

Pneumatische Förderung von Häckselgut – eine Schrifttumübersicht

Von Hinrich Petersen, Braunschweig*)

DK 621.867.8:631.374:631.363

Da im europäischen Schrifttum kaum Unterlagen über den Druckabfall und die notwendige Luftgeschwindigkeit bei der pneumatischen Förderung von Häckselgut vorhanden sind, werden in einem zusammenfassenden Überblick amerikanische Arbeiten über die Förderung in geraden, waagerechten Rohren und in waagrecht liegenden Krümmern vorgestellt. Aus experimentellen Untersuchungen gewonnene Zahlenwertgleichungen erlauben es, den Druckabfall für unterschiedliche Luftgeschwindigkeiten, Rohrdurchmesser und Gutdurchsätze in geraden Rohren und Krümmern zu bestimmen. Mit Hilfe einer theoretischen Analyse ist es möglich, den Druckabfall bei Kenntnis des Reibbeiwertes und der Schwebegeschwindigkeit des zu fördernden Gutes zu berechnen.

1. Einleitung

Die pneumatische Förderung von Häckselgut wird – wenn man von der Hochsilobefüllung absieht – bevorzugt dort eingesetzt, wo Häcksel- oder Ladewagengut auf Unterdachrocknungsanlagen gefördert werden soll. Die Häckselängen des zu fördernden Gutes liegen zwischen 1 und 100 mm, die Gutfeuchtigkeit bewegt sich zwischen 30 und 50 %. Die Einschleusung des Gutes erfolgt meist durch das Abladegebläse, das ebenfalls den nötigen Luftvolumenstrom und den dazu erforderlichen Druck liefert. Obwohl pneumatische Anlagen zur Förderung von Häckselgut bereits seit vielen Jahren eingesetzt werden, sind im europäischen Schrifttum keine Arbeiten bekannt, die z.B. Unterlagen über die Mindestgeschwindigkeit der Luftströmung und den Druckabfall in der Rohrleitung angeben. Die Aufgabe dieses Beitrages soll es daher sein, amerikanische Untersuchungen wiederzugeben, die sich experimentell und theoretisch vor allem mit dem Druckabfall in waagerechten, geraden Rohren beschäftigt haben.

2. Experimentelle Untersuchungen

2.1 Förderung im waagerechten, geraden Rohr

Die ersten Messungen zur Bestimmung des Druckabfalls im waagerechten, geraden Rohr wurden von Felton und Burkhardt [1] vorgenommen. Sie bestimmten den Druckabfall bei der Förderung von gehäckseltem angewelktem Heu mit einem Gutfeuchtegehalt von $U = 30 \div 50 \%$ in einem Rohr mit dem Durchmesser $d = 0,356 \text{ m}$ und der Länge $L = 30,5 \text{ m}$. Bild 1 zeigt den gemessenen Druckabfall Δp in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt U für

verschiedene Gutdurchsätze \dot{m} . Der Einfluß der Gutfeuchte ist nur gering; der Druckabfall steigt mit zunehmendem U leicht an, wenn man den Verlauf für $\dot{m} = 13,6 \text{ t/h}$ ausschließt. Dies ist darauf zurückzuführen, daß mit steigendem U der Anteil des Gutstromes wächst, der längs des Rohrbodens gleitet. Man beachte, daß für die verschiedenen Gutdurchsätze die Luftgeschwindigkeit nicht konstant ist, sondern entsprechend der Gebläsecharakteristik mit wachsendem Gutdurchsatz und damit mit wachsendem Druckabfall absinkt. Für $\dot{m} = 0$ wurde eine Luftgeschwindigkeit von $w_L = 25,4 \text{ m/s}$, für $\dot{m} = 15 \text{ t/h}$ eine solche von $w_L = 15,3 \text{ m/s}$ gemessen. Die Abhängigkeit zwischen der Luftgeschwindigkeit und dem Gutdurchsatz ist ungefähr linear.

Bei einer Luftgeschwindigkeit von $w_L = 17,0 \text{ m/s}$ wurde eine Gutgeschwindigkeit von $w_p = 13,8 \text{ m/s}$ ermittelt.

Leider lassen sich die angegebenen Werte für den Druckabfall nicht auf andere Rohrlängen und -durchmesser umrechnen, da in diesen Werten der Beschleunigungswiderstand enthalten ist. Ähnlich verhält es sich mit den Angaben von Collins u.a. [2], die den Druckabfall beim Fördern von angewelktem Luzerneheu (Feuchtegehalt $U = 20 \div 70 \%$, Häcksellänge 50 mm) in einem 12,7 m langen Rohr mit dem Durchmesser $d = 0,171 \text{ m}$ ermittelten. Die Werte für den Gesamtdruckabfall, die sich ebenfalls aus dem Beschleunigungswiderstand und dem Widerstand bei stationären Verhältnissen zusammensetzen, sind in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit in Tafel 1 wiedergegeben.

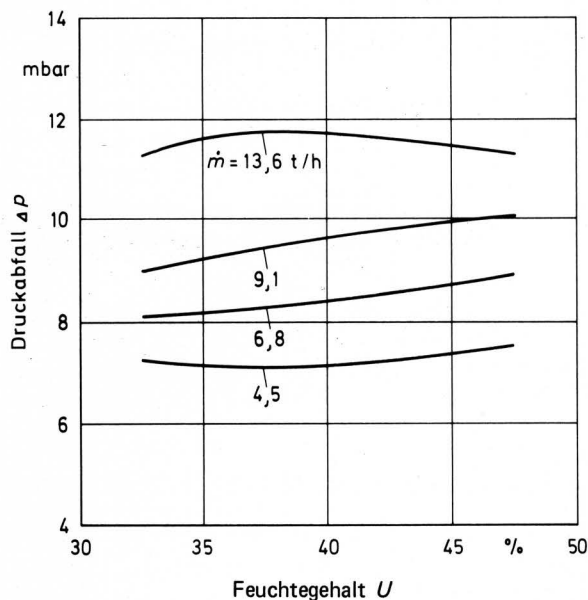


Bild 1. Druckabfall Δp beim Fördern von abgewelktem, gehäckseltem Heu ($U = 30 \div 50 \%$) in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt U , nach Felton und Burkhardt [1].

