

Druckverlust in Segment-Krümmern ohne und mit Gutbeladung

Von Yoshinobu Morikawa, Osaka, und Georg Segler, Stuttgart-Hohenheim

Rohrkrümmer sind ein wichtiger Bestandteil pneumatischer Förderanlagen. Sie werden entweder als gebogene Rohrkrümmer oder als geschweißte Segment-Krümmern ausgeführt. Über die zweckmäßige Form und den Druckverlust von Segment-Krümmern standen bisher wenig Unterlagen zur Verfügung. Versuche lieferten nun gesetzmäßige Zusammenhänge zwischen dem Druckverlust solcher Krümmer, ihren Formparametern, der Reynoldszahl und der Gutbeladung der Förderleitung.

1. Einleitung

Trotz der größeren Druckverluste werden Segment-Krümmern aus Gründen der Herstellung und der Kostenersparnis bei geschweißten Rohrleitungen mit großem lichtigem Durchmesser anstelle von Kreiskrümmern weitgehend bevorzugt. Dabei wählt man in zunehmendem Maß Krümmer mit verhältnismäßig kleinem Krümmungshalbmesser. Während beispielsweise im Normblatt DIN 11 700 für landwirtschaftliche Körnergebläse noch ein Krümmungshalbmesser R von $6d$ angegeben wird (mit d als der lichten Rohrweite), verwendet man, wie aus einer Umfrage bei den Herstellern von pneumatischen Förderanlagen hervorgeht, neuerdings allgemein Krümmungshalbmesser zwischen $2d$ und $4d$. Lediglich bei Kreisbögen mit Rohrweiten $d < 150$ mm und bei Verwendung gezogener Stahlrohre sind größere Krümmungshalbmesser von $R = 10d$ bis $20d$ anzutreffen.

H. Kirchbach [1] und *W. Schubart* [2] haben bereits vor 40 Jahren den Druckverlust der Segment-Krümmern untersucht. Beide Forscher benutzten ein Messingrohr von 43 mm Innendmr. *H. Kirchbach* maß den Druckverlust der Segment-Krümmern mit zwei Knickstellennähten. Bei der Untersuchung von *W. Schubart* dagegen hatten die Krümmer drei oder vier Knickstellennähte. Für einzelne Segment-Krümmern haben beide Forscher die Widerstandsbeiwerte über der Reynoldszahl aufgetragen. Allgemeine Beziehungen zwischen den Widerstandsbeiwerten und den Krümmerformen wurden bisher nicht aufgestellt. Bestimmte Vorschläge für Krümmungshalbmesser liegen nicht vor. Für die pneumatische Gutförderung hat *G. Segler* [3] $R/d = 6$ empfohlen.

Um den Druckverlust klein zu halten, muß man zwecks Erreichens eines vorgegebenen Gesamtumlenkungswinkels offenbar den Krümmer aus einer möglichst großen Anzahl von Segmenten zusammensetzen. Der Einfachheit und der Herstellungskosten halber besteht andererseits der Wunsch, Krümmer mit einer möglichst kleinen Anzahl von Segmenten zu verwenden. Die günstigste Anordnung läßt sich nur dann bestimmen, wenn der Druckverlust für die verschiedenen Fälle bekannt ist.

Im folgenden soll versucht werden, Fragen des Druckverlusts in Segment-Krümmern zu klären und Grundlagen für die optimale Ausbildung von Segment-Krümmern, insbesondere für Strömungen von Luft-Feststoff-Gemischen, zu entwickeln. Solche Untersuchungen an Strömungen von Luft-Feststoff-Gemischen sind anscheinend bisher nicht unternommen worden. Dem Bemessen und dem Festlegen der Form der Segment-Krümmern ging eine geometrische Analyse unter Berücksichtigung theoretischer und konstruktiver Überlegungen voraus. Auf Grund praktischer Erfahrungen über den Verschleiß von Krümmern bei der Gutförderung wählte man die Einteilung der Segmente so, daß das Zentrum des Gutstroms beim Eintritt in den Krümmer etwa auf die Mitte des Segmentstücks und nicht auf die Verbindungsnaht trifft. Auf diese Weise ließ sich erreichen, daß sich der Verschleiß nicht auf die als Stoß-

Prof. Dr.-Ing. Yoshinobu Morikawa ist ordentlicher Professor an der Osaka-Universität, Japan, und war als Gastprofessor im Institut für Landtechnik Hohenheim tätig. Prof. Dr.-Ing. Georg Segler ist ordentlicher Professor der Universität Hohenheim mit Lehrverpflichtung an der Universität Stuttgart. Die Untersuchungen wurden mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt.

kante wirkende Nahtstelle konzentriert, sondern auf eine größere Fläche verteilt. Durch diese Maßnahme kann man erfahrungsgemäß die Lebensdauer des Krümmers bis zum Entstehen einer durch Prallverschleiß hervorgerufenen Durchtrittsöffnung an der Aufprallstelle des Krümmers erhöhen. Nach diesen Gesichtspunkten wurden je acht Segment-Krümmers aus Stahlblechrohr und Acrylharzrohr konstruiert, Bild 1 und 2. Als Bezeichnungen werden verwendet:

