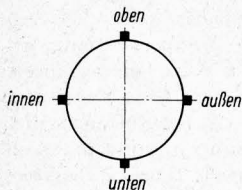
erfaßt, wobei  $\rho$  die Dichte der Luft und der Druckverlustbeiwert

$$\zeta_b = f(Re; \Theta; R/d) \quad (2)$$

ist. Bei der pneumatischen Förderung wird der Beiwert  $\zeta_b$  ferner durch das Fördergut beeinflusst. Die untersuchten Rohrkrümmer sind nach der Größe des Ablenkungswinkels und des Krümmungsradius verschieden. Bei einem bestimmten Krümmungsverhältnis  $R/d$  erwartet man ein Minimum des Druckabfalls. Dies entsteht im allgemeinen bei Krümmern mit  $R/d = 5$  bis 6. Auch wurde festgestellt, daß im Bereich  $R/d < 5$  erhebliche Widerstände auftreten [1; 2]. Andererseits wächst die Krümmenlänge mit größer werdendem Krümmungsradius und damit der Druckabfall. Aufgrund der oben erwähnten Betrachtung werden bei den Untersuchungen Krümmer mit  $R/d = 5$  bis 10 benutzt.

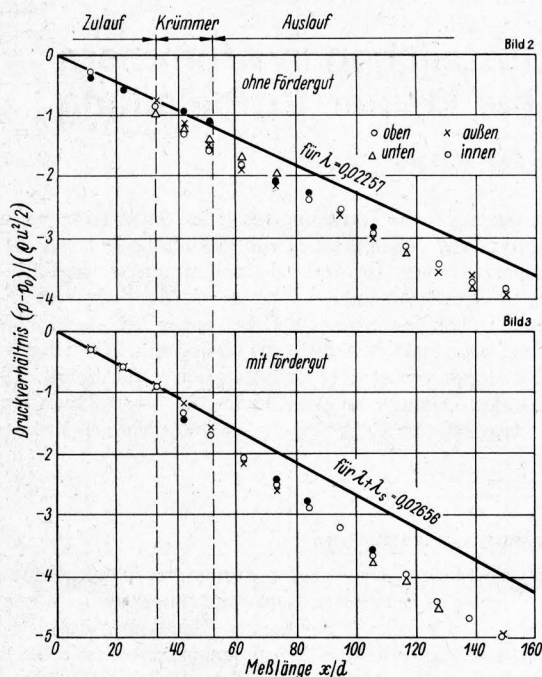
## 2. Versuchsanlage

Der Leitungsdurchmesser wurde durch Bestimmung von Gewicht und Volumen der in die Leitung eingefüllten Wassermenge ermittelt. Der Rohrlinnendurchmesser beträgt demnach bei der waagerechten Förderleitung 27,4 mm und bei der lotrechten Förderleitung 28,8 mm. Die Rohre sind praktisch glatt.



**Bild 1.** Meßquerschnitt der Rohrleitung. Bohrstellen für die Druckentnahme.

Die Strömung der Flüssigkeit im Krümmer ist anders als die im geraden Rohr. Es ist früher gezeigt worden, daß in Krümmern und in der Nähe der Stoßstellen von geraden Rohren die Druckhöhen über den Querschnitt nicht gleich sind [3 bis 5]. Deshalb wurden in jedem Querschnitt vier Druckentnahmebohrungen mit einem Durchmesser von 1 mm angebracht. Es wurde Wert darauf gelegt, alle vier Bohrungen in einer zur Rohrachse senkrechten Ebene und genau um  $90^\circ$  gegeneinander versetzt anzubringen, **Bild 1**. Diese wurden mittels einer Ringleitung zusammengeschlossen. Um alle Druckhöhen der Druckentnahmestellen gleichzeitig beobachten zu können, wurden so viele U-Rohre in einem Meßgerät angeordnet, wie Meßquerschnitte vorhanden waren.



**Bild 2 und 3.** Druckverlauf bei Strömung durch einen waagerechten Krümmer bei reiner Luftströmung (**Bild 2**) und mit Fördergut (**Bild 3**).