Rohrlänge $L = 30,5 \text{ m}$;
Rohrdurchmesser $d = 0,356 \text{ m}$

*) Dipl.-Ing. Hinrich Petersen war wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landmaschinen (Direktor: Prof. Dr.-Ing. H.J. Matthies) der Technischen Universität Braunschweig und ist seit 1.1.1976 Mitarbeiter der Maschinenfabrik Hartmann, Offenbach.

Gutdurchsatz \dot{m}	t/h	0,9			1,8		
Luftgeschwindigkeit w_L	m/s	24,4	27,7	30,3	23,4	20,2	30,0
Druckabfall Δp	mbar	5,16	6,13	6,97	4,61	5,73	6,23

Tafel 1. Druckabfall beim Fördern von Luzerneheu, nach Collins u.a. [2].

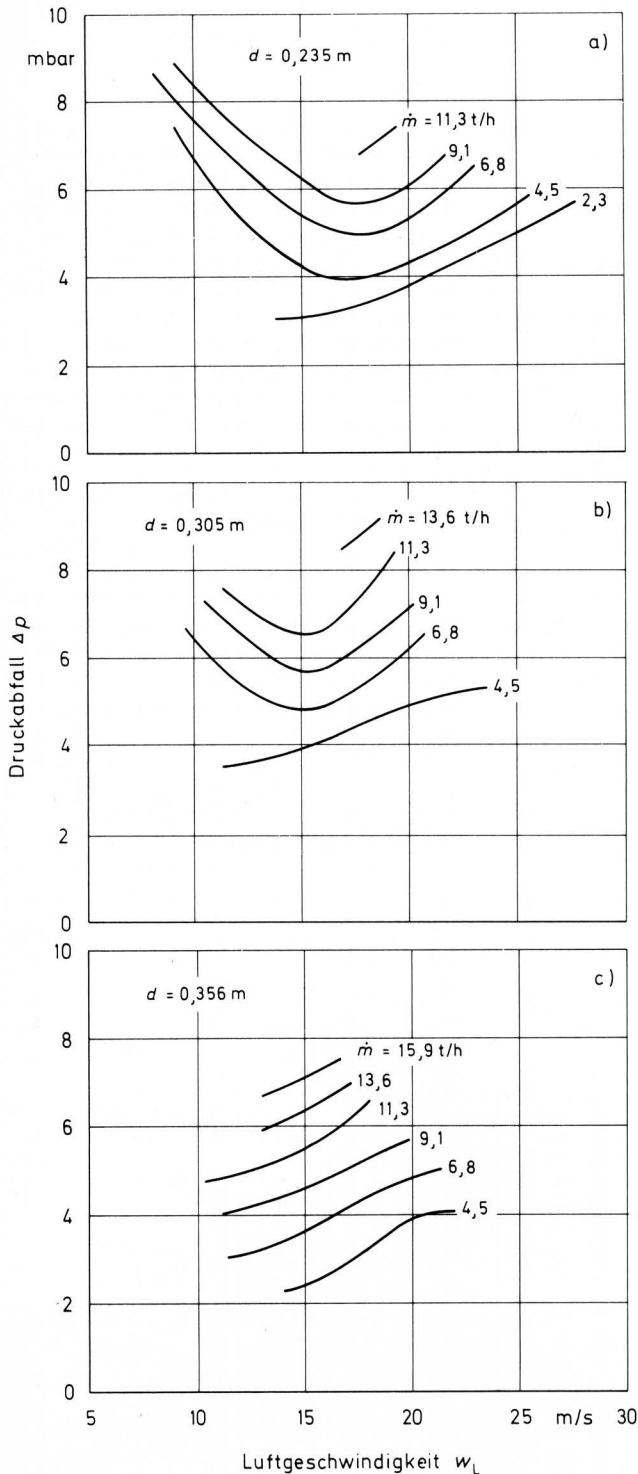


Bild 2. Druckabfall Δp beim Fördern von Luzerneheu ($U = 35 \div 55 \%$) in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit w_L , nach Harris u.a. [3, 4].

Rohrlänge: $L = 15,24$ m
 Rohrdurchmesser: a) $d = 0,235$ m
 b) $d = 0,305$ m
 c) $d = 0,356$ m

Erst die Arbeiten von Harris u.a. [3, 4] erlauben es, den Druckabfall für stationäre Verhältnisse im geraden, waagerechten Rohr anzugeben. Sie bestimmten den Druckabfall von vorgewelktem Luzerneheu mit 100 mm Häcksellänge in Abhängigkeit von Feuchtegehalt, Durchsatz, Luftgeschwindigkeit und Rohrdurchmesser.

Der Einfluß der Feuchte ist wiederum nur gering. Mit wachsendem U steigt der Druckabfall langsam an. Für $U = 35 \div 55 \%$ wurden kaum Unterschiede festgestellt. Für diesen Bereich ist der Druckabfall bei stationären Verhältnissen in einem geraden Rohr von 15,24 m Länge für unterschiedliche Luftgeschwindigkeiten, Gutdurchsätze und Rohrdurchmesser in Bild 2 angegeben. Man erkennt deutlich den charakteristischen Verlauf: mit abnehmender Luftgeschwindigkeit erreicht der Druckabfall ein Minimum und steigt dann sehr schnell wieder an. Dieser Anstieg ist zurückzuführen auf Ablagerungen am Rohrboden, die zu erhöhten Reibungsverlusten führen. Man sollte deshalb den Betriebspunkt einer Anlage stets rechts vom Minimum wählen. Wie aus Bild 2 weiter ersichtlich ist, hat neben der Luftgeschwindigkeit der Gutdurchsatz einen entscheidenden Einfluß auf den Druckabfall. Die oberen Grenzen des Gutdurchsatzes sind durch die Anlage bedingt, da bei höheren Werten Verstopfungen im Rohr auftraten.

