

BERECHNUNG DES DRUCKABFALLES IN KRÜMMERN PNEUMATISCHER FÖRDERLEITUNGEN BEI EINBAU IN LOTRECHTER EBENE

Von

L. KOVÁCS

Lehrstuhl für Wasserkraftmaschinen, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 30. Dezember, 1965)

Vorgelegt von Prof. Dr. J. VARGA

1. Einleitung

In Krümmern von Rohrleitungen pneumatischer Förderanlagen entstehen größere Druckabfälle als in geraden Rohrabschnitten gleicher Länge. Die Größe des Druckabfalles in den Krümmern erfassen zu können, ist für die Berechnung des Gesamtdruckabfalles in der Rohrleitung von eminenter Bedeutung.

Die Berechnungsmethode, die hier dargelegt werden soll, dient zur Ermittlung des Druckabfalles in beliebigen, nicht aus Segmenten zusammengeschweißten Krümmern mit unterschiedlichem Radius und Rohrdurchmesser, die das Fördergut

1. in lotrechter Ebene aus der horizontalen in die vertikale, oder
2. in lotrechter Ebene aus der vertikalen in die horizontale Richtung umlenken.

Das Berechnungsverfahren erstreckt sich indessen nicht auf die Bestimmung des Druckabfalles in Krümmern fallender Leitungen, gleichviel ob diese aus der horizontalen in die vertikale oder aus dieser in die waagrechte Richtung überleiten, da derartige Krümmen in der Praxis nur selten vorkommen.

Die hier abzuleitenden Zusammenhänge für den Druckabfall in Krümmern haben für jede Art körnigen Fördergutes Geltung. Bei ihrer Ermittlung und experimentellen Überprüfung diente — als konkretes Beispiel — Weizen als Fördergut.

Auf Fördergut anderer Art müssen die Ergebnisse — nach experimenteller Bestimmung der kennzeichnenden Parameter (μ , f_0 , C usw.) — sinngemäß übertragen werden.

2. Bezeichnungen

A	m^2	Rohrleitungsquerschnitt
$b' = \sqrt{\frac{\gamma_g f_0 C \xi_n}{gm}}$	$1/m$	eine Konstante
$B = \frac{\gamma_g}{2g} f_0 C$	$\frac{kps^2}{m^2}$	eine Konstante

$B_1 = \frac{\gamma_g}{g} f_0 C c_g$	$\frac{\text{kps}}{\text{m}}$	eine Konstante
$B_2 = \frac{\gamma_g}{2g} f_0 C - \xi_h \frac{m}{2}$	$\frac{\text{kps}^2}{\text{m}^2}$	eine Konstante
$B'_2 = \frac{\gamma_g}{2g} f_0 C - \xi_s \frac{m}{2}$	$\frac{\text{kps}^2}{\text{m}^2}$	eine Konstante
c_g	m/s	die Förderluftgeschwindigkeit
c_m	m/s	die Geschwindigkeit des Fördergutes
$c_{mh\infty}$	m/s	die Grenzgeschwindigkeit der waagrecht Förderung
$c_{ms\infty}$	m/s	die Grenzgeschwindigkeit der lotrechten Förderung
c_{m1}	m/s	die Geschwindigkeit des Materialteilchens vor dem Krümmer
c_{m2}	m/s	die Geschwindigkeit des Materialteilchens hinter dem Krümmer
C		der auf die Oberfläche f_0 des Materialteilchens bezogene Widerstandskoeffizient
$\Delta c_{mh} = c_{mh\infty} - c_{m2}$	m/s	die Geschwindigkeitsabnahme in dem aus der lotrechten in die waagrechte Richtung umlenkenden, in lotrechter Ebene eingebauten Krümmer
$\Delta c_{ms} = c_{ms\infty} - c_{m2}$	m/s	Die Geschwindigkeitsabnahme in dem aus der waagrecht in die lotrechte Richtung umlenkenden, in lotrechter Ebene eingebauten Krümmer
C_p	kp	die Zentripetalkraft
f_0	m^2	der äquivalente Querschnitt des Materialteilchens
g	m/s^2	die Schwerebeschleunigung
G	kp	das Gewicht des Materialteilchens
K, K_1	kp	Massenkräfte
l	m	die in der Zeit t zurückgelegte Weglänge
L_i	m	die Länge des Anlaufabschnittes
m	$\frac{\text{kps}^2}{\text{m}}$	die Masse eines Materialteilchens

n	St	Zahl der Materialteilchen
N_b	$\frac{\text{kpm}}{\text{s}}$	die zur Materialbeförderung dem Förderluftstrom entnommene Leistung
$N_G = G c_m$	$\frac{\text{kpm}}{\text{s}}$	die auf das Heben eines Materialteilchens aufgewendete Leistung
$N_S = S c_m$	$\frac{\text{kpm}}{\text{s}}$	der Leistungsverlust infolge der Zusammenstöße
$N_{\text{Slip}} = P_1 w$	$\frac{\text{kpm}}{\text{s}}$	der slipbedingte Leistungsverlust
Δp_{kr}	$\frac{\text{kp}}{\text{m}^2}$	der Gesamtdruckabfall im Krümmer
Δp_m	$\frac{\text{kp}}{\text{m}^2}$	der durch die Materialförderung bedingte zusätzliche Druckabfall
Δp_{m1}	$\frac{\text{kp}}{\text{m}^2}$	der im Krümmer durch die Vortriebskraft verursachte Druckabfall
Δp_{m2}	$\frac{\text{kp}}{\text{m}^2}$	der Druckabfall bei neuerlicher Beschleunigung des Fördergutes
Δp_{m3}	$\frac{\text{kp}}{\text{m}^2}$	der zum Anheben des ungleichmäßig verteilten Fördergutes erforderliche zusätzliche Druckabfall
$P_0 = \frac{\gamma_g}{2g} f_0 C c_g^2$	kp	die der Fördergutgeschwindigkeit $c_m = 0$ zugeordnete Vortriebskraft
$P'_0 = \frac{\gamma_g}{2g} f_0 C c_g^2 - G$	kp	eine Konstante
$P_1 = \gamma_g \frac{w^2}{2g} f_0 C$	kp	die Vortriebskraft
$P_T = G \sin \varphi$	kp	die Komponente des Materialteilchengewichtes in Bahrichtung
$P_N = G \cos \varphi$	kp	die Komponente des Materialteilchengewichtes senkrecht auf die Bahnrichtung
$P_{T1} = G \cos \varphi$	kp	die Komponente des Materialteilchengewichtes in Bahnrichtung
$P_{N1} = G \sin \varphi$	kp	die Komponente des Materialteilchengewichtes senkrecht auf die Bahnrichtung

$q_g = Ac_g$	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	die die Rohrleitung durchströmende Förderluftmenge
Q_m	$\frac{\text{kp}}{\text{s}}$	die Fördergutmenge
S, S_1	kp	die Reibungskräfte
R	m	der Krümmerhalbmesser
t	sec	die Zeit
$w = v_g - c_m$	m/s	die Relativgeschwindigkeit
$\alpha = \frac{\sqrt{B_1^2 - 4B_2 P_0'}}{m}$	l/m	eine Konstante
γ_g	$\frac{\text{kp}}{\text{m}^3}$	die Wichte der Förderluft
$\varepsilon' = \frac{B_1}{B_2}$	m s	eine Konstante
$\varepsilon'' = \frac{B_1}{B_2}$	m/s	eine Konstante
ζ_0		ein Widerstandskoeffizient
μ_0		die Reibungszahl
ξ_h	l/m	ein Proportionalitätsbeiwert
ξ_s	l/m	ein Proportionalitätsbeiwert
φ		Grad der Zentriwinkel

3. Aus der horizontalen in die vertikale Richtung umlenkende Krümmer in lotrechter Ebene

3.1. Erklärung des krümmerbedingten Druckabfalles

Der Druckabfall im Krümmer wird im Sinne der Gedankengänge PÁPAIS [6] als aus zwei Teilen zusammengesetzt betrachtet, es gilt mithin

$$\Delta p_{kr} = \Delta p_m + \Delta p_0 \quad (\text{kp/m}^2). \quad (1)$$

Der durch die Materialförderung bedingte zusätzliche Druckabfall Δp_m läßt sich damit erklären, daß die Materialteilchen während ihrer Bewegung durch den Krümmer unter dem Einfluß der auf sie einwirkenden Kräfte an der Krümmeraußenwand entlanggleiten, was infolge der Gleitreibung zu einer

Verminderung ihrer Geschwindigkeit führt. Im Gefolge der so entstehenden Verzögerung erhöht sich die Relativgeschwindigkeit $w = c_g - c_m$ und in weiterer Folge auch die Arbeit der Vortriebskraft, ein Umstand, der sich in einem im Krümmer auftretenden Druckabfall in der Förderluft manifestiert.

Sobald das Materialteilchen den Krümmer verlassen hat, hört der Einfluß der Zentripetalkraft auf seine Bewegung auf. Im weiteren steht es nur noch unter der Einwirkung der Vortriebs- und der Gewichtskraft sowie der

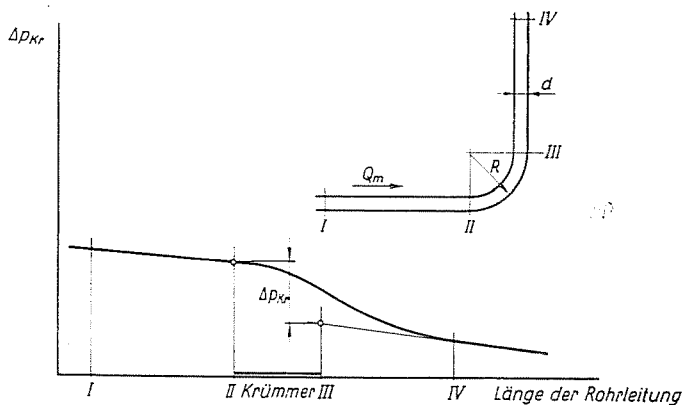


Abb. 1. Skizze zur Bestimmung von Δp_{kr}

weit geringeren, aus den Stößen resultierenden Rückhaltekraft, der Förderluftstrom wird es also — sofern die folgende gerade Leitungsstrecke lang genug ist —, auf die Grenzgeschwindigkeit $c_{ms\infty}$ der Förderung im lotrechten Rohr beschleunigen. Ähnlich wie oben wird auch hier die zur neuerlichen Beschleunigung des Fördergutteilchens erforderliche Arbeit aus dem Druckabfall in der Förderluft gedeckt.