- a* Knickstellenabstand bzw. Segmentlänge, d.h. Abstand längs der Rohrachse zwischen zwei in Strömungsrichtung aufeinanderfolgenden Knickstellen
- b* Rohrlänge des Krümmers gem. Bild 1 und 2 vor der ersten bzw. hinter der letzten Knickstelle
- d* Rohrlinnendurchmesser
- l₁, l₂* Rohrlänge gem. später Bild 4 zwischen der ersten Druckmeßstelle und dem Krümmereintritt bzw. zwischen dem Krümmeraustritt und der sechsten Druckmeßstelle
- l_e* äquivalente Rohrlänge
- n* Anzahl der Knickstellennähte
- p₁* statischer Druck im Rohrquerschnitt ①
- p₆* statischer Druck im Rohrquerschnitt ⑥
- Δp gesamter Druckverlust im Segment-Krümmers bei Gutförderung
- Δp_L Druckverlust im Segment-Krümmers bei reiner Luftströmung
- Δp_z zusätzlicher Druckverlust bei Gutförderung
- R* Krümmungshalbmesser (Halbmesser des Kreises, der die gebrochene Mittellinie der Rohrachse des Formstücks tangiert, Bild 2)
- Re=vd/v* Reynoldszahl
- r* Rohrhalmesser
- v* mittlere Luftgeschwindigkeit im Rohr
- α Beiwert in Gl. (8 a) und (8 b)
- β Beiwert in Gl. (17)
- δ Richtungsänderungswinkel eines Segments
- ζ gesamter Widerstandsbeiwert bei Materialförderung
- ζ_{Kr} Widerstandsbeiwert des Kreiskrümmers bei reiner Luftströmung
- ζ_L Widerstandsbeiwert des Segment-Krümmers bei reiner Luftströmung
- ζ_z zusätzlicher Widerstandsbeiwert durch die Förderung der Teilchen
- Θ Ablenkungswinkel
- λ Widerstandsbeiwert einer Rohrleitung
- λ_c Widerstandsbeiwert in Gl. (8 a)
- μ Gutbeladung (Verhältnis des Fördergutdurchsatzes zum Förderluftdurchsatz)
- v* kinematische Viskosität der Luft
- Q* Luftdichte.

2. Versuchsanlage

Tafel 1 zeigt die Hauptdaten der untersuchten Segment-Krümmers aus Stahlblechrohr vom Innendurchmesser 156 mm und aus Acrylharzrohr vom Innendurchmesser 50 mm. Die Segment-Krümmers aus Stahlblechrohr von der Dicke 1,5 mm waren durch Schweißen hergestellt worden; die Krümmers aus Acrylharzrohr hatte man dagegen durch Klebmittel angefertigt. Die Segment-Krümmers bestehen mit *n* Knickstellennähten aus gleichen und in gleichen Abständen hintereinanderfolgenden Kniestücken. Die Gesamt-Richtungsänderung der Rohrachse betrug immer 90°. Es wurde Wert darauf gelegt, daß bei der Konstruktion der Segment-Krümmers keine Stoßkante am Übergang zwischen hintereinander geschalteten Kniestücken entstehen konnte.

Bild 1. Untersuchte 90°-Segment-Krümmers.

Maßangaben in mm

Nr. 1 bis 8 Bezeichnung der Krümmers

d innerer Rohrdurchmesser

R Krümmungshalbmesser

a Knickstellenabstand

b Rohrlänge des Krümmers bis zu einem halben Knickstellenabstand vor dem ersten bzw. hinter dem letzten Umlenkungssegment

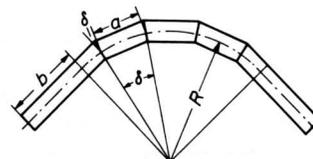
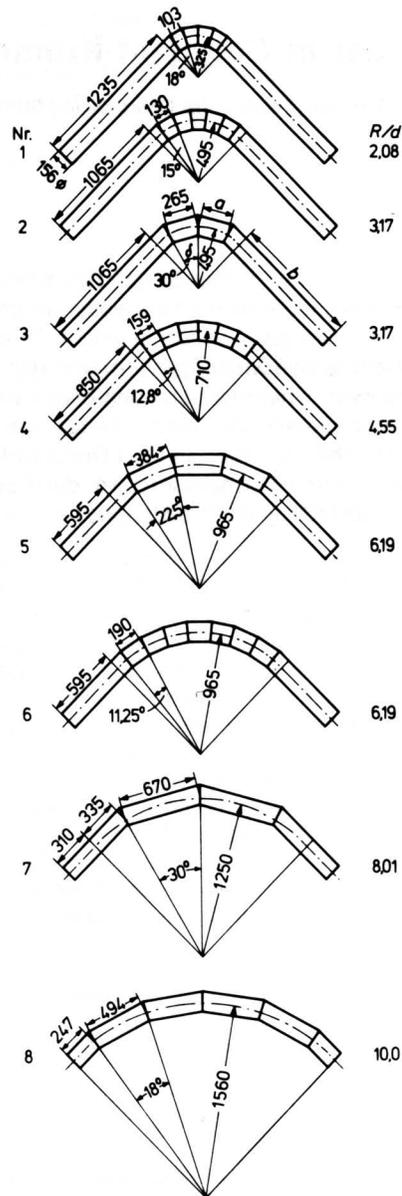


Bild 2. Kenngrößen des Segment-Krümmers (am Beispiel des Krümmers Nr. 5).

a Knickstellenabstand

b Rohrlänge wie in Bild 1

R Krümmungshalbmesser

δ Richtungsänderungswinkel eines Segments

Tafel 1. Geometrische Daten der zum Versuch verwendeten Segment-Krümmen.