Der Einfluß der Gutfeuchte wird noch einmal in Bild 3 verdeutlicht, in dem der Druckabfall – wiederum für Luzerneheu von 100 mm Häcksellänge – bei stationären Verhältnissen in einem

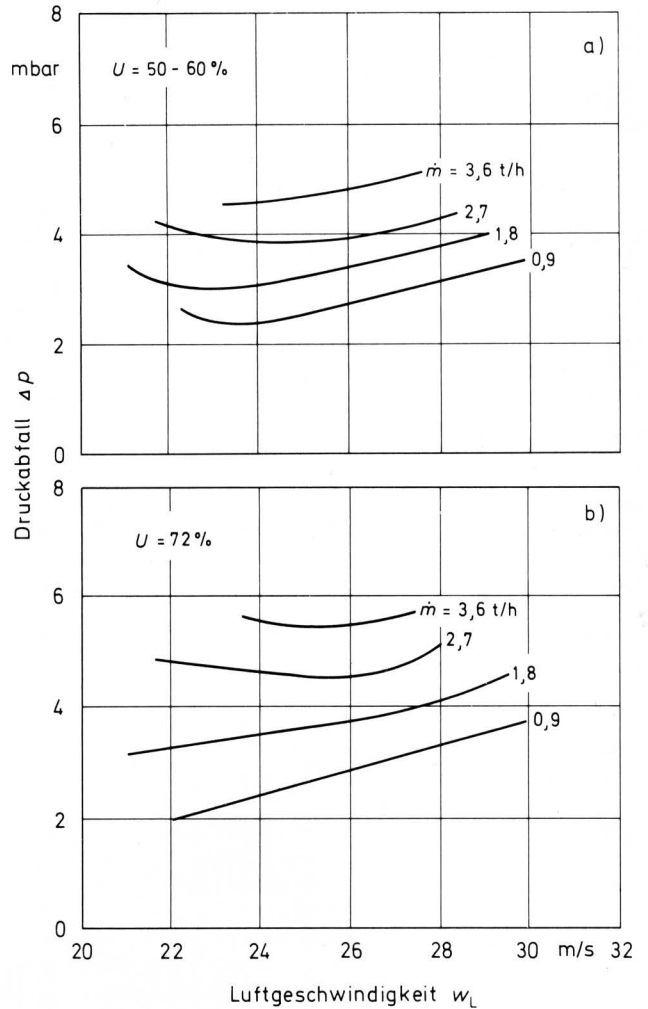


Bild 3. Druckabfall Δp beim Fördern von Luzerneheu unterschiedlicher Gutfeuchte U in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit w_L , nach Harris u.a. [3, 4].

Rohrlänge $L = 7,3$ m
 Rohrdurchmesser $d = 0,171$ m
 Gutfeuchte a) $U = 50 \div 60 \%$ b) $U = 72 \%$

waagerechten Rohr von 7,3 m Länge mit dem Durchmesser $d = 0,171$ m wiedergegeben ist. Mit höherer Gutfeuchte ergeben sich bei sonst gleichen Bedingungen größere Werte für den Druckabfall. Für diesen Rohrdurchmesser lagen die Durchsatzgrenzen für $U = 72\%$ bei $\dot{m} = 5,4$ t/h und für $U = 50 \div 60\%$ bei $\dot{m} = 4,5$ t/h.

Für die Förderung von Mais- und Grashäcksel wurden von *Krutz* [5] und von *Wolfe, Smetana* und *Krutz* [6] umfangreiche Messungen durchgeführt. Sie verwendeten Maishäcksel mit einer Feuchte von $U = 67 \div 70\%$ und einer theoretischen Häcksellänge von 3 mm und eine Luzerne-Trespengras-Mischung mit $U = 50 \div 54\%$ und einer Häcksellänge von 6 mm. Aus dem Verlauf des Druckabfalls über der Rohrlänge, **Bilder 4 und 5**, konnten sie mit Hilfe der Methode des kleinsten Fehlerquadrates eine empirische Zahlenwertgleichung ableiten, die neben dem Druckabfall für die reine Luftströmung sowohl den Druckabfall für den Feststoffanteil im stationären Fall als auch den für die Beschleunigung des Gutes angibt, Bild 5:

$$\Delta p = \Delta p_L + \Delta p_S + \Delta p_b \quad (1)$$

$$= 1,57 \cdot 10^{-4} \frac{L \dot{V}_L^2}{d^5} + a \cdot \frac{\dot{m} L}{d^5} + b \frac{\dot{m} \dot{V}_L}{d^5} (1 - e^{-0,72L})$$

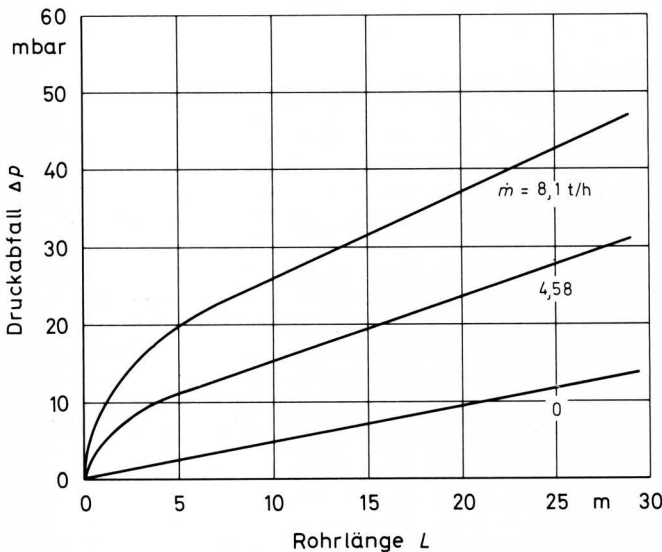


Bild 4. Druckabfall Δp beim Fördern von Maishäcksel ($U = 67 \div 70\%$) in Abhängigkeit von der Rohrlänge L nach *Krutz* [5] und *Wolfe, Smetana* und *Krutz* [6].
Rohrdurchmesser $d = 0,152$ m; Luftgeschwindigkeit $w_L = 27,1$ m/s

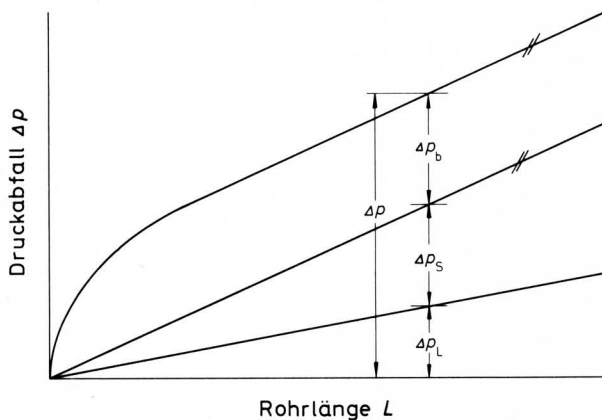


Bild 5. Aufteilung des Druckabfalls Δp in einen Anteil für die Luftförderung (Δp_L), einen für Gutförderung bei stationären Verhältnissen (Δp_S) und einen für die Beschleunigung des Gutes (Δp_b).