Sobald die Fördergutteilchen den Krümmer verlassen haben, erfahren sie in der vertikalen Beschleunigungsstrecke der Rohrleitung eine Beschleunigung, die ihre gleichmäßige Verteilung in diesem Abschnitt verändert, so daß hier mit zusätzlicher Hebearbeit (zur Überwindung der Schwerkraft) gerechnet werden muß, die zusätzlichen Druckabfall zur Folge hat.

Der zusätzliche Druckabfall infolge der Materialförderung im Krümmer setzt sich aus diesen drei Teilen zusammen.

Die Abb. 1 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen dem Druckabfall in einem Rohrleitungsabschnitt einerseits und der Rohrleitungslänge andererseits. Wie aus der Abbildung erhellt, entsteht der Druckabfall teils im Krümmer selbst, teils hinter diesem. Der Gesamtdruckabfall Δp_{kr} ist durch Verlängerung der geraden Druckabfall-Linien vor und hinter dem Krümmer in der Abbildung 1 aufgetragenen Weise bestimmbar.

Die Größe des Druckabfalls hängt von den Kennwerten des Fördergutes, von den Krümmerabmessungen und von der Größe der Geschwindigkeitsabnahme ab, die sich ihrerseits aus der Bewegungsgleichung für das im Krümmer bewegte Teilchen errechnet. Zunächst soll also diese aufgeschrieben werden.

Die Aufstellung der Bewegungsgleichung kann nur von gewissen einschränkenden Annahmen ausgehen, da die vielfachen Verknüpfungen zwischen den zahlreichen Parametern, die den physikalischen Vorgang in der Rohrleitung beeinflussen, rechnerisch nicht erfaßt werden könnten. Es werden demnach folgende Annahmen und Näherungen aufgestellt:

1) Jedes einzelne Fördergutteilchen gelangt am Krümmereingang an die Bogenaußenwand des Krümmers und gleitet an dieser entlang bis zum Krümmerausgang, an dem die Reibung aufhört.

2) Die aerodynamische Kraft, die im Krümmer auf das Fördergutteilchen wirkt, wird so in die Rechnung einbezogen, als wäre das Teilchen vom Förderstrom völlig umströmt.

3) Die durch den Fördergutstrom bedingten Änderungen des Luftstrom-Geschwindigkeitsprofils bleiben unberücksichtigt.

4) Die Sekundärströmung im Krümmer sowie die durch diese ausgelösten Änderungen des Geschwindigkeitsprofils bleiben vernachlässigt.

5) Unberücksichtigt bleiben ferner die in Abhängigkeit von der Reynoldsschen Zahl eintretenden Änderungen des Widerstandskoeffizienten C . Bei der pneumatischen Förderung von Getreide und ähnlichem körnigem Gut verursacht diese Vernachlässigung keinen nennenswerten Fehler.

6) Die Wichte der Förderluft wird als konstant angenommen.

3.2. Die Bewegungsgleichung für das im Krümmer fortbewegte Teilchen

Auf das Fördergutteilchen wirken während seiner Bewegung im Krümmer folgende Kräfte:

1) die aerodynamische, das Teilchen weiterfördernde Kraft

$$P_1 = \gamma_g \frac{w^2}{2g} f_0 C \quad (\text{kp}), \quad (2)$$

wobei C den auf die Oberfläche f_0 des Fördergutteilchens bezogenen aerodynamischen Widerstandskoeffizienten bezeichnet. Sein Wert kann experimentell bestimmt werden;

2) die Zentripetalkraft C_p gemäß

$$C_p = m \frac{c_m^2}{R} \quad (\text{kp}); \quad (3)$$

3) die die Teilchenbewegung hemmende Reibungskraft S_1 im Sinne der Formel

$$S_1 = \mu_0 [P_N + C_p] = \mu_0 \left[G \cos \varphi + \frac{G c_m^2}{gR} \right] \quad (\text{kp}); \quad (4)$$

4) die in der Bahnrichtung wirksame Komponente des Teilchengewichtes

$$P_T = G \sin \varphi \quad (\text{kp}). \quad (5)$$

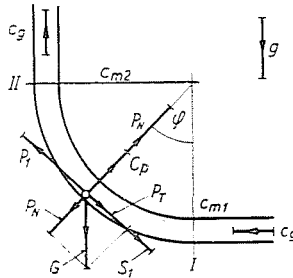


Abb. 2. Die am Fördergutteilchen während seiner Bewegung im Krümmer angreifenden Kräfte

Aus diesen Kräften schreibt sich nunmehr die Bewegungsgleichung für das Fördergutteilchen in der Form

$$m \frac{dc_m}{dt} = \frac{\gamma_g}{2g} f_0 C [c_g - c_m]^2 - \mu_0 \left[G \cos \varphi + \frac{G c_m^2}{gR} \right] - G \sin \varphi. \quad (6)$$

Mit

$$c_m = R \frac{d\varphi}{dt} \quad (7)$$

geht die Differentialgleichung (6) nach Zusammenziehung und Ordnung in die Form

$$\frac{dc_m}{d\varphi} = \frac{R}{m} \left[\left(B - \frac{\mu G}{gR} \right) c_m + \frac{B c_g^2 - G(\mu_0 \cos \varphi + \sin \varphi)}{c_m} - 2B c_g \right] \quad (8)$$

über, wobei $B = \frac{\gamma_g}{2g} f_0 C$.

Der Gültigkeitsbereich von Gl. (8) muß nach unten beschränkt werden. Bei Krümmungshalbmessern von $R \leq R_{\min}$ werden sich nämlich die Fördergutteilchen im Krümmer nicht mehr gleitend, sondern prallend fortbewegen. Für diesen Fall verliert die Gl. (8) ihre Gültigkeit. Auf Grund von Versuchen kann $R_{\min} \approx 0,25$ m gesetzt werden.

Auf analytischem Wege läßt sich Gl. (8) nicht lösen, weshalb zur Lösung in stufenweiser Annäherung ein elektronisches Rechengerät verwendet wurde. Es lieferte die Werte der Funktion $c_m = f(\varphi)$ für Zentriwinkelabstufungen von je $\varphi = 5^\circ$ bei unterschiedlichen Förderluftgeschwindigkeiten auf 4 Dezimalen genau und damit die Grundlagen für die Auftragung der Diagramme $c_{m2} = f(R)$ und $\Delta c_{ms} = c_{ms2} - c_{m2} = f(R)$ gemäß Abb. 9.

3.3 Die Bewegungsgleichung für das Teilchen während seiner Bewegung in dem an den Krümmer anschließenden lotrechten geraden Abschnitt

Nach dem Verlassen des Krümmers erfährt das Fördergutteilchen im lotrechten geraden Beschleunigungsabschnitt der Leitung — sofern diese lang genug ist —, eine Beschleunigung bis zur Grenzgeschwindigkeit c_{ms2} . Die Bewegung des Teilchens bestimmen hierbei folgende Kräfte:

1) die aerodynamische Kraft P_1 , die das Teilchen fortbefördert, gemäß

$$P_1 = \gamma_g \frac{w^2}{2g} f_0 C \quad (\text{kp}); \quad (9)$$

2) die die Teilchenbewegung hemmende Bremskraft, die sich aus dem Anprall der Teilchen an der Rohrwand ergibt, zu

$$S = \xi_s \frac{G c_m^2}{2g} \quad (\text{kp}). \quad (10)$$

Hier ist ξ_s jener Proportionalitätsbeiwert, der zum Ausdruck bringt, daß die Fördergutteilchen im lotrechten geraden Rohr wegen der Stöße je lfd. m. einen Teil ihrer Bewegungsenergie einbüßen. Nach PÁPAI [6] ist für Weizen $\xi_s = 0,186$ l/m.

3) das Gewicht G des Teilchens.

Unter Berücksichtigung dieser Kräfte schreibt sich die Bewegungsgleichung für das im lotrechten geraden Beschleunigungsabschnitt der Rohrleitung bewegte Fördergutteilchen nach Zusammenziehung der Konstanten und nach Ordnung in der Form

$$m \frac{dc_m}{dt} = B'_2 c_m^2 - B_1 c_m + P'_0, \quad (11)$$

worin

$$B'_2 = \frac{\gamma_g}{2g} f_0 C - \xi_s \frac{m}{2}; \quad P'_0 = \frac{\gamma_g}{2g} f_0 C c_g^2 - G; \quad B_1 = \frac{\gamma_g}{g} f_0 C c_g.$$

Aus der Bedingung $\frac{dc_m}{dt} = 0$ läßt sich jene Grenzgeschwindigkeit ermitteln, der das Fördermittelteilchen nach der Zeit $t = \infty$ bei konstanter Förderluftgeschwindigkeit zustrebt. Sie schreibt sich zu

$$c_{ms\infty} = \frac{B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4B_2'P_0'}}{2B_2'} \quad (\text{m/s}). \quad (12)$$

Nach Trennung der Veränderlichen und unter Berücksichtigung der einem $t = 0$ zugehörigen Randbedingung $c_m = c_{m_2}$ sowie der Beziehung (12) läßt sich die Gleichung (11) integrieren.

Mit $\Delta c_{ms} = c_{ms\infty} - c_{m_2}$ sowie mit $\alpha = \frac{\sqrt{B_1^2 - 4B_2'P_0'}}{m}$ hat man schließlich

$$c_m = \frac{\Delta c_{ms} [2c_{ms\infty} - \varepsilon'']}{e^{\alpha t} [\varepsilon'' - 2c_{ms\infty} + \Delta c_{ms}] - \Delta c_{ms}} + c_{ms\infty} \quad (\text{m/s}). \quad (13)$$

Der in der Zeit t zurückgelegte Weg errechnet sich zu

$$l = \int c_m(t) dt + \text{konst.} \quad (14)$$

und der zurückgelegte Weg zu

$$l = c_{ms\infty} t + \frac{\varepsilon'' - 2c_{ms\infty}}{\alpha} \ln \frac{(\varepsilon'' - 2c_{ms\infty}) e^{\alpha t}}{(\varepsilon'' - 2c_{ms\infty} + \Delta c_{ms}) e^{\alpha t} - \Delta c_{ms}}. \quad (15)$$

Aus der mit Hilfe des elektronischen Rechengertes ermittelten Lösung der Gleichung (8) bzw. anhand der Gl. (13) kann die Geschwindigkeit des Fördergutteilchens während seiner Bewegung im Krümmer und beim Verlassen desselben in Abhängigkeit von der Zeit ermittelt werden.