Ablenkungswinkel  $\Theta = 180^\circ$   
 Krümmungsverhältnis  $R/d = 5,75$   
 mittlere Strömungsgeschwindigkeit  $u = 18,6$  m/s  
 Gutbeladung in **Bild 2**  $\mu = 0$   
 in **Bild 3**  $\mu = 0,855$   
 Fördergut: Kolbenhirsesamen und weißer Sesam

## 3. Druckverlauf

Zunächst wurde bei waagerechter Rohrleitung der Verlauf des Druckabfalls in Strömungsrichtung ermittelt. Als Fördergut verwendete man Kolbenhirsesamen mit einem mittleren Durchmesser von 1,63 mm und einer Dichte von  $1090$  kg/m<sup>3</sup> und weißen Sesam mit einem mittleren Durchmesser von 1,63 mm und einer Dichte von  $1070$  kg/m<sup>3</sup>. In **Bild 2 und 3** ist  $(p-p_0)/(\rho u^2/2)$  über der dimensionslosen Meßlänge  $x/d$  aufgetragen, wobei  $p_0$  die Druckhöhe an der ersten Druckentnahmestelle und  $x$  den von der ersten Druckentnahmestelle in Strömungsrichtung gemessenen Abstand bedeutet.

Der Druckabfall für das dem Krümmer äquivalente gerade Rohr lautet ohne bzw. mit Gutförderung

$$\Delta p_a = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho}{2} u^2 \quad (3)$$

bzw.

$$\Delta p = (\lambda + \lambda_s) \frac{l}{d} \frac{\rho}{2} u^2 \quad (4),$$

wobei

$$\lambda = 0,3164/Re^{1/4} \quad (5)$$

und

$$\lambda + \lambda_s = \frac{8}{(\sqrt{8}\lambda - 1,72\mu)^2} \quad (6)$$

ist, wie der Verfasser früher abgeleitet hat [6].  $\lambda$  in **Bild 2** und  $(\lambda + \lambda_s)$  in **Bild 3** wurden aus den Gln. (5) und (6) errechnet.

Die Meßergebnisse an dem geraden Rohr vor dem Krümmer stimmen recht gut mit den  $\lambda$ - bzw.  $(\lambda + \lambda_s)$ -Geraden überein. Dies bedeutet, daß vor dem Krümmer der Einfluß des Krümmers auf die Rohrströmung unbedeutend ist. Verfolgt man jedoch den weiteren Verlauf, so zeigt sich, daß die Druckhöhen sogar über die Querschnitte im Krümmer und unmittelbar hinter dem Krümmer solange verschieden sind, bis im angeschlossenen geraden Rohr die Strömungsverhältnisse des geraden Rohrs erreicht werden. Erst in einiger Entfernung vom Krümmerauslauf gleichen sich die Druckunterschiede in denselben Querschnitten aus, und an allen vier Druckentnahmestellen herrscht derselbe statische Druck, so daß die Meßergebnisse parallel zu den Geraden liegen, die mit den Parametern  $\lambda$  bzw.  $(\lambda + \lambda_s)$  berechnet wurden. Der durch den Krümmer verursachte zusätzliche Druckabfall ergibt sich nicht nur durch den zwischen Ein- und Auslauf des Krümmers gemessenen Druckabfall, sondern auch durch die Druckverteilung im angeschlossenen Rohr.

Bei den mit Wasser durchgeführten Versuchen [7] hat es sich gezeigt, daß der Einfluß des Krümmers bis zur Stelle  $x/d = 30$  vor dem Krümmereinlauf und  $x/d = 50$  hinter dem Krümmerauslauf reicht. Wie **Bild 2 und 3** zeigen, gelten die erwähnten, für Wasserströmung gewonnenen Verhältnisse  $x/d$  über den Krümmereinfluß im angeschlossenen Rohr auch für die Strömung eines Luft-Feststoff-Gemisches recht gut.

### Verwendete Formelzeichen:

- $d$  Rohrlinnendurchmesser
- $l$  Rohrlänge
- $p$  Druckhöhe im Abstand  $x$  von der ersten Druckentnahmestelle
- $p_0$  Druckhöhe der ersten Druckentnahmestelle in Strömungsrichtung
- $\Delta p$  Druckabfall
- $\Delta p'$  gesamter Druckabfall durch den Einfluß des Krümmers
- $R/d$  Krümmungsverhältnis
- $Re$  Reynoldszahl
- $u$  mittlere Strömungsgeschwindigkeit
- $x$  Abstand einer Meßstelle von der ersten Druckentnahmestelle in Strömungsrichtung
- $x/d$  dimensionslose Meßlänge
- $y$  Abstand der Mittelpunkte der Querschnittssegmente von der Krümmerauswand
- $y/d$  dimensionsloser Abstand
- $\zeta'$  gesamter Druckverlustbeiwert durch den Einfluß des Krümmers
- $\zeta_b$  Druckverlustbeiwert für reine Luft
- $\zeta_s$  Druckverlustbeiwert für die Gutförderung
- $\Theta$  Ablenkungswinkel des Krümmers
- $\lambda$  Rohrreibungszahl für reine Luft
- $\lambda_s$  Rohrreibungszahl für die Gutförderung
- $\mu$  Gutbeladung (kg Gut/kg Luft)
- $\nu$  kinematische Zähigkeit der Luft
- $\rho$  Dichte der Luft