In dieser Zahlenwertgleichung sind:

- Δp Druckabfall in mbar
- L Rohrlänge in m
- d Rohrdurchmesser in m
- \dot{V}_L Luftvolumenstrom in m^3/s
- \dot{m} Gutdurchsatz in t/h.

Die Konstanten a und b sind von der Gutart abhängig. Für die verwendeten Güter gilt:

- Maishäcksel: $a = 2,2 \cdot 10^{-3}$
 $b = 0,24 \cdot 10^{-3}$
- Grashäcksel: $a = 1,3 \cdot 10^{-3}$
 $b = 0,45 \cdot 10^{-3}$.

Gl. (1) ist nur gültig im sog. linearen Bereich, wenn der Druckabfall mit dem Gutdurchsatz linear ansteigt. Dies ist der Fall, wenn keine Ablagerungen im Rohr auftreten, wenn also der Betriebspunkt der Anlage in einer Darstellung nach Bild 2 rechts vom Minimum liegt. Die Grenzen für die Gültigkeit der Gleichung sind für die eingesetzten Rohrdurchmesser in **Tafel 2** wiedergegeben. Die Rohrlänge betrug bis zu $L = 28$ m; die mittlere Dichte der Luft ergab sich bei den Versuchen zu $\rho_L = 1,12$ kg/m^3 . Wenn man bei den angeführten Rohrdurchmessern einen ausreichenden Gutdurchsatz bei stabilen Verhältnissen erhalten will, müssen schon Luftgeschwindigkeiten von $w_L \geq 25$ m/s gewählt werden.

Rohrdurchmesser d [m]	Luftvolumenstrom \dot{V}_L [m^3/s]	Luftgeschwindigkeit w_L [m/s]	Max. Gutdurchsatz	
			Mais-häcksel \dot{m} [t/h]	Gras-häcksel \dot{m} [t/h]
0,102	0,160	19,8	0,9	—
0,102	0,203	25,0	4,5	—
0,102	0,255	31,4	5,4	—
0,102	0,311	38,4	5,4	—
0,152	0,311	17,1	1,8	0,9
0,152	0,401	22,0	3,6	2,7
0,152	0,495	27,2	11,8	8,2
0,152	0,585	32,1	13,6	9,1
0,229	0,905	22,1	3,6	1,8
0,229	1,104	26,9	21,0	8,2
0,229	1,297	31,6	24,5	12,7

Tafel 2. Grenzen der Gültigkeit von Gleichung (1).

Die Beschleunigung des Gutes kann als abgeschlossen gelten, wenn ungefähr 99 % des Druckabfalls aufgrund der Beschleunigung erreicht sind:

$$1 - e^{-0,72L} = 0,99$$

Aus dieser Bedingung erhält man für die Beschleunigungsstrecke

$$L_b = 6,4 \text{ m}$$

Brusewitz und *Wolfe* [7] ermittelten für Luzerneheu mit 8 % Feuchtigkeit und einer Häcksellänge von 80 mm aus fotografischen Aufnahmen eine Beschleunigungsstrecke von $L_b = 7,6$ m.

Mit den Angaben von *Wolfe, Smetana* und *Krutz* ist es möglich, den Druckabfall im geraden, waagerechten Rohr für unterschiedliche Rohrdurchmesser, -längen, Luftgeschwindigkeiten und Gutdurchsätze mit Hilfe einer empirischen Zahlenwertgleichung zu berechnen, wobei Grenzen für den Gutdurchsatz beachtet werden müssen.

Im folgenden soll kurz auf den Druckabfall im horizontalen Krümmer eingegangen werden.

2.2 Förderung durch den horizontalen Krümmer

Für einen 90°-Krümmer geben *Harris* und *Grace* [8] die Scheinlänge mit $L_{skr} = 4,6$ m bei Häckselgutförderung an. Diese Angabe ist aber sicher nicht allgemeingültig. Die einzigen experimentellen Untersuchungen über den Druckabfall im horizontal liegenden Krümmer wurden von *Singh* und *Wolfe* [9] vorgenommen. Sie verwendeten Krümmer mit einem Rohrdurchmesser von $d = 0,150$ m, deren Umlenkungswinkel φ und Krümmungsradien R in **Tafel 3** angegeben sind.

Nr.	Umlenkungswinkel φ [°]	Krümmungsradius R [m]
1	45	2,5 d
2	45	5 d
3	45	8 d
4	90	2,5 d
5	90	5 d
6	90	8 d

Tafel 3. Geometrische Daten der von *Singh* und *Wolfe* [9] verwendeten Krümmer, $d = 0,150$ m.