Nummer des Segment-Krümmers	Krümmungsverhältnis R/d	Anzahl der Knickstellen-nähte n	Einzelrichtungs-änderungswinkel δ	Gesamt-richtungs-änderungswinkel $\Theta = \Sigma \delta$	Verhältnis der Segmentlänge zum Rohrdurchmesser a/d
1	2,08	5	18°	90°	0,660
2	3,17	6	15°		0,833
3	3,17	3	30°		1,70
4	4,55	7	12,8°		1,02
5	6,19	4	22,5°		2,46
6	6,19	8	11,25°		1,22
7	8,01	3	30°		4,29
8	10,00	5	18°		3,17

Bild 3 und 4 zeigen die Versuchsanlage für die Messungen an Segment-Krümmern aus Stahlblechrohr. Die Förderluft wird von einem Radialgebläse a geliefert. Nach einer Blendenmeßstrecke von 6 m Länge für die Luftdurchsatzbestimmung und einem Schieber d zum Einstellen des Luftdurchsatzes wird über eine stufenlos regelbare Zellenradschleuse h (vgl. Bild 3) das Fördergut in die Förderleitung e eingeschleust. Die Gutdosierung geschieht mittels einer einstellbaren Rechteckblende am Auslauf des Vorratsbehälters h (Bild 3). Nach einer Beschleunigungsstrecke von 6 m folgen der Versuchskrümmer g (Bild 4) und die waagerechte Meßstrecke von ebenfalls 6 m Länge. Die Gutrückführung geschieht in einer teils lotrechten und teils waagerechten Rohrstrecke über einen Zyklonabscheider f (Bild 3) zum Vorratsbehälter h.

Um ohne Umbau der Meßleitung Segment-Krümmen mit verschiedenen Krümmungshalbmessern einbauen und messen zu können, legte man die Anschlüsse nach dem größten zu untersuchenden Segment-Krümmen aus. Bei den kleineren Krümmern wurden dann entsprechende Rohrschwenkel an den Krümmern angeschlossen, so daß die Einbaumaße immer gleich blieben.

Zum Bestimmen des Druckverlusts längs des Rohrs stromabwärts vom Krümmer befanden sich in Abständen von je 1 m am Meßrohr je vier Anbohrungen, die über eine Ringleitung miteinander in Verbindung standen. Der Widerstandsbeiwert der Rohrleitung wurde im geraden, waagerechten Rohr hinter einer 6 m langen Ausgleichsstrecke in einem 3,6 m langen Teilstück der waagerechten Rückleitung bestimmt (Meßstellen 7 und 8 in Bild 4).

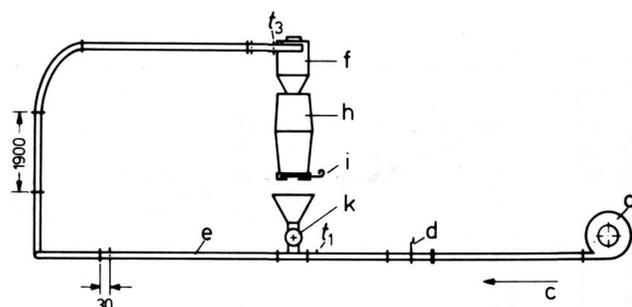


Bild 3. Versuchsanlage. Ansicht.

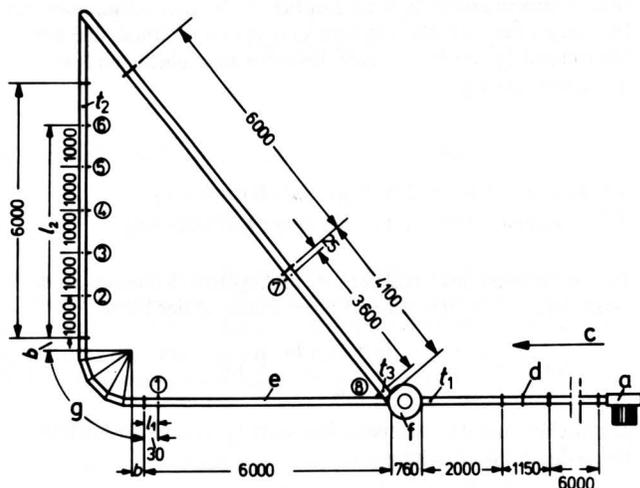
Maßangaben in mm

- a Gebläse
- c Strömungsrichtung
- d Schieber zum Einstellen des Luftdurchsatzes
- e Förderleitung von 156 mm Innendurchmesser
- f Abscheider
- h Vorratsbehälter
- i Dosierschieber
- k Zellenradschleuse
- t_1, t_3 Temperatur der Luftströmung vor der Gutaufgabe bzw. vor dem Abscheider

Bild 4. Versuchsanlage, Draufsicht.