#### 4. Druckabfall

##### 4.1 Waagrecht eingebauter Krümmer

Der Unterschied zwischen den Meßergebnissen und den Geraden, die  $\lambda$  in Bild 2 oder  $(\lambda + \lambda_s)$  in Bild 3 darstellen, ist der durch einen Krümmer verursachte zusätzliche Druckabfall. Man ersieht daraus, daß die Druckhöhen oben, außen, unten und innen im Krümmer voneinander verschieden sind. Durch Beobachtung und Vergleich der einzelnen Meßstellen kann jedoch festgestellt werden, daß die nur oben bzw. nur unten gemessenen Druckabfälle sich nicht wesentlich von denen mittels Ringleitung an allen vier Druckentnahmestellen gemessenen unterscheiden, sowohl ohne als auch mit Gutförderung. Demzufolge könnte der Druckabfall im Krümmer aus den Messungen nur an Druckentnahmestellen aller Krümmeroberseiten oder aller Krümmerunterseiten erhalten werden, also ohne daß man alle vier Stutzen in demselben Querschnitt benutzt. Trotzdem hat der Verfasser den Druckabfall aus dem Mittelwert der vier Bohrungen bestimmt. Ferner ist im Druckabfall eines Krümmers neben dem Druckabfall zwischen Ein- und Auslauf des Krümmers auch sein Einfluß auf den Druckabfall in den beiden anschließenden geraden Rohren enthalten.

Wären keine Einflüsse des Krümmers auf die Strömung in den beiden anschließenden geraden Rohren  $l_o$  und  $l_u$ , Bild 4, vorhanden, so folgte für die angeschlossenen Rohre

$$\Delta p = (\lambda + \lambda_s) \frac{l_o + l_u}{d} \frac{\rho}{2} u^2 \quad (7).$$

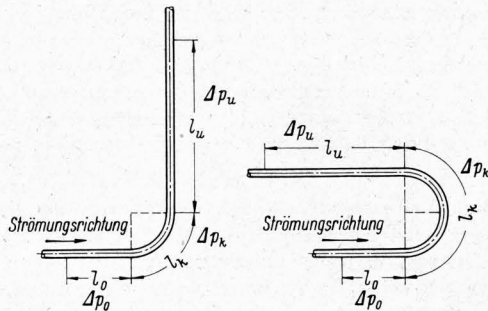


Bild 4. Anordnung der Meßrohrleitung.

Tatsächlich enthalten jedoch  $\Delta p_o$  und  $\Delta p_u$  den Einfluß des Krümmers. Man definiert deshalb den gesamten Druckabfall  $\Delta p'$  bzw. den Beiwert des gesamten Druckabfalles  $\zeta'$  im Krümmer bei Gutförderung wie folgt:

$$\Delta p' = \Delta p_o + \Delta p_k + \Delta p_u - \Delta p \quad (8)$$

bzw.

$$\zeta' = \frac{\Delta p'}{\rho u^2/2} = \frac{\Delta p_o + \Delta p_k + \Delta p_u}{\rho u^2/2} - (\lambda + \lambda_s) \frac{l_o + l_u}{d} \quad (9),$$

wobei  $\Delta p_k$  den Druckabfall zwischen Ein- und Auslauf des Krümmers bedeutet. Zerlegt man den Beiwert  $\zeta'$  in  $\zeta_b$  für reine Luft und in  $\zeta_s$  für die Gutförderung, so erhält man

$$\zeta' = \zeta_b + \zeta_s \quad (10).$$

Trägt man den Beiwert  $\zeta_b$  für reine Luft über der Reynoldszahl auf, so erhält man Bild 5 und 6. Zum Vergleich sind in die beiden Bilder die Kurven nach Gleichungen von Richter [3] und Ito [8] eingetragen. Nach Richter ist

$$\zeta_b = 0,00705 \alpha \Theta^{1,1} \text{Re}^{-0,235} \quad (11)$$

mit  $\alpha \approx 0,48 R/d$ ;

nach Ito ist

$$\left. \begin{aligned} \zeta_b &= 0,00873 \alpha \lambda_c \Theta (R/r) \quad \text{für } \text{Re} (r/R)^2 < 91 \\ \text{und} \\ \zeta_b &= 0,00241 \alpha \Theta \text{Re}^{-0,17} (R/r)^{0,84} \quad \text{für } \text{Re} (r/R)^2 > 91 \end{aligned} \right\} \quad (12).$$