Die Abb. 3/a veranschaulicht die zeitabhängige Änderung der Weizenkorngeschwindigkeit bei einer Förderluftgeschwindigkeit von $c_g = 30$ m/s sowie bei einem $\varphi = 90^\circ$ und einem $R = 1$ m.

Aus Abb. 3/b geht die zeitabhängige Änderung der Vortriebs- bzw. der Bremskraft hervor.

Die Abb. 3/c schließlich zeigt, wie sich die Leistung eines Fördergutteilchens ($n = 1$ St) zeitabhängig ändert. Zur Fortbewegung des Fördergutes wird der Förderluft die Leistung

$$N_b = q_g \cdot \Delta p = A \cdot c_g \frac{nP_1}{A} = P_1 \cdot c_g \quad (\text{kpm/s}) \quad (16)$$

entzogen.

Mit $c_g = c_m + w$ wird

$$N_b = P_1 c_m + P_1 w \quad (\text{kmp/s}). \quad (17)$$

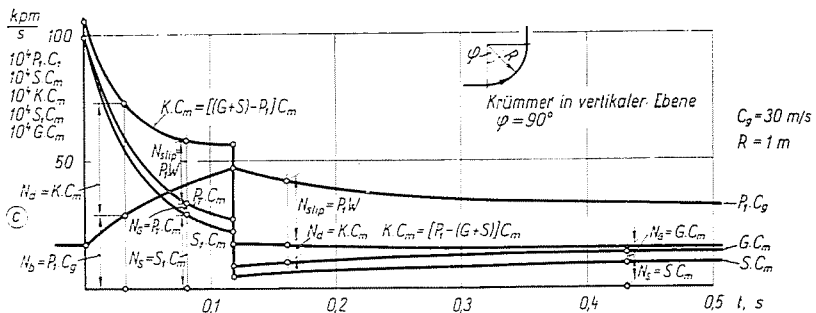
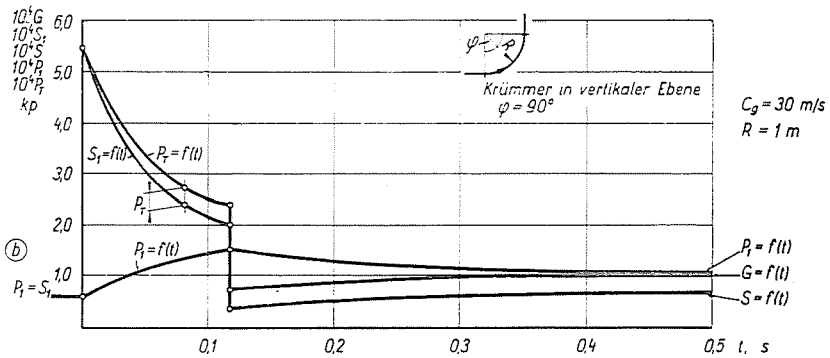
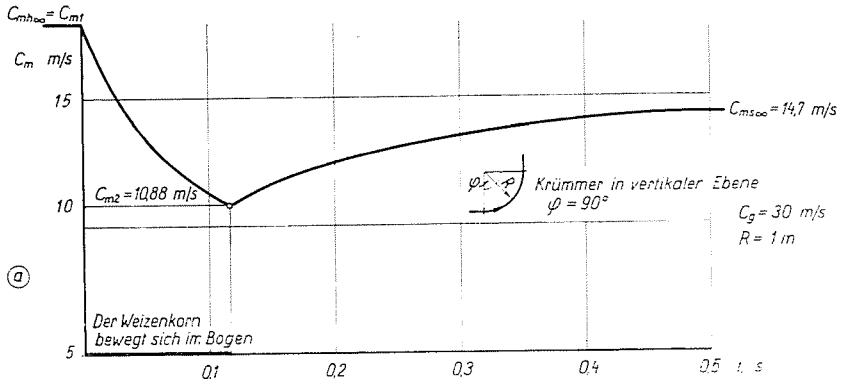


Abb. 3. Zeitabhängige Änderung a) der Geschwindigkeit, b) der Kräfte, c) der Leistung

Die zur Fortbewegung des Fördergutes der Förderluft entnommene zusätzliche Leistung (bei $n = 1$ St) setzt sich mithin aus zwei Teilen zusammen, u. zw. aus der Leistung $P_1 c_m$, d. h. aus derjenigen der Vortriebskraft, und aus der Leistung $P_1 w$, d. h. der Leistung des Slipverlustes während der Förderung.

3.4 Berechnung des krümmenbedingten Druckabfalls

3.4.1 Druckabfall infolge der Materialförderung

Der Druckabfall im Gefolge der Materialförderung setzt sich, wie in Punkt 3.1. bereits ausgeführt, aus drei Teilen zusammen, es gilt mithin

$$\Delta p_m = \Delta p_{m_1} + \Delta p_{m_2} + \Delta p_{m_3}, \quad (18)$$

worin Δp_{m_1} im Krümmer selbst auftritt und den Druckabfall infolge der Arbeit der Vortriebskraft bezeichnet, während Δp_{m_2} den auf die neuerliche Beschleunigung des Fördergutes aufgewendeten, und Δp_{m_3} schließlich jenen zusätzlichen Druckabfall bedeutet, den das Heben des in der Beschleunigungsstrecke ungleichmäßig verteilten Fördergutes beansprucht.

Bestimmung des Druckabfalles Δp_{m_1} . Im Sinne von *Abb. 4* errechnet sich der Unterschied der Drücke am Ein- und Ausgang des Abschnittes $Rd\varphi = dl$ zu

$$\frac{d(p_{m_1})}{dl} dl = \frac{nP_1}{A}, \quad (19)$$

wenn n die Zahl der im dl langen Abschnitt befindlichen Fördergutteilchen bezeichnet. Sie ergibt sich aus der Beziehung

$$n = \frac{Q_m}{Gc_m} \cdot dl. \quad (20)$$

Damit geht Gleichung (19) in die Form

$$[p_{m_1}]_{p'_{m_1}}^{p''_{m_1}} = - \frac{Q_m}{GA} \int_0^{R \pi/2} \frac{P_1}{c_m} dl \quad (21)$$

und weiter in die Form

$$p'_{m_1} - p''_{m_1} = \Delta p_{m_1} = \frac{Q_m}{GA} \int_0^{R \pi/2} \frac{P_1}{c_m} dl \quad (22)$$

über. Der Wert des Integrals $\int_0^{R \pi/2} \frac{P_1}{c_m} dl$ ist der Fläche des Diagramms in *Abb. 5* proportional.

Die auf graphischem Wege ermittelten Werte des Integrals $\int_0^{R \pi/2} \frac{P_1}{c_m} dl$ für den Fall von Weizenförderung sind in *Abb. 6* aufgetragen.

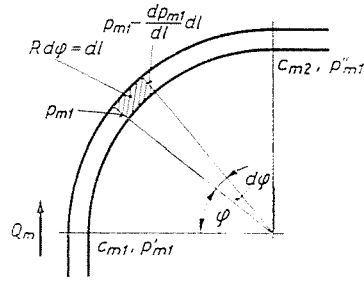


Abb. 4. Skizze zur Bestimmung des Wertes von Δp_{m1}

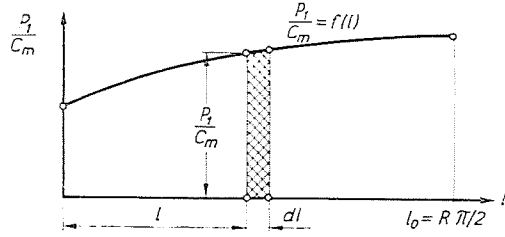


Abb. 5. Änderung der Werte von $\frac{P_l}{c_m}$ längs des Krümmers

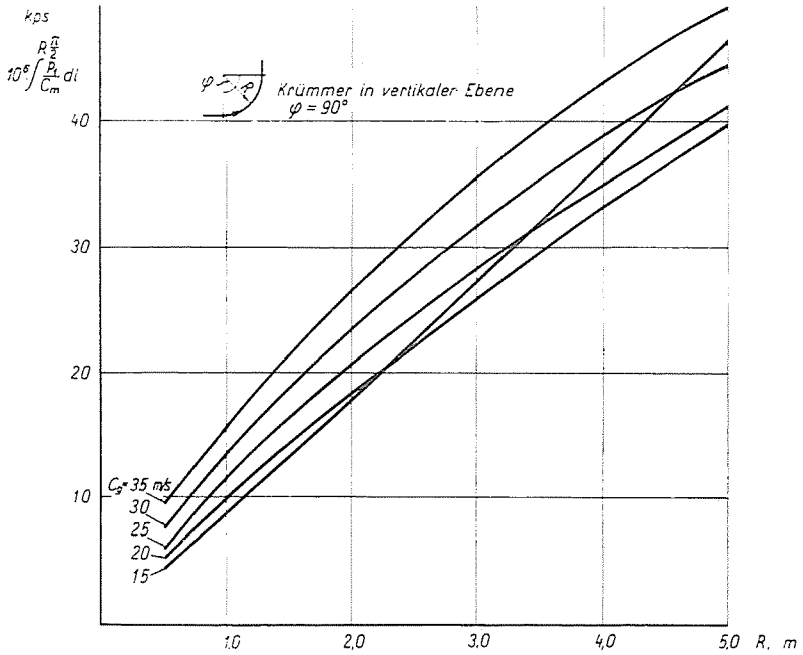


Abb. 6. Die Werte des Integrals $\int_0^{R \pi/2} \frac{P_l}{c_m} dl$ für Krümmers mit unterschiedlich großen Halbmessern bei einem Zentriwinkel von $\varphi = 90^\circ$

Bestimmung des Druckabfalles Δp_{m_2} . Sobald die Fördergutteilchen den Krümmer verlassen haben, werden sie in dem L_i langen geraden Beschleunigungsabschnitt der Rohrleitung auf die Grenzgeschwindigkeit $c_{ms\infty}$ beschleunigt. Nach dem Impulssatz, wie er für die in der Kontrollfläche gemäß *Abb. 7* eintreffenden und von da weiterbewegten Teilchen aufgeschrieben werden

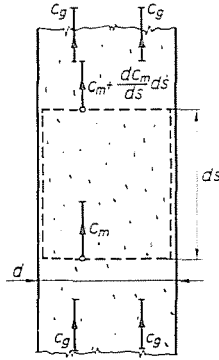


Abb. 7. Skizze zur Bestimmung des Wertes von Δp_{m_2}

kann, errechnet sich der Druckabfall, den die neuerliche Beschleunigung der Fördergutteilchen erfordert, aus der Formel

$$A \frac{d(p_{m_2})}{ds} ds = -m \frac{dc}{ds} ds, \quad (23)$$

d. h. gemäß

$$\Delta p_{m_2} = -mc_m + \text{konst.} \quad (24)$$

Mit der Beziehung $m = \frac{Q_m}{g}$ hat man schließlich

$$p'_{m_2} - p''_{m_2} = \Delta p_{m_2} = \frac{Q_m}{gA} [c_{ms\infty} - c_{m_2}] = \frac{Q_m}{gA} \Delta c_{ms}. \quad (25)$$

Die Geschwindigkeitsabnahme $\Delta c_{ms} = c_{ms\infty} - c_{m_2}$ kann nun entweder aus den hier eingeführten Formeln oder aus dem — für Weizen als Fördergut — aufgetragenen Diagramm der *Abb. 8* rechnerisch ermittelt bzw. abgelesen werden.