Maßangaben in mm

- a Gebläse
- c Strömungsrichtung
- d Schieber zum Einstellen des Luftdurchsatzes
- e Förderleitung von 156 mm Innendurchmesser
- f Abscheider
- g Meßkrümmer
- b Rohrlänge des Krümmers bis zu einem halben Knickstellenabstand vor dem ersten bzw. hinter dem letzten Segment
- 1 bis 8 Druckmeßstellen für die Drücke p_1 bis p_8
- t_1 bis t_3 Temperatur der Luftströmung vor der Gutaufgabe, hinter der Druckmeßstelle 6 bzw. vor dem Abscheider
- l_1 Rohrlänge zwischen der Druckmeßstelle 1 und dem Krümmerbeginn
- l_2 Rohrlänge zwischen dem Krümmerende und der Druckmeßstelle 6



Zum Messen des Wirkdrucks an der Meßblende und der Differenzdrücke an der Meßstrecke dienten Debro-Miniskope; Wassermanometer zeigten die Drücke an der Blende und am Meßkrümmer an. Zum Bestimmen der Luftzustände wurden jeweils der Barometerstand und die Temperaturen in der Rohrleitung gemessen.

Die Eigenschaften der als Fördergut verwendeten Stoffe (Polystyrol-Granulat und vorgereiniger Weizen) gehen aus Tafel 2 hervor. Das Bestimmen des Gutdurchsatzes geschah nach jeder Messung mittels Stoppuhr und Waage. Die Messungen mit Weizen wurden nur an zwei Krümmern (d.h. an den Krümmern Nr. 3 und 6 in Tafel 1) vorgenommen.

Tafel 2. Kenndaten des Förderguts.

Fördergut	Dichte des Guts kg/m^3	mittlerer Korndurchmesser mm
Polystyrol	1080	2,67
Polystyrol	1025	1,71
Weizen	1220	4,10

3. Versuchsergebnisse und Auswertung

3.1. Wandreibung der Versuchsrohrleitung

Bei der Strömung in der Rohrleitung ist die Oberflächenbeschaffenheit der Rohrwand für den Widerstandsbeiwert λ maßgebend. Zunächst wurde deshalb der Wandreibungsverlust in Abhängigkeit von der Reynoldszahl Re festgelegt. Die Meßwerte für das Stahlblechrohr und das Acrylharzrohr stimmen gut mit der Gleichung

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2,0 \lg (Re \sqrt{\lambda}) - 0,8 \quad (1)$$

für glatte Rohre überein und weichen höchstens um 7,6% von den Werten nach Gl. (1) ab. Die Rohrleitung darf somit als hydraulisch glatt angesehen werden.

3.2. Druckverlauf längs der Strömungsrichtung

Bei jedem Segment-Krümmen wurde der Druckverlauf zwischen den Querschnitten mit den Druckmeßstellen ① und ⑥ gemessen (vgl. Bild 4). Die Druckentnahmestellen ① und ⑥ waren so gewählt, daß sich an ihnen kein Einfluß des Segment-Krümmers bemerkbar macht. Die dazu nötige Strecke beträgt nach *H. Kirchbach* [1] stromaufwärts $1,7d$ bis $2,25d$ von der ersten Knickenebene bzw. $l_1 = 1,14d$ vom Einlauf des Formstücks und nach *W. Schubart* [2] stromabwärts $l_2 = 50d$ vom Auslauf des Formstücks. Die Strecke $l_1 + b$ in Bild 3 entspricht der vorgeschriebenen Länge. Aus konstruktiven Gründen beträgt die Strecke $l_2 + b = 38,5d$ bis $46,4d$ und ist somit etwas kleiner als die geforderte Auslauflänge nach *W. Schubart*. Nach den Meßergebnissen trat jedoch in der Druckentnahmestelle ⑥ kein Einfluß des Segment-Krümmers auf. Nur bei großer Gutbeladung bemerkte man manchmal, daß der Querschnitt ⑥ noch innerhalb des nicht ausgeglichenen Strömungsbereichs lag.

3.3. Druckverluste des Segment-Krümmers

3.3.1. Widerstandsbeiwert ζ_L bei reiner Luftströmung

Zum Berechnen des Druckverlusts im Segment-Krümmen sei der Druckverlust Δp_L der reinen Luftströmung in der Form

$$\Delta p_L = p_1 - p_6 - \lambda \frac{l_1 + 2b + l_2}{d} \frac{\rho}{2} v^2 \quad (2)$$

geschrieben und der Widerstandsbeiwert ζ_L der reinen Luftströmung durch die Gleichung

$$\zeta_L = \Delta p_L \frac{\rho}{2} v^2 = \frac{p_1 - p_6}{\rho v^2} - \lambda \frac{l_1 + 2b + l_2}{d} \quad (3)$$

definiert. Dabei bedeuten ρ die Dichte und v die mittlere Geschwindigkeit der strömenden Luft, d den inneren Rohrdurchmesser sowie $p_1 - p_6$ den auf der Meßstrecke $l_1 + 2b + l_2$ gemessenen Druckabfall (mit p_1 und p_6 als dem Druck an der Meßstelle ① bzw. ⑥).