Der Beiwert in Gl. (12) ist bei einem 90°-Krümmer

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 0,95 + 17,2 (R/r)^{-1,96} \quad \text{für } R/r < 19,7 \\ \text{und } \alpha &= 1 \quad \text{für } R/r > 19,7 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

und bei einem 180°-Krümmer

$$\alpha = 1 + 116 (R/r)^{-4,52} \quad (14).$$

Der Wert  $\lambda_c$  in Gl. (12) wird aus der Beziehung

$$\lambda_c (R/r)^{1/2} = \frac{0,316}{[\text{Re} (r/R)^2]^{1/5}} \quad (15)$$

bestimmt [8]. Der Wert  $\Theta$  für den Ablenkungswinkel in Gln. (11) und (12) wird in Grad eingesetzt.

Gl. (11) nach Richter gibt nur den Druckabfall zwischen Ein- und Auslauf des Krümmers an, während Gl. (12) nach Ito auch den Einfluß des Krümmers auf die Strömung in den beiden anschließenden geraden Rohren berücksichtigt. Deshalb kann man als erstes Glied von Gl. (10) den Ausdruck nach Gl. (12) verwenden. Drückt man den Druckabfall im Krümmer bei reiner Luftströmung mit

$$\Delta p_b = \zeta_b (\rho u^2/2) \quad (16)$$

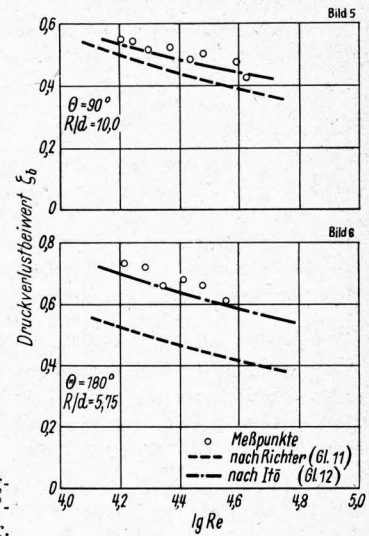


Bild 5 und 6. Druckverlustbeiwert  $\zeta_b$  für reine Luft in Abhängigkeit von  $\lg \text{Re}$  für einen 90°- und einen 180°-Krümmer.

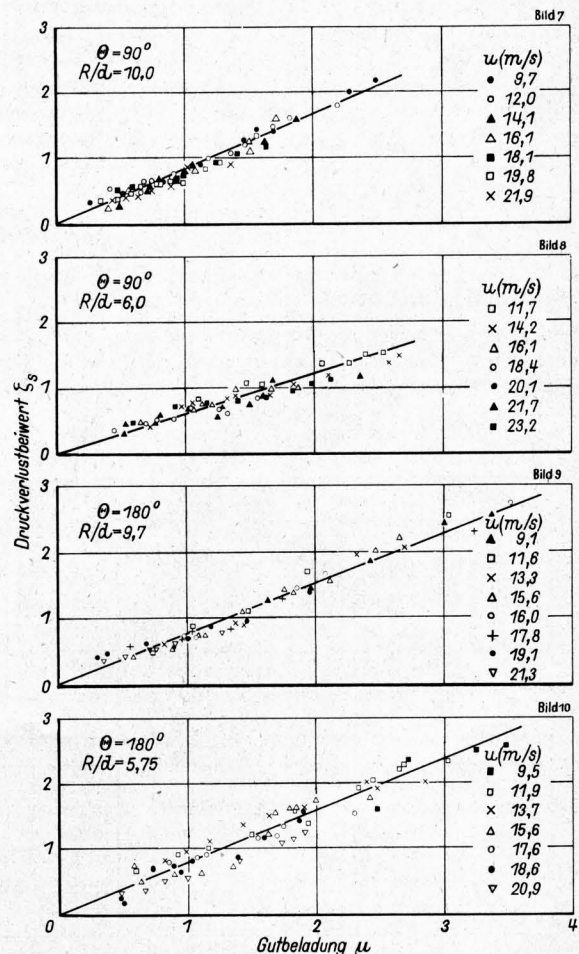


Bild 7 bis 10. Druckverlustbeiwert  $\zeta_s$  in Abhängigkeit von der Gutbeladung  $\mu$  im waagrecht eingebauten Krümmer.