Wie aus *Abb. 8* hervorgeht, nimmt die Geschwindigkeitsabnahme $\Delta c_{ms} = c_{ms\infty} - c_{m_2}$ bei einem $c_g = 15$ m/s schon bei $R = 3,0$ m, bei einem $c_g = 20$ m/s hingegen bei $R = 4,2$ m negative Werte an, trotzdem sich die Förder-

guteilchen im Krümmer *verzögert* bewegen. Diese Erscheinung ist eine Folge der Tatsache, daß der Krümmer eine *waagrechte* Rohrleitung mit einer *lotrechten* verbindet und daß die Grenzgeschwindigkeit $c_{ms\infty}$ der Weizenförderung in der Lotrechten — im Falle der beiden vorerwähnten Geschwindigkeiten — niedriger ist als die Geschwindigkeit c_{m2} des Teilchens beim Austritt aus dem Krümmer.

Bestimmung des Druckabfalles Δp_{m3} . Der Krümmer stört die gleichmäßige Verteilung des Fördergutes, weil die Geschwindigkeit der Teilchen abnimmt. Aus diesem Grunde ist das Fördergut beim Eintritt in den lotrechten

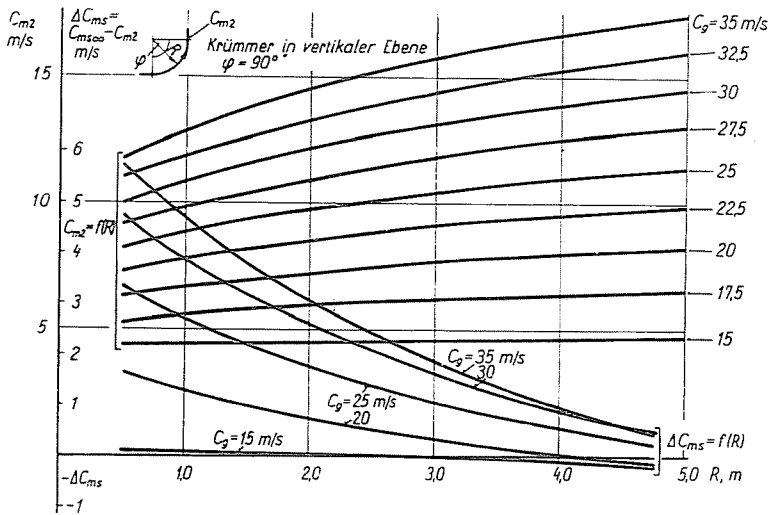


Abb. 8. Die Geschwindigkeitsabnahme in den Krümmern

geraden Beschleunigungsabschnitt dichter zusammengedrängt als an seinem Ende, und erst nach Zurücklegung des Beschleunigungsabschnittes bildet sich wieder eine Strömung mit gleichmäßiger Verteilung aus. In dem auf den Krümmer folgenden geraden lotrechten Beschleunigungsabschnitt muß deshalb mit einem zusätzlichen — letzten Endes durch den Krümmer verursachten — auf die Überwindung der Schwerkraft aufzuwendenden Druckabfall gerechnet werden. Dieser zusätzliche Druckabfall beläuft sich (Abb. 9) auf

$$A \frac{d(p_{m3})}{dl} dl = \frac{Q_m}{c_m} dl, \quad (26)$$

d. h. auf

$$p'_{m3} - p''_{m3} = \Delta p_{m3} = \frac{Q_m}{A} \int_0^{L_i} \frac{dl}{c_m}. \quad (27)$$

Die Werte des Integrals $\int_0^{L_i} \frac{dl}{c_m}$ sind der schraffierten Fläche in *Abb. 9* proportional. Da der Druckabfall Δp_{m3} , den der Krümmer verursacht, nur infolge *Störung des Fördergutstromes* entsteht, muß der der Fläche $L_i \frac{1}{c_{m\infty}}$

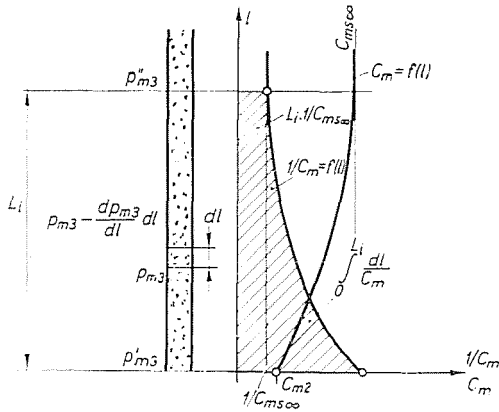


Abb. 9. Skizze zur Bestimmung des Wertes von Δp_{m3}

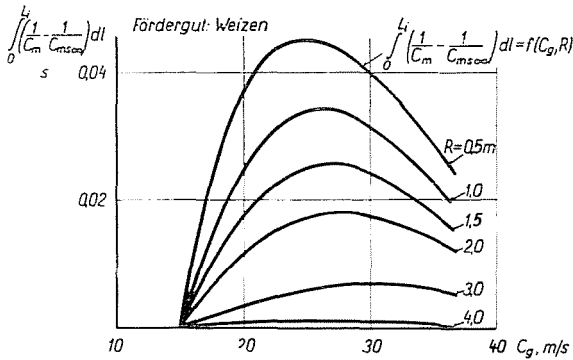


Abb. 10. Die graphisch ermittelten Werte des Integrals $\int_0^{L_i} \left(\frac{1}{c_m} - \frac{1}{c_{m\infty}} \right) dl$ für den Fall von Weizenförderung

entsprechende Druckabfall vom Wert des Integrals abgezogen werden. Dieser Teil ist nämlich verhältnismäßig mit jenem Druckabfall, der auf die Überwindung der Schwerkraft der Fördergutteilchen in dem L_i langen Beschleunigungsabschnitt aufgeht, der also in der Berechnung des Druckabfalles im lotrechten Rohrabschnitt berücksichtigt werden muß.

Die graphisch ermittelten Werte des Integrals $\int_0^{L_i} \left(\frac{1}{c_m} - \frac{1}{c_{ms\infty}} \right) dl$, wie sie sich auf dieser Grundlage ergeben, sind — für Weizen als Fördergut — in *Abb. 10* aufgetragen.

3.4.2. Bestimmung des Leerlauf-Druckabfalles

Diese Art des Druckabfalles errechnet sich gemäß

$$\Delta p_0 = \gamma_g \xi_0 \frac{c_g^2}{2g} \quad (\text{kp/m}^2). \quad (28)$$

Der Druckabfall in einem in lotrechter Ebene eingebauten, aus der horizontalen in die vertikale Richtung umleitenden Krümmer kann also aus der Beziehung

$$\Delta p_{kr} = \Delta p_m + \Delta p_0 = \frac{Q_m}{A} \left[\int_0^{R \pi/2} \frac{P_i}{c_m} dl + \frac{1 c_{ms}}{g} + \int_0^{L_i} \left(\frac{1}{c_m} - \frac{1}{c_{ms\infty}} \right) dl \right] + \gamma_g \xi_0 \frac{c_g^2}{2g} \quad (29)$$

berechnet werden.

4. Aus der vertikalen in die horizontale Richtung umlenkende Krümmer in lotrechter Ebene

4.1. Erklärung des krümmerbedingten Druckabfalles

Der zusätzliche, durch die Materialförderung bedingte Druckabfall, der über den Leerlauf-Druckabfall hinaus entsteht, setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Bei dem einen Teil handelt es sich um den im Krümmer auftretenden Druckabfall aus der Wechselwirkung zwischen Förderluft und Fördergutteilchen, bei dem anderen hingegen um jenen, der sich aus der neuerlichen Beschleunigung des Fördergutes ergibt, sobald dieses den Krümmer verlassen hat, und der im geraden, auf den Krümmer folgenden Leitungsabschnitt auftritt.

Die Handhabe zur rechnerischen Erfassung der Verzögerung im Krümmer bietet die Bewegungsgleichung für das Teilchen.