Als Gut wurde Maishäcksel mit einer theoretischen Häcksellänge von 3 mm benutzt, das für 4 Monate einsiliert war. Der Feuchtigkeitsgehalt betrug $67 \div 70$ %. Der durch den Krümmer bedingte Druckabfall wird aufgeteilt in einen Anteil, der sich in einem geraden Rohr von der Länge der Krümmermittellinie bei stationären Verhältnissen ergeben würde, in einen Anteil, der sich auf die Krümmung des Rohrbogens, und einen Anteil, der sich auf die Wiederbeschleunigung des Gutes hinter dem Krümmer zurückführen läßt:

$$\begin{aligned} \Delta p_{kr} &= \Delta p_{Gerade} + \Delta p_{Krümmung} + \Delta p_{Wiederbeschleunigung} \\ &= \Delta p_{krG} + \Delta p_k + \Delta p_B \\ &= \Delta p_{krG} + \Delta p_{kro} \\ \text{mit } \Delta p_{kro} &= \Delta p_k + \Delta p_B \end{aligned} \quad (2)$$

Die beiden Anteile Δp_k und Δp_B lassen sich weiter in einen Luft- und Feststoffanteil trennen:

$$\Delta p_{kro} = \Delta p_{kL} + \Delta p_{kS} + \Delta p_{BL} + \Delta p_{BS} \quad (3)$$

Der Feststoffanteil $\Delta p_{krs} = \Delta p_{kS} + \Delta p_{BS}$ hängt von verschiedenen Parametern ab. In dimensionsloser Schreibform lautet die Abhängigkeit:

$$\frac{\Delta p_{krs}}{\rho_L w_L^2} = f\left(\frac{R}{d}, \frac{\dot{m}}{\rho_L w_L d^2}, \varphi\right) \quad (4)$$

Für bestimmte Winkel φ wird eine Potenzfunktion angenommen:

$$\frac{\Delta p_{krs}}{\rho_L w_L^2} = a \left(\frac{R}{d}\right)^b \left(\frac{\dot{m}}{\rho_L w_L d^2}\right)^c \quad (5)$$

Aus den experimentellen Ergebnissen wurde eine lineare Beziehung zwischen den dimensionslosen Größen $\Delta p_{krs}/(\rho_L w_L^2)$ und $\dot{m}/(\rho_L w_L d^2)$ ermittelt, so daß der Exponent c gleich 1 gesetzt werden kann. Damit wird Gl. (3) in folgender Form angegeben:

$$\Delta p_{kro} = a \frac{\dot{m} w_L}{d^2} \left(\frac{R}{d}\right)^b + \Delta p_{kL} + \Delta p_{BL} \quad (6)$$

Nach der Methode des kleinsten Fehlerquadrats wurde für die beiden Umlenkungswinkel aus den experimentellen Ergebnissen eine Zahlenwertgleichung aufgestellt:

$$\Delta p_{kro} = a \frac{\dot{m} w_L}{d^2} \left(\frac{R}{d}\right)^{-0,18} + 0,323 \quad (7)$$

Hierin bedeuten:

Δp_{kro}	Druckabfall in mbar
\dot{m}	Gutdurchsatz in t/h
w_L	Luftgeschwindigkeit in m/s
d	Rohrdurchmesser in m
R	Krümmungsradius in m

Die Konstante a ist abhängig vom Umlenkungswinkel φ :

$$\begin{aligned} \varphi = 45^\circ : a &= 1,57 \cdot 10^{-3} \\ \varphi = 90^\circ : a &= 2,55 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Diese Gleichung gibt den durch die Krümmung und Wiederbeschleunigung bedingten Druckabfall an. Sie ist gültig für Luftgeschwindigkeiten $w_L = 18 \div 40$ m/s, Gutdurchsätze bis $\dot{m} = 13$ t/h und Gutarten, die in ihren Eigenschaften dem verwendeten Maishäcksel ähnlich sind. Der Druckabfallanteil, der sich in einem geraden Rohr von der Länge der Krümmermittellinie ergeben würde, läßt sich z.B. nach Gl. (1) berechnen.

3. Theoretische Analyse

Eine theoretische Herleitung des Druckabfalls wird dadurch erschwert, daß die Häckselteilchen nicht von gleicher Form und daß mit zunehmender Gutbeladung μ nicht mehr alle Teilchen vollständig von der Luftströmung umgeben sind, sondern zum Teil auf dem Rohrboden gleiten. *Wolfe*, *Smetana* und *Tatepo* [10] benutzen eine Theorie, die bereits von *Kikkawa u.a.* [11, 12] entwickelt worden ist und die es erlaubt, den Druckabfall bei der Förderung von Gras- und Maishäcksel für die Beschleunigung und für stationäre Verhältnisse im geraden, waagerechten Rohr nur mit Hilfe des Gleitreibbeiwertes und der Schwebegeschwindigkeit der Teilchen zu berechnen. Der Druckabfall wird aufgeteilt in einen Anteil für die Luft- und einen für die Feststoffförderung:

$$\Delta p = \Delta p_L + \Delta p_S \quad (8)$$

Der Anteil für die Luft Δp_L wird aus der bekannten Gleichung

$$\Delta p_L = \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho_L}{2} w_L^2,$$

der Anteil für den Feststoff nach der bereits von *Barth* angewendeten Beziehung ermittelt:

$$\Delta p_S = \mu \lambda_z \frac{L}{d} \frac{\rho_L}{2} w_L^2 \quad (9)$$

Die Navier-Stokes-Gleichung für die eindimensionale Strömung im runden Rohr mit dem Rohrradius r lautet, wenn mit x die Weg-Koordinate in axialer Richtung bezeichnet wird:

$$-\frac{1}{\rho_L} \frac{dp}{dx} + \nu \left(\frac{d^2 w_L}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw_L}{dr} \right) + F_x = 0 \quad (10)$$

Da der zweite Ausdruck auf der linken Seite der Gleichung die Reibung zwischen Strömung und Rohrwand wiedergibt, kann er weggelassen werden, da die Rohrreibung bereits nach Δp_L in Gl. (8) berücksichtigt wird:

$$\frac{dps}{dx} = \rho_L F_x \quad (11)$$

F_x ist die x-Komponente der äußeren Kräfte, die auf eine Masseneinheit der Rohrströmung einwirken. Im Falle der Gutförderung bestehen die äußeren Kräfte aus den Widerstandskräften, die auf die Teilchen einwirken. Die Widerstandskraft für ein Teilchen beträgt:

$$F_w = c_w A_p \frac{\rho_L}{2} (w_L - w_p)^2 = k m_p (w_L - w_p)^2 \quad (12).$$

Der Faktor k wird "Beschleunigungsfaktor" genannt:

$$k = \frac{1}{2} \frac{c_w \rho_L A_p}{m_p}.$$

Hierin ist:

- c_w Widerstandsbeiwert
- A_p Anströmfläche eines Teilchens
- m_p Masse eines Teilchens.