aus, so erhält man aus den Gln. (9), (10) und (16)

$$\zeta_s = \frac{\Delta p_o + \Delta p_k + \Delta p_u}{\rho u^2/2} - (\lambda + \lambda_s) \frac{l_o + l_u}{d} - \frac{\Delta p_b}{\rho u^2/2} \quad (17).$$

Trägt man die auf diese Weise aus den Versuchsergebnissen erhaltenen Werte  $\zeta_s$  in Abhängigkeit von der Gutbeladung  $\mu$  auf, so erhält man **Bild 7 bis 10**.

Setzt man

$$\zeta_s = a\mu \quad (18),$$

$$\left. \begin{aligned} \text{so erhält man } a &= 0,830 \text{ für } \Theta = 90^\circ, R/d = 10,0, \\ a &= 0,964 \text{ für } \Theta = 90^\circ, R/d = 6,0, \\ a &= 0,747 \text{ für } \Theta = 180^\circ, R/d = 9,7 \text{ und} \\ a &= 0,771 \text{ für } \Theta = 180^\circ, R/d = 5,75 \end{aligned} \right\} \quad (19).$$

Bei Gutförderung ergibt sich für den Druckabfall im Krümmer im Vergleich zum geraden Rohr von der Länge des gestreckten Krümmers mit Hilfe von Gln. (9) und (10)

$$\vartheta = \frac{\zeta_b + \zeta_s}{(\lambda + \lambda_s)(l_k/d)} = f(R/d) \quad (20).$$

Nach Gl. (19) hat das Krümmungsverhältnis keinen wesentlichen Einfluß auf den Druckverlustbeiwert. Der Druckabfall im Krümmer ist in der Regel bei kleinem Krümmungsverhältnis gering, wie man aus Gl. (11) ersieht, nach Gl. (20) jedoch nimmt das Verhältnis  $\vartheta$  des Druckabfalles mit kleiner werdendem Krümmungsverhältnis zu.

#### 4.2 Lotrecht eingebauter Krümmer

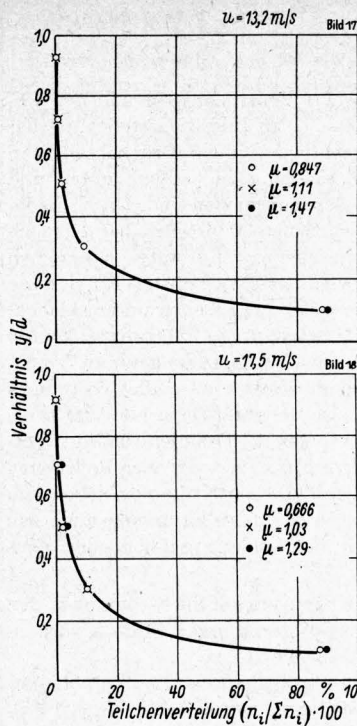
Der Einfachheit halber wird der Krümmer von der Waagerechten in die Lotrechte als Krümmer I und der Krümmer von der Lotrechten nach oben in die Waagerechte als Krümmer II bezeichnet.

Analog zum waagrecht eingebautem Krümmer erhält man **Bild 11 bis 16** für den lotrechten Krümmer. Aus diesen Bildern ersieht man, daß sich der Wert  $\zeta_s$  mit zunehmender Gutbeladung vergrößert und zwar ist  $\zeta_s$  im Krümmer von der Waagerechten in die Lotrechte nach oben größer (Bild 11; 13 und 15) als im Krümmer von der Lotrechten nach oben in die Waagerechte (Bild 12; 14 und 16). Es ergibt sich also zwischen den Druckabfällen beider Krümmers bei konstanter Gutbeladung ein erheblicher Unterschied. Gl. (6) ändert sich nach [9] bei lotrechter Förderung zu

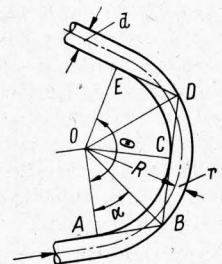
$$\lambda + \lambda_s = \frac{8}{(\sqrt{8/\lambda} - 1,25\mu)^2} \quad (6a).$$