Für sämtliche untersuchten Segment-Krümmen wurden die Widerstandsbeiwerte ζ_L , die sich aus den Versuchsergebnissen mit Gl. (2) und (3) ergeben, in Abhängigkeit von der Reynoldszahl Re in Bild 5 zusammengestellt. In allen Fällen nimmt ζ_L mit steigender Reynoldszahl zunächst ab und bleibt im Bereich über $Re = 10^5$ fast unabhängig von Re . Es ergibt sich ferner, daß bei Segment-Krümmern der Widerstandsbeiwert einmal von der Anzahl und dem Betrag der hintereinander folgenden Einzelrichtungsänderungen der Rohrachse, also von der relativen Segmentlänge a/d , und zum anderen vom Krümmungsverhältnis R/d abhängt. Die Krümmen Nr. 1, 2, 4 und 6 mit den kleinen Werten von a/d weisen einen kleineren Druckverlust als die Krümmen Nr. 3, 5, 7 und 8 auf. Bei den Krümmen Nr. 7 und 8, deren Krümmungsverhältnis R/d groß

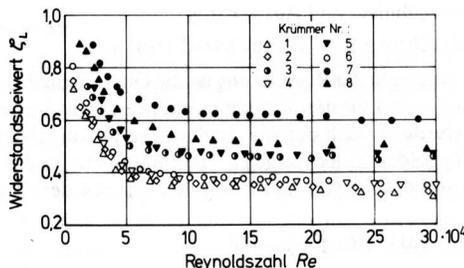


Bild 5. Widerstandsbeiwert ζ_L in Abhängigkeit von der Reynoldszahl Re bei reiner Luftströmung.

ist, läßt sich vermuten, daß der Druckverlust wegen der vergrößerten Gesamtlänge der Segmente zunimmt und der Reibungsverlust im Segment-Krümmen einen großen Teil des Gesamtverlusts ausmacht. Bei $R/d = 6,19$ ist der Druckverlust des Krümmers Nr. 6, der acht Knickstellennähte und Segmente von je $11,25^\circ$ enthält, viel kleiner als der vier Nähte enthaltende Krümmen Nr. 5. Daraus folgt, daß sich der Druckverlust bei gleichbleibendem Krümmungsverhältnis und konstanter Gesamttrichtungsänderung mit der Anzahl der Knickstellennähte erheblich ändert. Für die Krümmen Nr. 2 und 3, die den gleichen Wert $R/d = 3,17$ haben, gilt das gleiche Ergebnis. Der Druckverlust von Nr. 2 ist kleiner als der von Nr. 3, da der Krümmen Nr. 2 einen kleineren Wert a/d als der Krümmen Nr. 3 hat. Aus Bild 2 folgt die Beziehung

$$\frac{a}{d} = 2 \frac{R}{d} \tan \left(\frac{\delta}{2} \right) \quad (4a)$$

bzw. wegen $n\delta = \pi/2$

$$\frac{a}{d} = 2 \frac{R}{d} \tan \left(\frac{\pi}{4n} \right) \quad (4b)$$

mit δ als dem zu einem der n Segmente gehörigen Richtungsänderungswinkel. Mit Hilfe von Gl. (4a) bzw. (4b) erhält man bei gleichbleibendem R/d aus der Vergrößerung der Anzahl n der Knickstellennähte, also aus der Verminderung des Einzelrichtungsänderungswinkels δ die Verkleinerung von a/d . Dies bedeutet, daß sich der Segment-Krümmen mit zunehmender Anzahl der Knickstellennähte dem Kreiskrümmen nähert und der Druckverlust abnimmt. Andererseits ist bekannt, daß der Druckverlust mit abnehmendem Verhältnis R/d nicht immer sinkt. Im allgemeinen haben Werte von $R/d < 2$ keine praktische Bedeutung. Optimale Werte ergeben sich bei allen Geschwindigkeiten für die Segment-Krümmen Nr. 1, 2, 4 und 6.

Zum Ermitteln der verwickelten Abhängigkeit des Widerstandsbeiwerts ζ_L von Re , n , δ , a/d und R/d wurde in Bild 6 das Produkt $\zeta_L \sqrt{d/a}$ über $Re \sqrt{a/d}$ aufgetragen. Hieraus erhält man die Beziehung

$$\zeta_L \sqrt{d/a} = 31,37 (Re \sqrt{a/d})^{-0,394} \quad (5a)$$

für $Re \sqrt{a/d} \geq 10^5$ bzw.

$$\zeta_L \sqrt{d/a} = 0,337 \quad (5b)$$

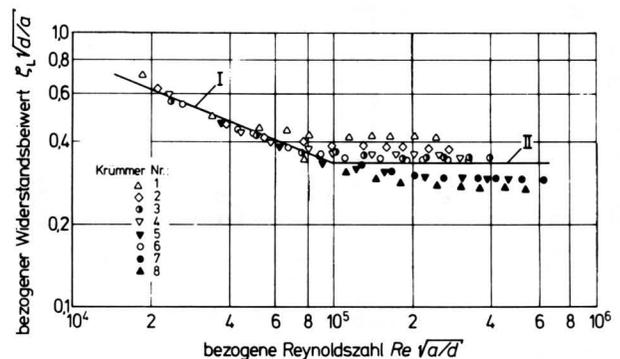


Bild 6. Bezogener Widerstandsbeiwert $\zeta_L \sqrt{d/a}$ in Abhängigkeit von der bezogenen Reynoldszahl $Re \sqrt{a/d}$ bei reiner Luftströmung.