4.2. Die Bewegungsgleichung für das im Krümmer fortbewegte Teilchen

Auf das Fördergutteilchen wirken folgende Kräfte ein (s. *Abb. 11*):

- 1) die aerodynamische Vortriebskraft;
- 2) die radial gerichtete Zentripetalkraft C_p ;

3) die Reibungskraft S_1 , die die Fortbewegung des Teilchens hemmt, gemäß

$$S_1 = [C_p - P_{N1}] \mu_0 = \left| m \frac{c_m^2}{R} - G \sin \varphi \right| \mu_0 \quad (\text{kp}); \quad (30)$$

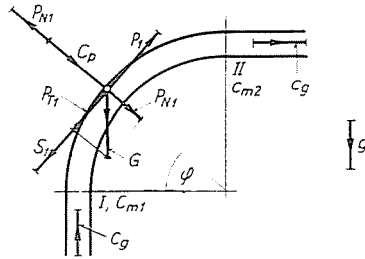


Abb. 11. Die im Krümmern auf das bewegte Teilchen wirkenden Kräfte

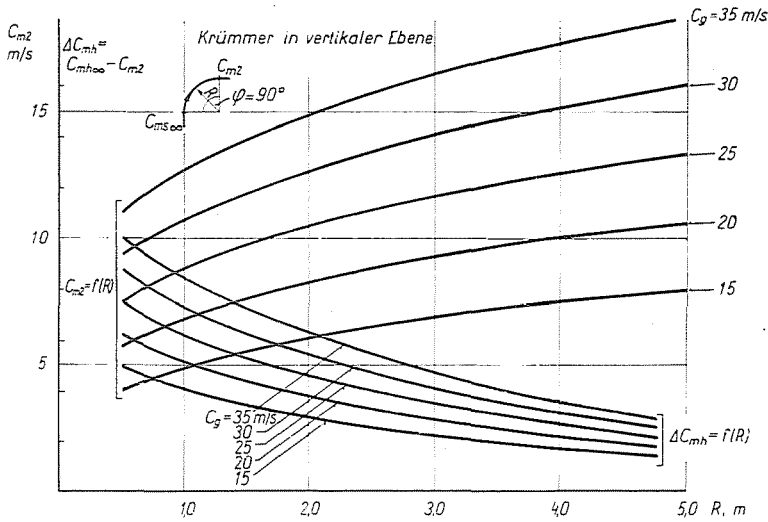


Abb. 12. Geschwindigkeitsabnahme in den Krümmern

4) die in Richtung der Bahn wirksame Komponente des Teilchengewichtes:

$$P_{T1} = G \cos \varphi.$$

Aus diesen Kräften schreibt sich die Bewegungsgleichung zu

$$\frac{dc_m}{d\varphi} = \frac{R}{m} \left[\left(B - \frac{\mu_0 m}{R} \right) c_m \div \frac{Bc_g^2 - G(\cos \varphi - \mu_0 \sin \varphi)}{c_m} - 2Bc_g \right]. \quad (31)$$

Sie läßt sich ebenso wie Gleichung (8) nur in schrittweiser Annäherung lösen. Die graphische Darstellung der Beziehungen $c_{m2} = f(R, c_g)$ bzw. $\Delta c_{mh} = c_{mh\infty} - c_{m2}$, wie sie anhand der mit einem elektronischen Rechengerät ermittelten Lösungsergebnisse aufgetragen wurde, ist aus *Abb. 12* ersichtlich.

4.3 Die Bewegungsgleichung für das Teilchen während seiner Bewegung in dem an den Krümmer anschließenden geraden waagrechten Abschnitt

Nach dem Verlassen des Krümmers greift am Fördergutteilchen nicht mehr die Reibungs-, sondern die aus den Stößen resultierende Rückhaltekraft an, weshalb das Teilchen — sofern der gerade Leitungsabschnitt lang genug ist —, eine Beschleunigung bis zur Grenzgeschwindigkeit $c_{mh\infty}$ erfährt, wie sie dem gleichmäßigen Betriebszustand zugeordnet ist. Die Bewegung des Teilchens bestimmen hierbei folgende Kräfte:

- 1) die aerodynamische Kraft, die das Teilchen fortbefördert;
- 2) die die Teilchenbewegung hemmende Bremskraft, die sich — ähnlich wie bei Gleichung (10) — zu

$$S = \xi_h m \frac{c_m^2}{2} \quad (\text{kp}) \quad (32)$$

errechnet. Der Proportionalitätsbeiwert ξ_h bringt hierbei zum Ausdruck, wieviele Hundertteile seiner Energie das Fördergut je lfd. m verliert. Nach den Berechnungen PÁPAIS [6] ist für Weizen bei Förderung in der Horizontalen $\xi_h = 0,077$ 1/m.

Nach Zusammenziehung und Ordnung erhält man für die Bewegung des Teilchens in dem auf den Krümmer folgenden geraden Abschnitt die Gleichung

$$m \frac{dc_m}{dt} = B_2 c_m^2 - B_1 c_m + P_0, \quad (33)$$

in der

$$B_2 = \frac{\gamma_g}{2g} f_0 C - \xi_h \frac{m}{2}.$$

Mit der Bedingung $\frac{dc_m}{dt} = 0$ hat man schließlich die Gleichung

$$c_{mh\infty} = \frac{B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4B_2 P_0}}{2B_2}. \quad (34)$$

Nach Trennung der Veränderlichen und unter Berücksichtigung der einem $t = 0$ zugeordneten Grenzbedingung $c_m = c_{m2}$ kann die Gleichung (33) integriert werden. Die Integration liefert die Gleichung

$$c_m = \frac{\Delta c_{mh} [2c_{mh\infty} - \varepsilon']}{e^{c_\varphi b' t} [\varepsilon' + \Delta c_{mh} - 2c_{mh\infty}] - \Delta c_{mh}} + c_{mh\infty} \quad (35)$$

in der

$$\varepsilon' = \frac{B_1}{B_2}; \quad \Delta c_{mh} = c_{mh\infty} - c_{m2}$$

$$b' = \sqrt{\frac{\gamma_g f_0 C \xi_h}{gm}}$$

Den zurückgelegten Weg beschreibt die Formel

$$l = \int c_m(t) dt + \text{konst.} \quad (36)$$

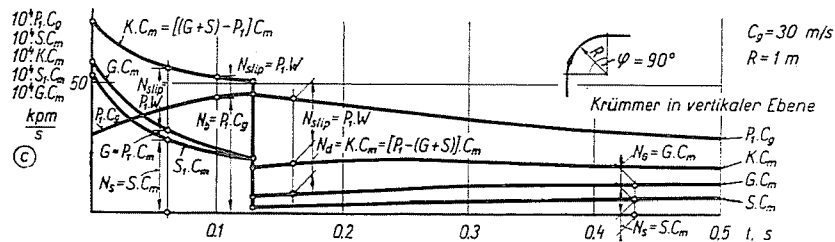
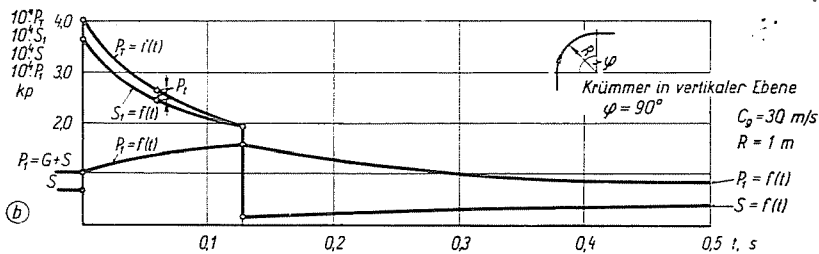
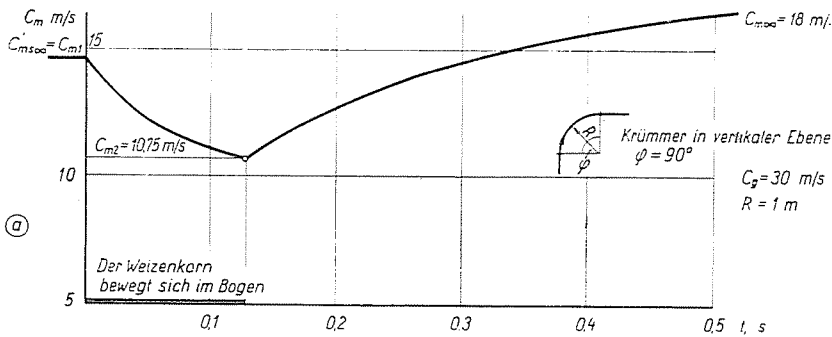


Abb. 13. Zeitabhängige Änderung a) der Geschwindigkeit, b) der Kräfte, c) der Leistung

Mit $t = 0$ und $l = 0$ hat man nach Integration

$$l = c_{mh\infty} t + \frac{\varepsilon' - 2c_{mh\infty}}{c_g b'} \ln \frac{(\varepsilon' - 2c_{mh\infty}) e^{c_g b' t}}{(\varepsilon' - 2c_{mh\infty} + \Delta c_{mh}) e^{c_g b' t} - \Delta c_{mh}} \quad (37)$$

Aus den mit dem elektronischen Rechengert ermittelten L6sungen der Gleichungen (31) bzw. (37) l6sst sich die Geschwindigkeit des F6rdermittelteilchens in Abh6ngigkeit von der Zeit w6hrend seiner Bewegung im geraden Beschleunigungsabschnitt, d. h. nach Verlassen des Kr6mmers berechnen.

Die Abb. 13/a veranschaulicht die 6nderung der Teilchengeschwindigkeit bei einer F6rderluftgeschwindigkeit von $c_g = 30$ m/s und bei $q = 90^\circ$ bzw. bei $R = 1$ m.

Abbildung 13/b zeigt die zeitabh6ngige 6nderung der auf das F6rdergutteilchen einwirkenden Vortriebs- bzw. Bremskraft, Abb. 13/c hingegen die 6nderung der auf ein St6ck der F6rdergutteilchen einwirkenden Vortriebs- bzw. Bremskraft.

4.4. Bestimmung des kr6mmerbedingten Druckabfalles

4.4.1. Der Druckabfall infolge der Materialf6rderung

Der durch die Materialf6rderung bedingte Druckabfall setzt sich aus zwei Teilen zusammen, u. zw. aus dem Druckabfall Δp_{m1} , der im Kr6mmer selbst infolge der Arbeit der Vortriebskraft auftritt, sowie aus dem Druckabfall Δp_{m2} , der auf die neuerliche Beschleunigung des F6rdergutes aufgewendet wird. Es gilt mithin

$$\Delta p_m = \Delta p_{m1} + \Delta p_{m2} \quad (\text{kp/m}^2). \quad (38)$$

Bestimmung des Druckabfalles Δp_{m1} . Den Druckabfall Δp_{m1} beschreibt die der Gleichung (22) 6hnliche Beziehung

$$\Delta p_{m1} = \frac{Q_m}{GA} \int_0^{R\pi/2} \frac{P_1}{c_m} dl \quad (\text{kp/m}^2). \quad (39)$$

Die graphische Darstellung des Integrals der Gleichung (39) ist aus Abb. 14 ersichtlich.