#### 5. Bewegung der Gutteilchen im Krümmer

**Bild 17 und 18** zeigen die Auswertung photographischer Aufnahmen der Gutteilchen im waagrecht eingebauten Krümmer. Die Bilder stellen die Verteilung der Gutteilchen über dem Quer-



**Bild 17 und 18.** Verteilung der Gutteilchen im Krümmer bei Luftgeschwindigkeiten  $u$  von 13,2 und 17,5 m/s. Ablenkwinkel  $\Theta = 90^\circ$  Krümmungsverhältnis  $R/d = 10$



**Bild 19.** Strömungsrichtung von Flüssigkeitsteilchen im Krümmer.

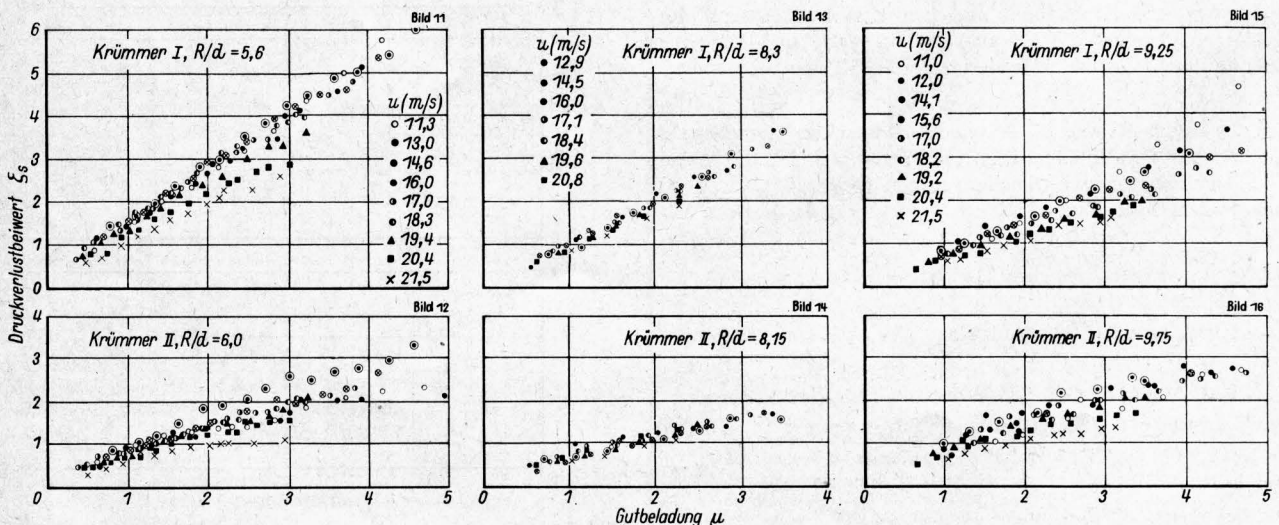
schnitt bei verschiedener Gutbeladung  $\mu$  dar. Dabei bedeutet  $n_1$  die Zahl der je Flächeneinheit umgerechneten Gutteilchen im jeweiligen Querschnittsegment und  $y$  den Abstand der Mittelpunkte der Querschnittsegmente von der Krümmeraußenwand. Man erkennt, daß 80 bis 90% der geförderten Gutteilchen im allgemeinen durch das äußerste Querschnittsegment gefördert werden.

Die Beziehung zwischen dem Druckabfall und der Richtung von Flüssigkeitsteilchen im dem Krümmer nachgeschalteten geraden Rohr wurde früher untersucht [1; 2; 10]. Durch Photographieren versuchte der Verfasser, weitere Aufschlüsse über die Strömung der Gutteilchen im Krümmer zu gewinnen. In **Bild 19** bildet die Tangente AB die Richtung der einströmenden Teilchen im Krümmer und die Tangente DE die der ausströmenden. Aus **Bild 19** erhält man somit im Dreieck AOB die Beziehung

$$\cos \alpha = \frac{R - r}{R + r} \quad (21).$$

Ferner kann man daraus sofort folgende Form ableiten

$$\frac{R}{d} = \frac{1}{2} \cot^2 \frac{\alpha}{2} \quad (22).$$



**Bild 11 bis 16.** Druckverlustbeiwert  $\zeta_s$  in Abhängigkeit von der Gutbeladung  $\mu$  im lotrecht eingebauten Krümmer.