- a Segmentlänge
- d innerer Rohrdurchmesser
- Re Reynoldszahl
- ζ_L Widerstandsbeiwert des Segment-Krümmers bei reiner Luftströmung
- I, II Verlauf nach Gl. (5a) bzw. (5b)

für $Re \sqrt{a/d} > 10^5$. Mit Gl. (4a) und (4b) lassen sich Gl. (5a) und (5b) in der Form

$$\begin{aligned} \zeta_L &= 38,70 Re^{-0,394} \left[\frac{R}{d} \tan \left(\frac{\delta}{2} \right) \right]^{0,303} = \\ &= 38,70 Re^{-0,394} \left[\frac{R}{d} \tan \left(\frac{\pi}{4n} \right) \right]^{0,303} \end{aligned} \quad (6a)$$

für $Re \sqrt{a/d} < 10^5$ bzw.

$$\zeta_L = 0,476 \sqrt{\frac{R}{d} \tan \left(\frac{\delta}{2} \right)} = 0,476 \sqrt{\frac{R}{d} \tan \left(\frac{\pi}{4n} \right)} \quad (6b)$$

für $Re \sqrt{a/d} \geq 10^5$ schreiben.

3.3.2. Äquivalente Rohrlänge l_e

Es ist auch möglich, mit äquivalenten Rohrlängen l_e zu rechnen, die den gleichen Strömungswiderstand wie die Segment-Krümmen haben. Dabei gilt

$$l_e = \zeta_L \frac{d}{\lambda}$$

Bild 7 zeigt die relative äquivalente Rohrlänge l_e/d in Abhängigkeit von der Reynoldszahl. Aus Bild 7 ist ersichtlich, daß die äquivalente Rohrlänge für Segment-Krümmen ein Mehrfaches ihrer geraden Rohrlänge betragen kann.

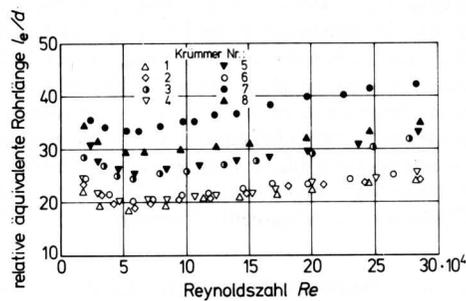


Bild 7. Abhängigkeit der relativen äquivalenten Rohrlänge l_e/d von der Reynoldszahl Re .

3.3.3. Vergleich des Widerstandsbeiwerts ζ_L von Segment-Krümmern mit dem Widerstandsbeiwert ζ_{Kr} des Kreiskrümmers

Man kann den Druckverlust in Segment-Krümmern mit dem des Kreiskrümmers von gleichem Krümmungsverhältnis R/d vergleichen. Der Widerstandsbeiwert ζ_{Kr} des Kreiskrümmers ist nach [4] durch

$$\zeta_{Kr} = 0,00873 \alpha \lambda_c \Theta R/r \quad (8a)$$

für $Re (r/R)^2 < 91$ bzw. durch

$$\zeta_{Kr} = 0,00241 \alpha \Theta Re^{-0,17} (R/r)^{0,84} \quad (8b)$$

für $Re (r/R)^2 > 91$ gegeben. Darin bedeuten $r = d/2$ den Rohrradius, α einen Beiwert, λ_c einen Widerstandsbeiwert und Θ den gesamten Ablenkungswinkel des Krümmers. Der Beiwert α beträgt bei einem 90° -Krümmen

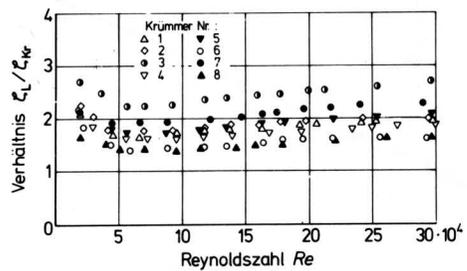
$$\alpha = 0,95 + 17,2 (R/r)^{-1,96} \quad (9a)$$

für $R/r < 19,7$ und

$$\alpha = 1 \quad (9b)$$

für $R/r > 19,7$.

Bild 8. Verhältnis des Widerstandsbeiwerts ζ_L eines Segment-Krümmers zum Widerstandsbeiwert ζ_{Kr} des Kreiskrümmers mit gleichem Krümmungsverhältnis in Abhängigkeit von der Reynoldszahl Re .