Bestimmung des Druckabfalles Δp_{m2} . Der zur neuerlichen Beschleunigung des F6rdergutes erforderliche Druckabfallteil wird 6hnlich ermittelt wie jener Teil, der bei der Umlenkung aus der waagrechten in die lotrechte Richtung in dem vertikal eingebauten System aus der gleichen Ursache auftritt. In Analogie mit Gleichung (25) gilt somit

$$\Delta p_{m2} = \frac{Q_m \Delta c_{mh}}{gA} \quad (\text{kp/m}^2). \quad (40)$$

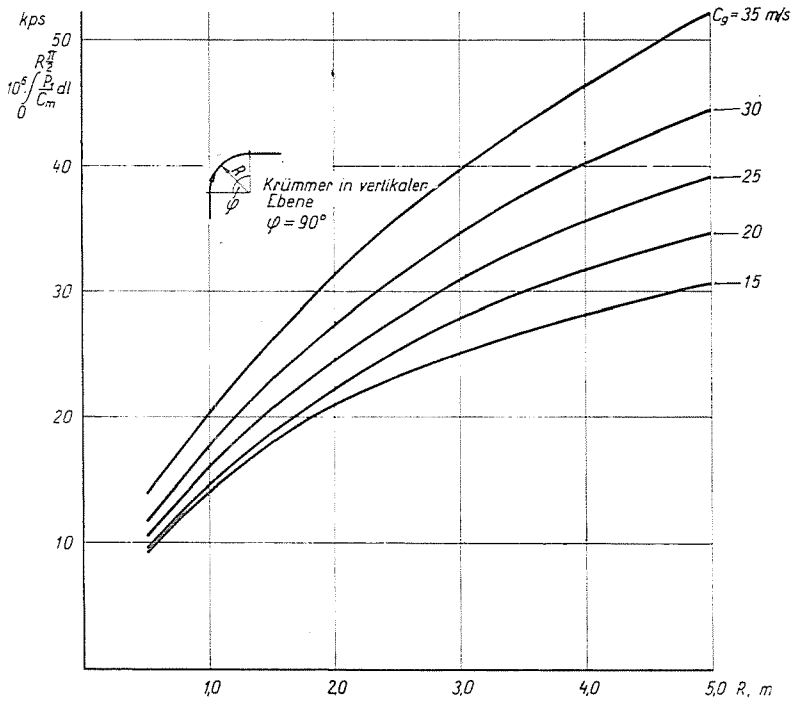


Abb. 14. Werte des Integrals $\int_0^{R \pi/2} \frac{P_1}{c_m} dl$ für Krümmen mit unterschiedlichen Halbmessern und einem Zentriwinkel $\varphi = 90^\circ$

Der Geschwindigkeitsunterschied $\Delta c_{mh} = c_{mh} - c_{m2}$ kann von dem Schaubild der Abb. 12 abgelesen werden.

4.4.2. Bestimmung des Leerlauf-Druckabfalles

Für diesen Teil des Druckabfalles gilt ähnlich wie bei Gleichung (28)

$$\Delta p_0 = \gamma_g \zeta_0 \frac{c_g^2}{2g} \quad (\text{kp/m}^2). \tag{41}$$

Der Druckabfall in dem in vertikaler Ebene eingebauten, aus der lotrechten in die waagrechte Richtung umlenkenden Krümmen schreibt sich somit zu

$$\begin{aligned} \Delta p_{kr} &= \Delta p_m + \Delta p_0 = \\ &= \frac{Q_m}{A} \left[\int_0^{R \pi/2} \frac{P_1}{c_m} dl + \frac{\Delta c_{mh}}{g} \right] + \gamma_g \zeta_0 \frac{c_g^2}{2g} \quad (\text{kp/m}^2). \end{aligned} \tag{42}$$

5. Vergleich der Druckabfälle in den drei verschiedenen Krümmerarten

Der Druckabfall in den drei möglichen Arten von Krümmern läßt sich demnach aus folgenden Formeln berechnen:

1) In waagrechter Ebene gelagerter Krümmer (vgl. Kovács [11]):

$$\Delta p_{kr} = \frac{Q_m}{A} \left[\int_0^{R \pi/2} \frac{P_1}{c_m} dl + \frac{\Delta c_m}{g} \right] + \gamma_g \zeta_0 \frac{c_g^2}{2g} \quad (\text{kp/m}^2); \quad (43)$$

2) In lotrechter Ebene eingebauter, aus der waagrechten in die lotrechte Richtung umlenkender Krümmer:

$$\Delta p_{kr} = \frac{Q_m}{A} \left[\int_0^{R \pi/2} \frac{P_1}{c_m} dl + \int_0^{L_i} \left(\frac{1}{c_m} - \frac{1}{c_{ms\infty}} \right) dl + \frac{\Delta c_{ms}}{g} \right] + \gamma_g \zeta_0 \frac{c_g^2}{2g} \quad (\text{kp/m}^2); \quad (44)$$

3) In vertikaler Ebene eingebauter, aus der lotrechten in die waagrechte Richtung umlenkender Krümmer:

$$\Delta p_{kr} = \frac{Q_m}{A} \left[\int_0^{R \pi/2} \frac{P_1}{c_m} dl + \frac{\Delta c_{mh}}{g} \right] + \gamma_g \zeta_0 \frac{c_g^2}{2g} \quad (\text{kp/m}^2). \quad (45)$$

Anhand dieser Formeln kann der Druckabfall in den Krümmern rechnerisch ermittelt werden. *Abb. 15* veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Förderluftgeschwindigkeit und Druckabfall $\Delta p_{kr} - \Delta p_0$ in den in waagrechter Ebene gelagerten, ferner in den in vertikaler Ebene eingebauten, aus der waagrechten in die lotrechte bzw. aus der lotrechten in die waagrechte Richtung umlenkenden Krümmern einer Weizenförderanlage bei $R = 1$ m, $d = 70$ mm, $Q_m = 0.5$ kp/s.

Wie aus der Abbildung erhellt, verläuft die Kennlinie des Druckabfalls in dem in waagrechter Ebene eingebauten Krümmer zwischen den Kurven für die beiden in lotrechter Ebene eingebauten Krümmer.

Dies erklärt sich aus der Tatsache, daß die Grenzgeschwindigkeit $c_{ms\infty}$ der lotrechten Förderung vorweg niedriger ist als die der waagrechten Förde-

rung. Während seiner Bewegung im Krümmer erfährt das Teilchen im Vergleich zu seiner Eintrittsgeschwindigkeit sogar eine Verzögerung, so daß in dem im Krümmer auftretenden Druckabfall jener Teil dominiert, der auf die aus dem hohen Geschwindigkeitsunterschied resultierende neuerliche Beschleunigung aufgeht.

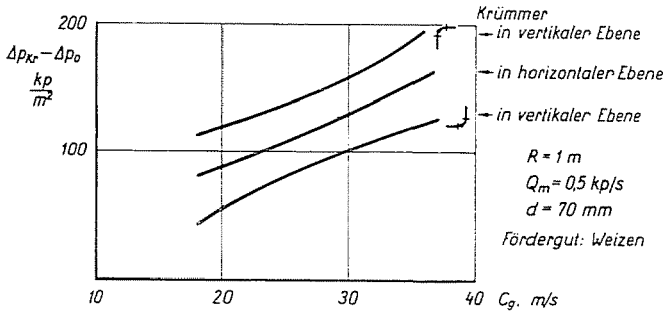


Abb. 15. Zusammenhang zwischen Druckabfall $\Delta p_{kr} - \Delta p_0$ und Förderluftgeschwindigkeit

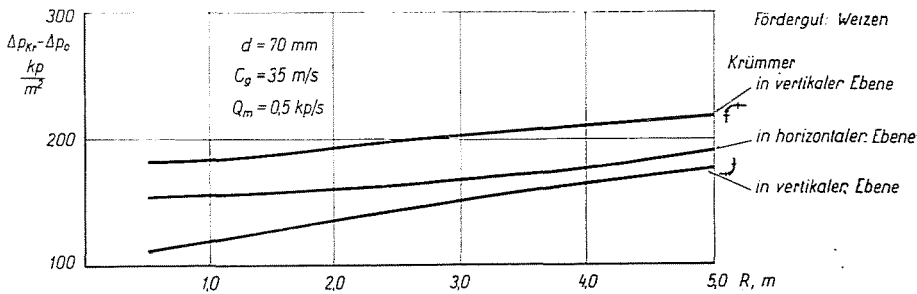


Abb. 16. Zusammenhang zwischen Druckabfall $\Delta p_{kr} - \Delta p_0$ und Krümmungshalbmesser

Abbildung 16 zeigt den Zusammenhang zwischen Druckabfall und Krümmungshalbmesser des Krümmers bei konstanter Förderluftgeschwindigkeit ($c_g = 35\ m/s$).

Die Abbildung läßt erkennen, daß sich der Druckabfall im Krümmer mit wachsendem Krümmungshalbmesser erhöht. Trotzdem empfiehlt es sich, in die Förderleitung Krümmer mit großem Halbmesser einzubauen. Betrachtet man nämlich den förderungsbedingten zusätzlichen Druckabfall zwischen den Punkten A und B der in Abb. 17 skizzierten, aus der lotrechten in die waagrechte Richtung aufwärts überleitenden Förderleitung, zeigt sich, daß dieser Druckabfall geringer ist, wenn man (bei $R_2 > R_1$) statt eines Krümmers mit dem Halbmesser R_1 einen solchen mit dem Halbmesser R_2 einbaut.

Baut man nämlich im gewählten Beispiel statt eines Krümmers mit dem Halbmesser R_1 einen solchen mit dem Halbmesser R_2 ein, verkürzt sich der lotrechte gerade Abschnitt um die Differenz zwischen l_1 und l_2 bzw. der waag-

rechte gerade Abschnitt um die Differenz zwischen l_1' und l_2' . Die Zunahme des Druckabfalles im Krümmer infolge Anwendung des Halbmessers R_2 statt eines solchen von R_1 ist geringer als die Abnahme des Druckabfalles infolge Verkürzung der geraden Abschnitte.