Durch stroboskopische Aufnahme oder Beobachtung mit dem Auge kann man die Stelle bestimmen, wo die Gutteilchen auf die Krümmerwand prallen. Dabei zeigt sich, daß nur der erste Aufprallpunkt der in den Krümmer einströmenden Gutteilchen mit dem theoretischen, mit B in Bild 20 bezeichneten übereinstimmt und die weiteren Stoßstellen von den geometrisch bestimmten Stellen stromaufwärts abweichen. Nach den Versuchsergebnissen ist bei gleichbleibendem Ablenkungswinkel  $\theta$  die Stoßstelle der Gutteilchen nur von  $R/d$  abhängig, dagegen von der Luftgeschwindigkeit und von der Gutbeladung unabhängig. Die Beziehung in Gl. (22) zeigt bereits diese Tatsache, aber sie gilt nur für die erste Stoßstelle, wie schon oben festgestellt wurde. Theoretisch müßten nach Bild 20 die Gutteilchen bei  $R/d = 12,65$  in Achsrichtung des anschließenden Rohres ausströmen. Nach den Versuchen ist dies jedoch nicht der Fall, sondern die meisten Gutteilchen werden nach dem Stoß in Punkt B bei kleiner Gutbeladung in die Richtung  $BD'$  abgelenkt, ohne längs der Außenwand des Krümmers zu gleiten.

Betrachtet man nun die Verhältnisse beim Stoß der Gutteilchen gegen die Außenwand des Krümmers, so ergibt sich folgender Sachverhalt. Ein Gutteilchen hat vor dem Stoß die Geschwindigkeit  $v$  in Richtung  $a$  gegen die Tangente an B und nach dem Stoß die Geschwindigkeit  $v'$  in Richtung  $\beta$  gegen die gleiche Tangente, Bild 20. Da die Rohrwand glatt ist, gilt folgende Beziehung in tangentialer Richtung

$$v' \cos \beta = v \cos \alpha \quad (23)$$

und in Richtung der Normalen

$$v' \sin \beta = e v \sin \alpha \quad (24),$$

worin  $e$  die Stoßzahl ist. Aus den Gln. (23) und (24) erhält man

$$\tan \beta = e \tan \alpha \quad (25).$$

Setzt man Gl. (21) in Gl. (25) ein, so ergibt sich

$$\tan \beta = e \tan \left[ \arccos \left( \frac{R-r}{R+r} \right) \right] \quad (26).$$

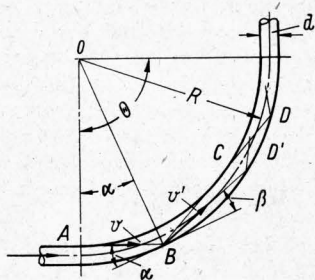


Bild 20. Bestimmung der Stoßstellen im Krümmer.

Bei vollkommen elastischem Stoß bewegt sich das Gutteilchen nach dem Stoß in Richtung BC. Der wirkliche Stoß ist jedoch nicht vollkommen elastisch, so daß sich das Gutteilchen in Richtung  $BD'$  bewegt. Man kann diese Richtung aus den Gln. (25) oder (26) bestimmen, wenn  $e$  sowie  $\alpha$  oder  $(R-r)/(R+r)$  bekannt sind. Die Gln. (25) und (26) gelten nur für ein einzelnes Gutteilchen, im praktischen Transport prallen jedoch viele Gutteilchen auf die Rohrwand, und es ergibt sich eine Verzögerung der Gutgeschwindigkeit im Krümmer. Deshalb treffen die Beziehungen nach den Gln. (25) bzw. (26) für ein Gutteilchen und den wirklichen Stoß bei der pneumatischen Förderung nicht genau zu. Jedoch unter der Annahme, daß die oben erzielte Beziehung für den wirklichen Stoß gelten kann, ergeben sich die in Tafel 1 wiedergegebenen Werte von  $e$ , wenn man die aus den Versuchen erhaltenen Werte von  $\beta$  in Gl. (26) einsetzt. Als Mittelwert von  $e$  erhält man

$$e = 0,75 \quad (27).$$

Tafel 1. Stoßzahlen zwischen Glas und Sesam.