Mit \dot{N} als der Zahl der Teilchen pro Zeiteinheit ist die Zahl der Teilchen pro Masseneinheit der Rohrströmung

$$\frac{\dot{N}}{w_k \frac{\pi}{4} d^2 \rho_L}$$

Damit erhält man für die auf die Masseneinheit der Rohrströmung bezogene äußere Kraft:

$$F_k = F_w \cdot \frac{\dot{N}}{w_k \frac{\pi}{4} d^2 \rho_L} \quad (13).$$

Mit Gl. (13) ergibt sich der Druckabfall nach Gl. (11):

$$\frac{dp_S}{dx} = \frac{\dot{N}}{\frac{\pi}{4} d^2} k \cdot m_p \frac{(w_L - w_p)^2}{w_k} \quad \text{und damit:}$$

$$\begin{aligned} \Delta p_S &= \frac{\dot{N}}{\frac{\pi}{4} d^2} k \cdot m_p \int_0^L \frac{(w_L - w_p)^2}{w_p} dx \\ &= \frac{\dot{N}}{\frac{\pi}{4} d^2} k \cdot m_p \int_0^T (w_L - w_p)^2 dt \end{aligned} \quad (14).$$

In dieser Gleichung ist T die Aufenthaltszeit der Teilchen im Rohr. Die Abhängigkeit der Teilchengeschwindigkeit w_p von der Zeit t ist durch die Bewegungsgleichung für ein einzelnes Teilchen gegeben:

$$\frac{dw_k}{dt} = k (w_L - w_p)^2 - f g \quad (15).$$

Der Gleitreibbeiwert f umfaßt die Reib- und Stoßverluste eines Teilchens an der Rohrwand. Die Integration von Gl. (15) ergibt mit $w_k(0) = 0$:

$$w_k = w_L - w_0 \frac{e^{c_1 t} + c_2}{e^{c_1 t} - c_2} \quad (16),$$

mit

$$\begin{aligned} w_0 &= \sqrt{f g / k} \\ c_1 &= 2 k w_0 \\ c_2 &= (w_L - w_0) / (w_L + w_0). \end{aligned}$$

Setzt man Gl. (16) in Gl. (14) ein und integriert, erhält man:

$$\Delta p_S = \frac{\dot{N}}{\frac{\pi}{4} d^2} k \cdot m_p \frac{w_0^2}{c_1} \left(c_1 T - \frac{4 c_2}{e^{c_1 T} - c_2} + \frac{4 c_2}{1 - c_2} \right) \quad (17).$$

Vergleicht man Gl. (17) mit Gl. (9), in der μ ersetzt wird entsprechend

$$\mu = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_L} = \frac{\dot{N} \cdot m_p}{\frac{\pi}{4} d^2 w_L \rho_L},$$

dann ergibt sich für den Widerstandsbeiwert λ_z des Feststoffanteils:

$$\lambda_z = \frac{d w_0}{L \cdot w_L} \left(c_1 T - \frac{4 c_2}{e^{c_1 T} - c_2} + \frac{4 c_2}{1 - c_2} \right) \quad (18).$$

In dieser Gleichung ist die Aufenthaltszeit T eines Teilchens noch unbekannt, ihre Abhängigkeit von der Rohrlänge L wird durch Integration von Gl. (16) gewonnen:

$$L = (w_L + w_0) T - \frac{1}{k} \lg \frac{e^{c_1 T} - c_2}{1 - c_2} \quad (19).$$

Der "Beschleunigungsfaktor" k hängt vom Widerstandsbeiwert c_w und den Kenngrößen A_p und m_p eines Teilchens ab, die oft schwer zu bestimmen sind. Einfacher ist es, den Faktor k durch die Schwebegeschwindigkeit w_s auszudrücken:

$$k = \frac{g}{w_s^2} \quad (20).$$

Diese Beziehung gilt für den Zustand des Schwebens und damit strenggenommen nur für einen konstanten Widerstandsbeiwert; sie ist aber in der Bewegungsgleichung zulässig, da c_w für $Re > 300$ als konstant angenommen werden kann.

Bei Gutströmen ändert sich das Widerstandsverhalten mit der Gutbeladung; aus Beobachtungen ist bekannt, daß der Widerstand gegenüber dem eines Einzelteilchens sinkt. Diese Abnahme wird ausgedrückt durch einen Faktor S :

$$S = \frac{k}{k_0} \quad (21).$$

k_0 ist dabei der Beschleunigungsfaktor eines einzelnen Teilchens. Aus Versuchen und dem Vergleich mit gemessenen Werten für den Druckabfall erhielten *Wolfe*, *Smetana* und *Tatepo* eine von der Gutbeladung μ abhängige Beziehung für S :

$$S = \frac{1}{1,041} (e^{4\mu} - 0,002 \mu + 0,041) \quad (22).$$

Hiernach sinkt der Widerstand von Gutströmen gegenüber dem von Einzelteilchen sehr schnell mit der Gutbeladung μ ab. Mit Hilfe der Gln. (18), (19) und (22) kann damit der Druckabfall von Häckselgut unterschiedlicher Eigenschaften berechnet werden:

$$\Delta p = (\lambda + \mu \cdot \lambda_z) \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho_L}{2} w_L^2 \quad (23).$$

Der Vorteil dieser Methode liegt darin, daß der Widerstandsbeiwert λ_2 aus dem Reibbeiwert f und der Schwebegeschwindigkeit w_s ermittelt werden kann.

Als Beispiel soll der Druckabfall für Gras- und Maishäcksel über der Rohrlänge berechnet und mit den Werten verglichen werden, die sich aus der experimentell gewonnenen Beziehung (1) von *Wolfe, Smetana und Krutz* [7] ergeben. Durch eine gerade, waagerechte Rohranlage vom Durchmesser $d = 0,25$ m soll bei einer Luftgeschwindigkeit von $w_L = 25,0$ m/s Gras- bzw. Maishäcksel bei einem Durchsatz von $\dot{m} = 20$ t/h gefördert werden. Die Schwebegeschwindigkeit für diese Güter betrage:

Maishäcksel: $w_s = 3,5$ m/s
Grashäcksel: $w_s = 1,9$ m/s.