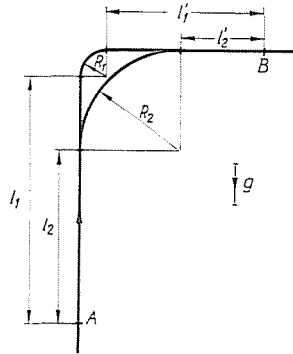


Abb. 17. Skizze einer Förderanlage

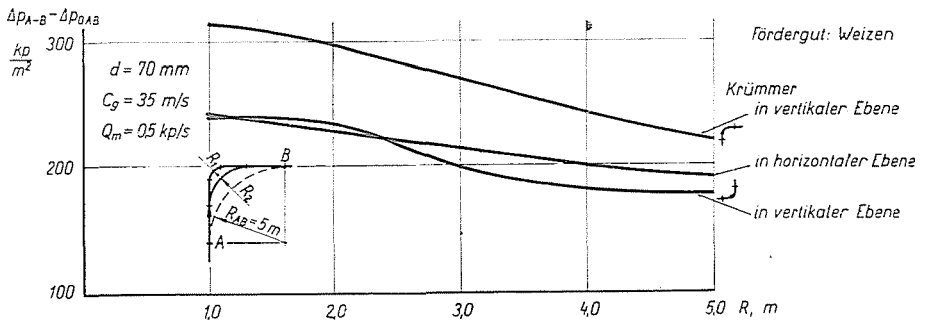


Abb. 18. Zusammenhang zwischen dem Druckabfall $\Delta p_{AB} - \Delta p_{0AB}$ und dem Krümmungshalbmesser

Abbildung 18 zeigt den Verlauf des Druckabfalles im Abschnitt $A - B$ einer Förderleitung für die drei möglichen Krümmereinbauebene. Die Werte $\Delta p_{AB} - \Delta p_{0AB}$ zeigen, wie aus der Abbildung hervorgeht, in Abhängigkeit vom Krümmungsradius bei allen drei Einbaulagen eine deutlich sinkende Tendenz.

Mit einer weiteren Abnahme der Druckabfälle kann — bei Einbau von Krümmern mit größeren Halbmessern — gerechnet werden, wenn die auf die Krümmer folgenden geraden Abschnitte kurz bleiben. Der durch die Gleichungen (43), (44) und (45) beschriebene, durch die neuerliche Beschleunigung bedingte Teil des Druckabfalles ist nämlich gleich jenem, der zur Beschleunigung auf die der Förderluftgeschwindigkeit zugeordnete Grenzgeschwindigkeit aufzuwenden ist. Wird der auf den Krümmer folgende gerade Abschnitt bei

größerem Krümmungshalbmesser kürzer als der Beschleunigungsabschnitt L_i , fehlt die zur Beschleunigung der Teilchen auf die Grenzgeschwindigkeit erforderliche Rohrleitungslänge, so daß auch der beschleunigungsbedingte Druckabfall weiter abnimmt, ja in günstigen Fällen (etwa wenn der Zyklon unmittelbar hinter dem Krümmer eingebaut ist) sogar ganz wegfallen kann.

6. Experimentelle Überprüfung der Zusammenhänge für die rechnerische Ermittlung des Druckabfalles

Zur Überprüfung der hier abgeleiteten Beziehungen für die rechnerische Ermittlung des Druckabfalles in Krümmern wurden an einer eigens zu diesem Zweck gebauten Einrichtung mit Weizen Versuche angestellt. Sie setzten sich das Ziel, den Druckabfall in den Krümmern auf dem Meßwege zu bestimmen.

6.1. Die Versuchseinrichtung

Die Skizze der Versuchseinrichtung ist der *Abb. 19* zu entnehmen.

Der Weizen wurde über die Schüttrinne *A* und den Aufgeber *B* in die Förderanlage eingebracht. Über die Förderleitung *C* gelangte er in den Zentrifugalabscheider *D* und über die an diesen angeschlossene Zellenradschleuse wieder ins Freie.

Die in der Zeiteinheit geförderte Durchflußmenge wurde durch Ermittlung des Gewichtes des an der Zellenradschleuse abgenommenen Weizens bestimmt, die Durchflußgeschwindigkeit der Förderluft hingegen mit dem

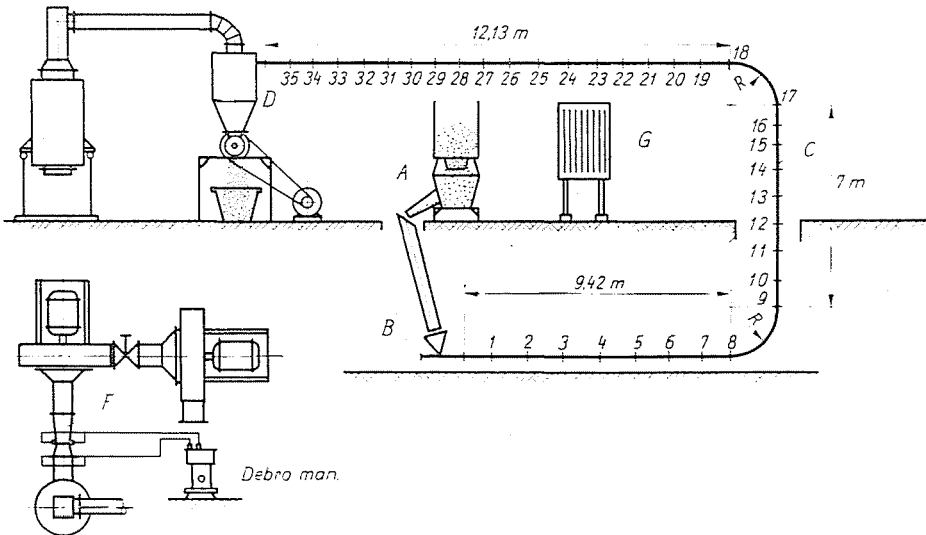


Abb. 19. Skizze der Versuchseinrichtung

eingebauten Venturirohr bzw. mit dem an dieses angeschlossenen Differentialmanometer gemessen.

Zur Bestimmung des Druckabfalls längs der Förderleitung wurde diese mit 35 Druckmeß-Anzapfungen versehen. Die Photoaufnahmen vom Multi-
manometer G , welches mit den Anzapfungen verbunden war, gestatteten fallweise die Bestimmung der Druckwerte an den einzelnen Anzapfstellen.

6.2. Auswertung der Druckmessungen

Die Auftragung der den einzelnen Anzapfstellen zugeordneten Druckwerte längs der Rohrleitung im Verein mit der Verlängerung der Druckabfall-Linien für die geraden Abschnitte vor und hinter dem Krümmer ergibt den Druckabfall Δp_{kr} im Krümmer selbst (Abb. 20).

Wie aus dem Diagramm ersichtlich, tritt der Druckabfall zum Teil tatsächlich hinter dem Krümmer auf.

Die Versuchsergebnisse sind aus den *Abbildungen 20–31* ersichtlich.