Der Beiwert λ_c in Gl. (8a) wird aus der Beziehung

$$\lambda_c (R/r)^{1/2} = \frac{0,316}{[Re (r/R)^2]^{1/5}} \quad (10)$$

bestimmt [4]. Zum Vergleich wurde in **Bild 8** das Verhältnis ζ_L/ζ_{Kr} in Abhängigkeit von der Reynoldszahl aufgetragen. Hieraus geht hervor, daß der Druckverlust in Segment-Krümmern etwa das 1,4- bis 2,7fache des Druckverlusts für den Kreiskrümmen mit dem gleichen Krümmungshalbmesser ist; d.h. es gilt

$$\zeta_L = C \zeta_{Kr} \quad (11)$$

mit $C = 1,4$ bis $2,7$. Nach **Bild 8** weisen die Segment-Krümmen Nr. 6 und 8 den kleinsten Unterschied auf; der größte Unterschied ergibt sich für den Krümmen Nr. 3.

3.4. Zusätzlicher Druckverlust bei Gutförderung

Die Versuche bei Gutförderung sollen Aufschluß darüber geben, wie weit die geförderten Teilchen den Druckverlust beeinflussen. Mit dem zusätzlichen Druckverlust Δp_z durch die Gutförderung folgt der Gesamtdruckverlust Δp zu

$$\Delta p = \Delta p_L + \Delta p_z \quad (12)$$

Aus Gl. (12) entsteht das Verhältnis

$$\frac{\Delta p}{\Delta p_L} = 1 + \frac{\Delta p_z}{\Delta p_L} \quad (13)$$

bzw. mit dem Gesamtwiderstandsbeiwert

$$\zeta = \frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2} v^2} \quad (14)$$

und dem zusätzlichen Widerstandsbeiwert

$$\zeta_z = \frac{\Delta p_z}{\frac{\rho}{2} v^2} \quad (15)$$

der Ausdruck

$$\frac{\zeta}{\zeta_L} = 1 + \frac{\zeta_z}{\zeta_L} \quad (16)$$

In **Bild 9 bis 11** wurde das Verhältnis ζ/ζ_L in Abhängigkeit von der Gutbeladung μ aufgetragen. Die einzelnen Meßpunkte lassen sich jeweils recht gut mit einer Geraden erfassen. Aus den Kurven geht hervor, daß der Druckverlust bei Gutförderung mit zunehmender Gutbeladung wächst. Ähnliche Ergebnisse wurden bei der Förde-

Bild 9 bis 11. Verhältnis des Widerstandsbeiwerts ζ eines Segment-Krümmers bei Gutförderung zum Widerstandsbeiwert ζ_L bei reiner Luftförderung in Abhängigkeit von der Gutbeladung μ .

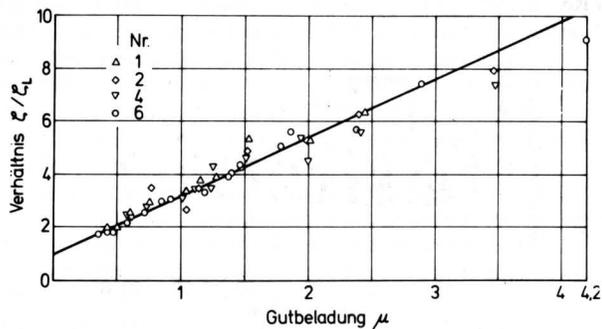


Bild 9. Ergebnisse für die Segment-Krümmen Nr. 1, 2, 4 und 6.

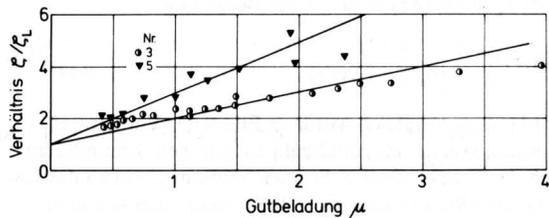


Bild 10. Ergebnisse für die Segment-Krümmen Nr. 3 und 5.

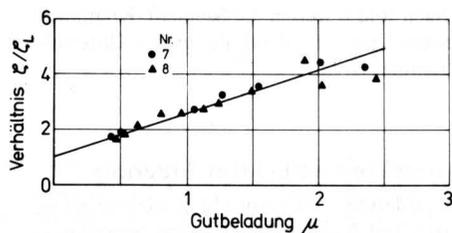


Bild 11. Ergebnisse für die Segment-Krümmen Nr. 7 und 8.