$\theta$	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°
$R/d$	5,05	5,75	6,0	6,15	6,75	9,7	10,0	12,65
$\alpha$	34,9°	32,9°	32,2°	31,8°	30,5°	25,6°	25,2°	22,5°
$\beta$	26,8°	23,3°	24,6°	23,5°	25,1°	19,7°	20,4°	18,6°
$e$	0,73	0,70	0,73	0,70	0,80	0,75	0,79	0,81

## 6. Gutgeschwindigkeit im Krümmer

Durch photographische Aufnahme erhält man Guteintritts- und Gutaustrittsgeschwindigkeiten für einen 90°-Krümmer. In Bild 21 und 22 sind die gemessenen Werte dargestellt, und zwar zeigt Bild 21 die Versuchsergebnisse im Krümmer von der Waagerechten in die Lotrechte nach oben und Bild 22 diejenigen von der Lotrechten nach oben in die Waagerechte. Mit Ausnahme bei Luftgeschwindigkeiten unter 13 m/s bei den Krümmern II wird die Gutaustrittsgeschwindigkeit immer abgebremst. In Bild 21 ist außerdem die nach Weidner [11] berechnete Gutaustrittsgeschwindigkeit eingezeichnet.

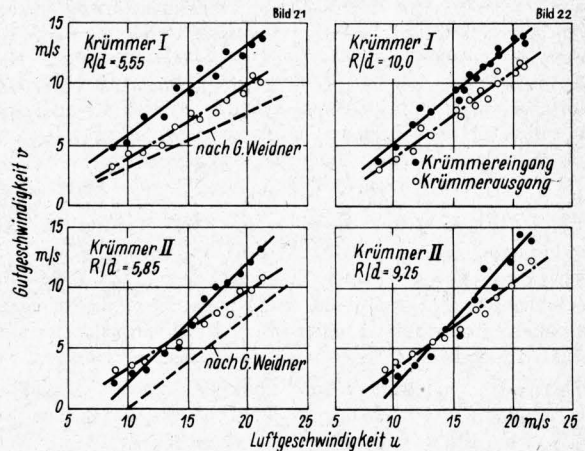


Bild 21 und 22. Gutgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit im Krümmer.

### Zusammenfassung

Aufgrund von Versuchsergebnissen konnten die Strömungsvorgänge bei der pneumatischen Förderung von körnigem Gut in Rohrkrümmern geklärt und Berechnungsgrundlagen für den Druckabfall ermittelt werden. Bei Rohrleitungskrümmern, die von der Waagerechten in die Lotrechte nach oben und solchen Krümmern, die von der Lotrechten nach oben in die Waagerechte führen, bestehen erhebliche Unterschiede in der Fördergutgeschwindigkeit und im Druckabfall.

### Schrifttum

- [1] Segler, G.: Entwerfen landwirtschaftlicher Fördergebläse. Grndl. d. Landtechn. Heft 1 (1951) S. 105/114 und Landtechn. Forsch. 1 (1951) H. 1, S. 2/10.
- [2] Wagner, K.: Pneumatische Förderung. Handb. der phys. u. techn. Mechanik, Leipzig, Bd. 6 (1928), S. 772/807.
- [3] Richter, H.: Der Druckabfall in gekrümmten glatten Rohrleitungen. Forsch.-Arb. Ing. Wesen, Heft 338 (1930), S. 1/30.
- [4] Ito, H.: Theoretische und experimentelle Untersuchung über die Strömung in Krümmern. 5. Bericht. The memoirs of the Institute of High Speed Mechanics, Tohoku Univ., 12 (1955) Nr. 113 (japanisch).
- [5] Richter, H.: Rohrhydraulik. Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1958, S. 176.
- [6] Uematu, T., und Y. Morikawa: Druckverluste in der pneumatischen Förderung von körnigen Gütern. Bulletin of JSME 3 (1960) Nr. 12, S. 444/48.
- [7] Ito, H.: Theoretische und experimentelle Untersuchung über die Strömung in Krümmern. 4. Bericht. The memoirs of the Institute of High Speed Mechanics, Tohoku Univ., 11 (1955) Nr. 119 (japanisch).
- [8] Ito, H.: Pressure losses in curved pipes or in pipe bends. J. Japan Soc. Mech. Engr. 62 (1959) Nr. 490, S. 1634/43 (japanisch).
- [9] Uematsu, T., Y. Morikawa u. a.: Pneumatische Förderung in lotrechter Rohrleitung. Bulletin of JSME 3 (1965) Nr. 31, S. 367/75.
- [10] Eustice, J.: Flow of fluids in curved passages. Engng. 120 (1925), S. 604/05.
- [11] Weidner, G.: Grundsätzliche Untersuchung über den pneumatischen Fördervorgang, insbesondere über die Verhältnisse bei Beschleunigung und Umlenkung. Forsch. Ing.-Wes. 21 (1955) H. 5, S. 145/53.