Der Reibbeiwert wird mit $f = 0,55$ angenommen. Die Ergebnisse der Rechnung sind in **Bild 6** wiedergegeben. Für Grashäcksel ergibt sich eine annehmbare Übereinstimmung (Kurven b); für Maishäcksel wird der Druckabfall nach der analytischen Methode zu niedrig angegeben. Die Abweichungen von den experimentell ermittelten Werten betragen bis zu 30 %. Dies kann darin begründet sein, daß die Schwebegeschwindigkeit nicht genau genug gewählt worden ist.

Der Nachteil dieser Methode liegt darin, daß die Schwebegeschwindigkeit des Häckselgutes sehr genau bestimmt werden muß und daß die Beziehung, die die Annahme des Luftwiderstandes des Gutstromes (Zunahme der Schwebegeschwindigkeit) mit der Gutbeladung angibt, kein allgemeingültiges Gesetz ist, sondern aus Druckabfallmessungen gewonnen wurde.

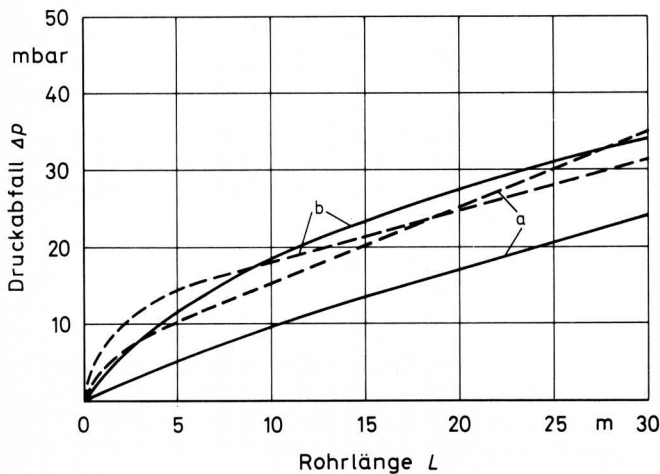


Bild 6. Vergleich der Werte für den Druckabfall Δp von Maishäcksel (Kurven a) und Grashäcksel (Kurven b).

----- aus experimentellen Ergebnissen ermittelt
— aus theoretischer Analyse berechnet

4. Zusammenfassung

Es werden amerikanische Arbeiten über den Druckabfall bei der Förderung von Gras- und Maishäcksel unterschiedlicher Feuchte in geraden, waagerechten Rohren und in horizontal liegenden Krümmern vorgestellt. Aus experimentellen Untersuchungen gewonnene Zahlenwertgleichungen erlauben es, den Druckabfall für unterschiedliche Luftgeschwindigkeiten, Rohrdurchmesser und Gutdurchsätze zu bestimmen. Mit Hilfe einer theoretischen Analyse ist es möglich, den Druckabfall von Gutströmen bei Kenntnis des Gleitreibbeiwertes und der Schwebegeschwindigkeit des zu fördernden Gutes zu berechnen. Diese Methode setzt aber eine genaue Messung der Schwebegeschwindigkeit und eine Bestimmung der Änderung der Schwebegeschwindigkeit des Gutstromes mit der Gutbeladung voraus.

Für die Berechnung vollständiger pneumatischer Anlagen zur Förderung von Häckselgut sind aber weitere Untersuchungen über den Druckabfall in senkrechten Rohren und in Krümmern, die in einer senkrechten Ebene liegen, notwendig. Weiterhin sollte die Änderung der Kennlinie des Abladegebläses mit der Gutbeladung geklärt werden.

Verwendete Formelzeichen

a, b, c	—	Konstanten
A_p	m^2	Anströmfläche eines Teilchens
c_1	$1/s$	Beiwert
c_2	—	Konstante
c_w	—	Widerstandsbeiwert
d	m	Rohrdurchmesser
f	—	Gleitreibbeiwert
F_k	N	Summe der Kräfte auf die Teilchen in der Masseneinheit der Rohrströmung
F_x	N	Kraft in x-Richtung
F_w	N	Luftwiderstandskraft auf ein Teilchen
g	m/s^2	Fallbeschleunigung
k	$1/m$	Beschleunigungsfaktor $k = g/w_s^2$
L	m	Rohrlänge
L_B	m	Beschleunigungsstrecke
L_{Skr}	m	Scheinlänge für einen Krümmer
\dot{m}	t/h	Gutdurchsatz
\dot{m}_L	t/h	Luftdurchsatz
m_p	kg	Masse eines Teilchens
N	$1/s$	Zahl der Teilchen pro Zeiteinheit
Δp	mbar	Druckabfall
Δp_b	mbar	Druckabfall für Beschleunigen des Gutes nach dem Einschleusen
Δp_B	mbar	Druckabfall für Wiederbeschleunigen nach einem Krümmer
Δp_{BL}	mbar	Druckabfall für Wiederbeschleunigen der Luft nach einem Krümmer
Δp_{BS}	mbar	Druckabfall für Wiederbeschleunigen des Gutes nach einem Krümmer
Δp_k	mbar	Druckabfall aus der Krümmung des Rohrbogens
Δp_{kL}	mbar	Druckabfall aus der Krümmung des Rohrbogens für die Luft
Δp_{kr}	mbar	Druckabfall für einen Krümmer
Δp_{krg}	mbar	Druckabfall eines geraden Rohres gleicher Länge
Δp_{kro}	mbar	Druckabfall für das Durchlaufen der Krümmung und Wiederbeschleunigen
Δp_{krS}	mbar	Druckabfall für den Feststoff beim Durchlaufen der Krümmung und Wiederbeschleunigen
Δp_{kS}	mbar	Druckabfall aus der Krümmung des Rohrbogens für das Gut
Δp_L	mbar	Druckabfall für die Förderung der Luft
Δp_S	mbar	Druckabfall für die Förderung des Gutes
r	m	Rohrradius
R	m	Krümmungsradius
S	—	Faktor
t	s	Zeit
T	s	Aufenthaltszeit eines Teilchens im Rohr
U	%	Gutfeuchtegehalt
\dot{V}_L	m^3/s	Luftvolumenstrom

w_0	m/s	Konstante
w_p	m/s	Gutgeschwindigkeit
w_L	m/s	Luftgeschwindigkeit
w_S	m/s	Schwebegeschwindigkeit
x	m	Wegkoordinate
λ	—	Widerstandsbeiwert für die Luftströmung
λ_z	—	Widerstandsbeiwert für die Gutströmung
μ	—	Gutbeladung
ν	m ² /s	kinematische Zähigkeit der Luft
ρ_L	kg/m ³	Dichte der Luft
φ	°	Umlenkwinkel