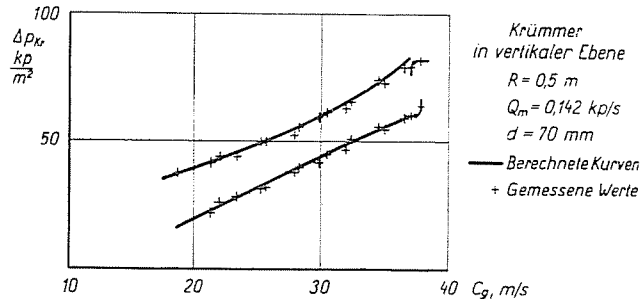


Abb. 20

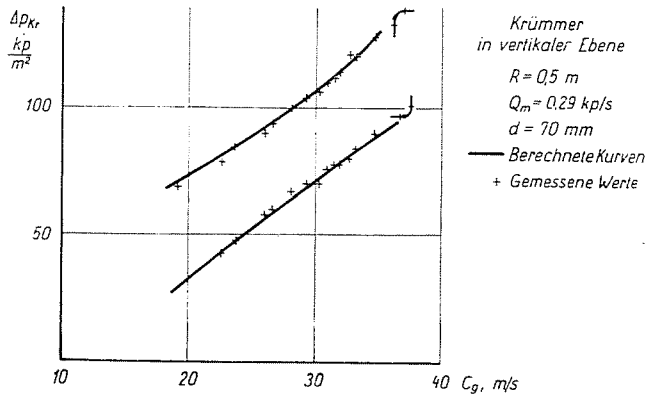


Abb. 21

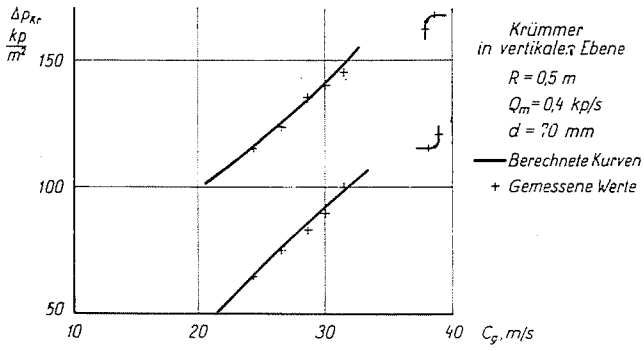


Abb. 22

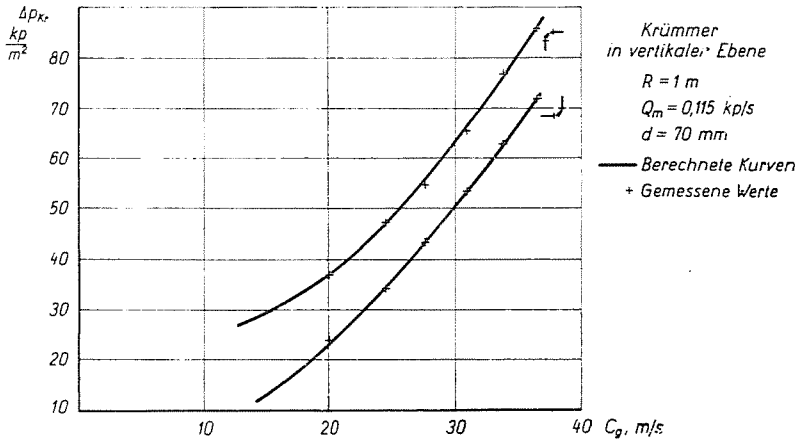


Abb. 23

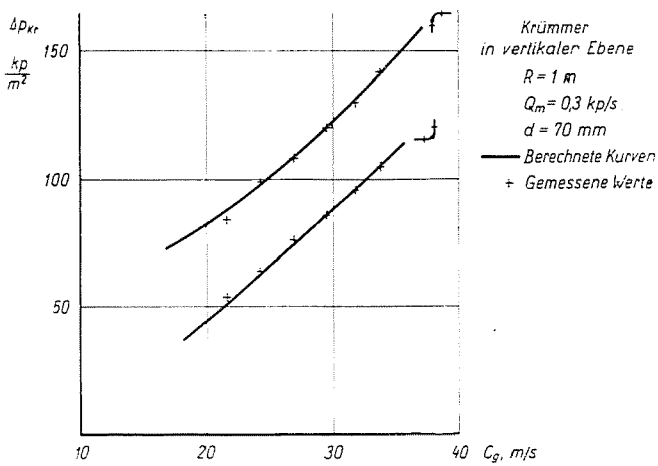


Abb. 24

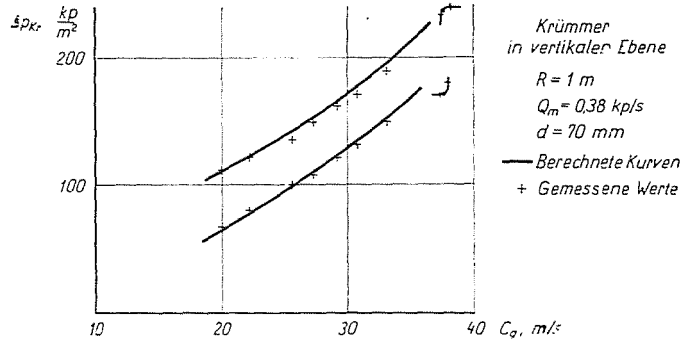


Abb. 25

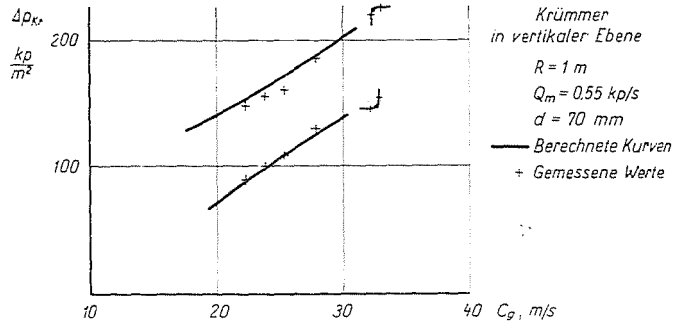


Abb. 26

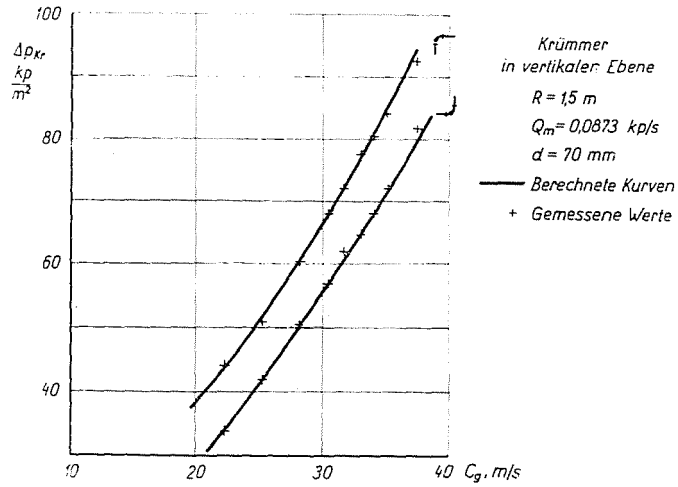


Abb. 27

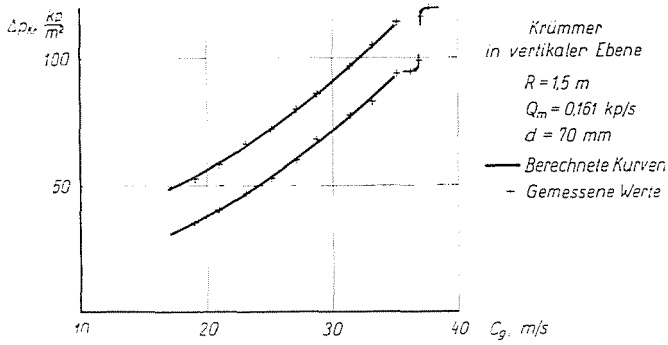


Abb. 28

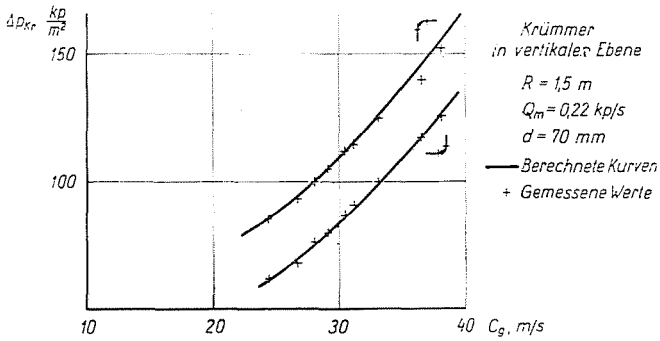


Abb. 29

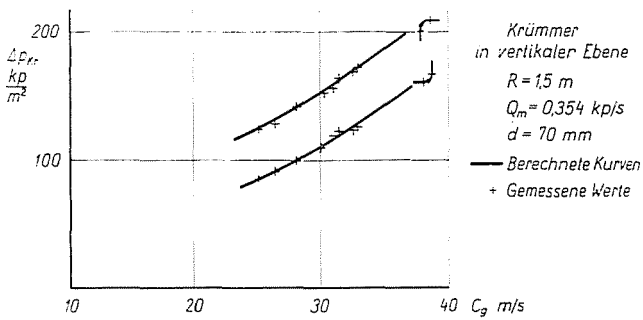


Abb. 30

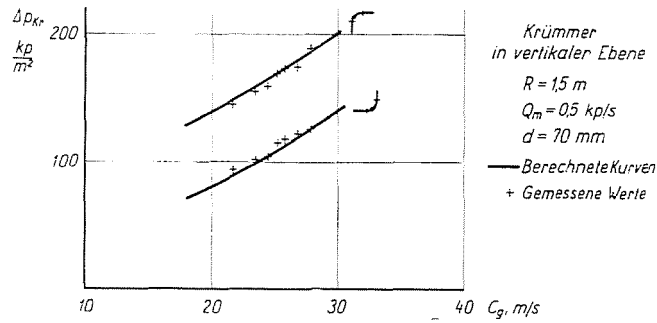


Abb. 31

Zusammenfassung

Die grundsätzliche Klarstellung der dynamischen, strömungstechnischen und energetischen Zusammenhänge von Fördervorgängen, wie sie sich in jeweils vertikal eingebauten, aus der waagrechten in die lotrechte sowie aus der lotrechten in die waagrechte Richtung umlenkenden Förderleitungskrümmern abspielen, liefert die Grundlagen zur Ableitung eines Berechnungsverfahrens, das sich zur Bestimmung des Druckabfalles in den Krümmern der Förderleitung eignet.

Auf Grund theoretischer Überlegungen ist es dem Verfasser gelungen, zur rechnerischen Ermittlung des Druckabfalles Zusammenhänge zu finden, die für jeden Betriebszustand (Förderluftgeschwindigkeit, Förderleistung, Rohrdurchmesser, Krümmungshalbmesser usw.) brauchbar sind. Die hier gezeigten Diagramme und einzelne Zahlenwerte beziehen sich ausschließlich auf das Fördergut Weizen, doch gelten die theoretischen Erwägungen auch für andere körnige Fördergüter, wobei lediglich die Parameter für das betreffende Fördergut bestimmt und die Gleichungen mit diesen aufgeschrieben zu werden brauchen.

Zur Überprüfung der theoretisch abgeleiteten Zusammenhänge wurden zahlreiche Messungen vorgenommen, deren Ergebnisse — wie aus den bezüglichen Schaubildern erhellt —, eine gute Übereinstimmung mit den rechnerisch ermittelten Druckabfallwerten zeigen.

Literatur

1. GASTERSTÄDT, I.: Die experimentelle Untersuchung des pneumatischen Fördervorganges, VDI Forschungsarbeit Nr. 265, 1924.
2. SEGLER, G.: Pneumatic Grain Conveying, Braunschweig, 1951.
3. USPENSKI, W. A.: Pneumatische Entaschungsanlage, Za ekonomiju topliva, **12** (1950).
4. WEIDNER, G.: Grundsätzliche Untersuchung über den pneumatischen Fördervorgang, insbesondere über die Verhältnisse bei Beschleunigung und Umlenkung, Forschung **21**, Heft 5.
5. PÁPAI, L.: Pneumatikus gabonaszállítás (Pneumatische Getreideförderung), VI. osztály közleményei **XII** (1954).
6. PÁPAI, L.: Examination of the Starting Section in Pneumatic Grain Conveying, Acta Technica **XIV** (1956).
7. PATTANTYÚS, Á. G.: Anyagszállítás légáramban (Materialförderung in strömender Luft), Mérnöki Továbbképző Intézet, 1575. sorozat.
8. ADAM, O.: Chemie-Ingenieur-Technik, **29**, 151—58 (1957).
9. RADA, I.: Örlő- és Hántolóipar (Mahl- und Schälindustrien), Universitätslehrbuch.
10. KOVÁCS, L.—TÓTH, J.: Porszerű anyagok pneumatikus szállítási kísérletei és azok eredményei (Versuche mit der pneumatischen Förderung staubförmiger Schüttgüter und deren Resultate), Gép **2** (1958).
11. KOVÁCS, L.: Berechnung des Druckabfalles in 90° horizontal eingebauten Krümmern pneumatischer Getreideförderleitungen, Periodica Polytechnica **M. VIII** (1964).
12. UEMATU und MORIKAWA, Y.: Experimentelle Untersuchungen über die Teilchenbewegung und über die Geschwindigkeitsverteilung der Förderluft in einer pneumatischen Förderleitung, Bulletin of JSME **4** (1961).

László Kovács, Budapest, XI., Sztoczek u. 2—4. Ungarn.