runge in Kreiskrümmern gefunden [5 bis 7]. Nach den neuen Versuchsergebnissen dürfte die Verschiedenheit der verwendeten Fördergüter (vgl. Tafel 2) auf den Druckverlust im untersuchten Fall keinen merklichen Einfluß haben. Die Geraden in Bild 9 bis 11 haben zwar nicht das gleiche Gefälle, aber die Segment-Krümmen Nr. 1, 2, 4 und 6, die bei reiner Luftströmung nach Bild 5 einen kleineren Druckverlust aufweisen, ergeben gem. Bild 9 keine Unterschiede. Vergleicht man alle Krümmen, so haben Nr. 3, 7 und 8 das kleinste Gefälle. Es sind die Krümmen mit den großen Segmentstücken. Dieser Unterschied ist wahrscheinlich auf die gleichmäßigere Ablenkung des Gutstrahles nach dem ersten Aufprallpunkt im Krümmer bei Nr. 3, 7 und 8 zurückzuführen. Setzt man entsprechend Bild 9 bis 11

$$\zeta_z/\zeta_L = \beta \mu \quad (17)$$

mit β als einem Beiwert, so folgt

$$\zeta_z = \beta \mu \zeta_L \quad (18)$$

mit $\beta = 0,514$ bis $0,786$ nach den Versuchsergebnissen. Die genauen Werte von β eines jeden Segment-Krümmers sind in **Tafel 3** wiedergegeben. Der zusätzliche Druckverlust beträgt somit

$$\Delta p_z = \beta \mu \zeta_L (Qv^2/2) \quad (19)$$

Für die endgültige Beurteilung des Druckverlusts bei Gutförderung ist der Gesamtdruckverlust maßgebend. Dieser folgt zu

$$\Delta p = (\zeta_L + \zeta_z) (Qv^2/2) \quad (20)$$

bzw. mit Gl. (19) zu

$$\Delta p = (1 + \beta \mu) \zeta_L (Qv^2/2) \quad (21)$$

Tafel 3. Werte des Faktors β in Gl. (18).

Nummer des Segment-Krümmers	Werte von β bei der Förderung von	
	Polystyrol-Granulat	Weizen
1	0,727	—
2	0,660	—
3	0,751	0,680
4	0,627	—
5	0,608	—
6	0,613	0,654
7	0,786	—
8	0,514	—

Mit Rücksicht auf den Druckverlust sowohl bei reiner Luftströmung als auch bei Gutförderung dürfte man in den Segment-Krümmern Nr. 1, 2, 4 und 6 das Optimum hinsichtlich des Widerstandsverhaltens finden. Dies zeigt, daß man entgegen früheren Annahmen auch Segment-Krümmen mit einem Krümmungshalbmesser $R < 6d$ wählen und bis zu einem Wert von 2,0 herunter gehen kann.

Hinsichtlich der Herstellungskosten bieten Krümmen mit kleinem Krümmungshalbmesser und solche mit einer kleinen Segmentzahl Vorteile. Der Einfluß der segmentmäßigen Gestaltung des Krümmers auf den Verschleiß wurde nicht untersucht.

4. Zusammenfassung

Die Erscheinungen in Segment-Krümmern sind sehr verwickelt. Die beschriebenen Versuchsergebnisse genügen deshalb noch nicht dazu, alle Eigenschaften der Segment-Krümmen zu erfassen. Aus den Versuchsergebnissen wurden jedoch einige gesetzmäßige Beziehungen über die Abhängigkeit des Druckverlusts der Segment-Krümmen sowohl von den Bauelementen, aus denen die Segment-Krümmen bestehen, als auch von der Reynoldszahl und der Gutbeladung hergeleitet. Es stehen Gleichungen zum Berechnen des Druckverlusts sowohl bei reiner Luftströmung als auch des Druckverlusts bei Gutförderung zur Verfügung. Unter den acht verschiedenen Segment-Krümmern wurde das strömungstechnische Optimum in den Segment-Krümmern Nr. 1, 2, 4 und 6 gefunden.

Für ein genaueres Erfassen des Einflusses der Anzahl der Knickstellennähte und des Einzelrichtungsänderungswinkels δ auf den zusätzlichen Druckverlust bei Gutförderung sowie auf die Teilchenbahn in Segment-Krümmern sind noch weitere Untersuchungen nötig.

Schrifttum

- [1] *Kirchbach, H.*: Der Energieverlust in Kniestücken. Mitt. Hydraul. Inst. T.H. München Heft 3 (1929) S. 68/97.
- [2] *Schubart, W.*: Der Energieverlust in Kniestücken bei glatter und rauher Wandung. Mitt. Hydraul. Inst. T.H. München Heft 3 (1929) S. 121/44.
- [3] *Segler, G.*: Konstruktion landwirtschaftlicher Fördergebläse. Landtechn. Forsch. Bd. 1 (1951) Nr. 1, S. 2/10.
- [4] *Ito, H.*: Pressure losses in curved pipes or in pipe bends (Orig. jap.). J. Japan Soc. Mech. Engrs. Vol. 62 (1959) Nr. 490, S. 1634/43.
- [5] *Uematu, T., u. Y. Morikawa*: Druckverluste im Krümmer einer waagerechten Förderung von körnigen Gütern. Bull. Jap. Soc. Mech. Engrs. (JSME) Bd. 4 (1961) Nr. 15, S. 531/38.
- [6] *Uematu, T., Y. Morikawa u.a.*: Pneumatische Förderung in lotrechter Rohrleitung. Bull. Jap. Soc. Mech. Engrs. (JSME) Bd. 8 (1965) Nr. 31, S. 367/75.
- [7] *Morikawa, Y.*: Druckabfall und Bewegung der Gutteilchen in Krümmern pneumatischer Förderleitung bei kleiner Gutbeladung. Grundl. Landtechnik Bd. 16 (1966) Nr. 2, S. 65/69.