- [4] *Harris, W.L., K.E. Felton, G. Burkhardt u. N.E. Collins:* Pneumatic handling of chopped alfalfa hay. Bulletin A - 143, Agricultural Experiment Station, University of Maryland, College Park, 1966.
- [5] *Krutz, G.W.:* Acceleration and steady state pressure drops in horizontal pneumatic conveying of corn silage and haylage. M.S.-Thesis, University of Wisconsin, 1968.
- [6] *Wolfe, R.R., M.M. Smetana u. G.W. Krutz:* Performance characteristics and feeder design in the pneumatic conveyance of chopped forage. Transactions ASAE Bd. 13 (1970) Nr. 3, S. 332/34, 339.
- [7] *Brusewitz, G.H. u. R.R. Wolfe:* Flow characteristics in the pneumatic conveying of chopped forage. Transactions ASAE Bd. 10 (1967) Nr. 3, S. 320/24, 329.
- [8] *Harris, E. u. M.W.K. Grace:* Chopping and pneumatic conveying of silage and hay. Farm Mechanization 117 (1959), S. 84/86.
- [9] *Singh, B. u. R.R. Wolfe:* Pressure losses due to bends in pneumatic forage handling. Transactions ASAE Bd. 15 (1972) Nr. 2, S. 246/48.
- [10] *Wolfe, R.R., M.M. Smetana u. C.G. Tatepo:* Predicting line pressure drop in pneumatic transport of chopped forage. Transactions ASAE Bd. 14 (1971) Nr. 6, S. 1047/50.
- [11] *Kikkawa, S.:* Research on the pneumatic conveyance of densely concentrated solid particles in a horizontal pipe. Bulletin of JSME Bd. 6 (1963) Nr. 24, S. 703/08.
- [12] *Kikkawa, S. u.a.:* On the pressure drop and clogging limit in the horizontal pneumatic conveyance pipe. Bulletin of JSME Bd. 8 (1965) Nr. 32, S. 627/34.

Schrifttum

- [1] *Felton, K.E. u. G. Burkhardt:* Pneumatic handling of chopped forage. ASAE-paper 60-610.
- [2] *Collins, N.E., W.L. Harris u. G. Burkhardt:* Pneumatic conveying of chopped forage. Transactions ASAE Bd. 8 (1965) Nr. 2, S. 196/98.
- [3] *Harris, W.L., K.E. Felton u. G. Burkhardt:* Design data for pneumatic conveying of chopped forage. Transactions ASAE Bd. 8 (1965) Nr. 2, S. 194/95, 198.

Methoden der Vorentwurfsplanung im Stallbau

Von Theo Bischoff, Miloslav Adam und Ludwig Gekle, Stuttgart-Hohenheim*)

DK 631.22:65.012.2

Der Ausführung landwirtschaftlicher Bauvorhaben geht in der Regel eine umfangreiche Planungsphase voraus. Dabei ist zwischen einem betriebswirtschaftlichen und einem baulich-verfahrenstechnischen Teil zu unterscheiden. Obgleich die Grenzen zwischen beiden Planungsbereichen nicht eindeutig gezogen werden können, erfolgt die praktische Planungsarbeit bisher gesondert mit jeweils spezifischen Methoden. Eine vergleichende Betrachtung der Methoden zur Vorentwurfsplanung zeigt bei einem zahlenmäßig begrenzten Methodenangebot eine große Variationsbreite hinsichtlich der Zwangsläufigkeit des Planungsablaufs. Bei neueren Planungsmethoden ergeben sich verbesserte Möglichkeiten der simultanen Planung mit gleichzeitiger Berücksichtigung ökonomischer und technischer Gesichtspunkte.

Die Untersuchung wurde im Rahmen des Einzelvorhabens A/2 des Sonderforschungsbereichs 141 (Technik und Bauwesen in der tierischen Produktion) aus Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft durchgeführt.

*) Prof. Dr. Theo Bischoff ist Leiter des Fachgebiets Verfahrenstechnik in der Tierproduktion des Instituts für Agrartechnik an der Universität Hohenheim, Stuttgart-Hohenheim. Dipl.-Ing. Miloslav Adam ist wissenschaftlicher Angestellter und Dipl.-Ing. agr. Dr. oec. Ludwig Gekle ist wissenschaftlicher Assistent beim Fachgebiet.

Inhalt

1. Einleitung
2. Stellung der Vorentwurfsplanung
3. Inhalt der Vorentwurfsplanung
 - 3.1 Verbindung mit vorhergehenden Planungsbereichen
 - 3.2 Abschnitte der Vorentwurfsplanung
4. Methodenübersicht
 - 4.1 Vorentwurfsplanung mittels Flußdiagramm
 - 4.2 Vorentwurfsplanung mit Hilfe von Wirtschaftlichkeitskriterien
 - 4.3 Vorentwurfsplanung mittels "Suchmethode"
 - 4.4 Vorentwurfsplanung mittels linearer Optimierung
5. Vergleichende Beurteilung
6. Zusammenfassung

1. Einleitung

Die allgemeine wirtschaftliche Entwicklung bewirkt auch weiterhin strukturelle Änderungen im Agrarbereich. Dabei ist mit einer gewissen Umschichtung der Produktionsstruktur der tierischen Erzeugung zu rechnen, wobei in gewissem Umfang Neu-, Um- und Erweiterungsbauten für wachsende Bestandsgrößen zu erstellen sind. Bezüglich des Einsatzes des Produktionsmittels "Gebäude" bestehen Ansatzpunkte zur Rationalisierung im Bereich des Raumprogramms, der Bauplanung und der Bautechnik. Eine gewisse