

Gestaltung von Krümmern für landwirtschaftliche Wurfgebläse

Von Hinrich Petersen, Braunschweig*)

DK 621.867:631.363

Das Wurfgebläse erweist sich immer wieder als Engpaß in der gesamten Häckselkette, und hier ist es besonders der Krümmer, von dem Verstopfungen im Förderrohr ausgehen. Deshalb ist eine bessere Kenntnis des Geschwindigkeitsverlustes in Abhängigkeit von den verschiedenen Einflußfaktoren anzustreben. Es wird der Einfluß der Krümmerform, der Guteigenschaften und der Luftgeschwindigkeit auf den Geschwindigkeitsverlust theoretisch untersucht, wobei die Bewegung des Gutes im Krümmer in Strömungs-, Stoß- und Reibungsvorgänge aufgeteilt wird. Für unterschiedliche Eintrittsgeschwindigkeiten werden in Abhängigkeit von den verschiedenen Parametern die Gutaustrittsgeschwindigkeiten angegeben. Experimentell wird eine gute Übereinstimmung der theoretischen Betrachtung mit den praktischen Verhältnissen nachgewiesen.

1. Einleitung

Bei den Förderprozessen der Häckselkette spielen die Wurfgebläse eine wichtige Rolle als Förderorgane im Feldhäcksler, zur Beschickung von Hochsilos und bei der Entnahme des Gutes durch die Obenentnahmefräse. Bei den heutigen Bergeleistungen der selbstfahrenden Maishäcksler bis zu 150 t/h erweist sich das Wurfgebläse immer wieder als Engpaß in der gesamten Häckselkette. Hier ist es besonders der Krümmer, von dem Verstopfungen im Förderrohr ausgehen, die dann zu empfindlichen Verzögerungen bei der Futterbergung führen.

Das Wurfgebläse läßt sich von der Form her in drei Bereiche aufteilen:

1. das Förderorgan mit dem zugehörigen Gehäuse,
2. das anschließende gerade Förderrohr,
3. den Krümmer, der das Gut von der vertikalen Richtung in die horizontale oder auch wieder in die vertikale abwärts umlenken soll.

*) Dipl.-Ing. Hinrich Petersen ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landmaschinen (Direktor: Prof. Dr.-Ing. H.J. Matthies) der TU Braunschweig.

Über die Bewegungsvorgänge im Gehäuse sind als grundlegende Arbeiten die von *Kampf* [1], *Chancellor* [2] und *Totten* [3, 4] zu nennen. Für den zweiten Bereich, das gerade vertikale Förderrohr, sind die Arbeiten von *Gluth* [5], *Vavra* [6] und *Chomenko* [7] zu erwähnen, die alle drei zu dem Ergebnis kommen, daß es für die in der Praxis bei der Hochsilobefüllung vorkommenden Förderhöhen wirtschaftlicher ist, das Häckselgut pneumatisch, also mit Hilfe einer Luftströmung, als nur durch Werfen zu fördern. Über den dritten Bereich, den Krümmer, liegen nur wenige Arbeiten vor. Mit den Stoß- und Reibungsverlusten hat sich besonders *Chancellor* [8] befaßt. Er schlägt einen Krümmer mit geradem Einlauf vor, der den geringsten Energieverlust aufweisen soll.

Damit es im Krümmer nicht zu Verstopfungen kommt, ist eine bestimmte Guteintrittsgeschwindigkeit zum Passieren des Krümmers notwendig, die abhängig ist von der Krümmerform, den Eigenschaften des Gutes selbst und der Luftgeschwindigkeit. Hinsichtlich des Energiebedarfs sollte sie möglichst gering sein, d.h. der Krümmer sollte einen möglichst geringen Energieverlust aufweisen. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den Einfluß der oben genannten Parameter auf den Energieverlust im Krümmer zu klären.

Für die Befüllung von Hochsilos gibt es einen Vorschlag von *Fiser* [9], auf den Krümmer ganz zu verzichten, indem der Silo durch ein zentrisches Mittelrohr befüllt wird. Der spezifische Energieverbrauch soll gegenüber dem herkömmlichen Verfahren um 40 % niedriger liegen, und es soll — da ja ein Krümmer nicht mehr vorhanden — keine Verstopfungen mehr geben. Dieser Vorschlag erscheint sehr interessant und sollte für die Zukunft weiter verfolgt werden.

2. Theoretische Betrachtung der Gutstrombewegung im Krümmer

2.1 Krümmer mit konstantem Krümmungsradius

Bild 1 zeigt einen 90°-Krümmer mit konstantem Außenradius R_a . Das Gut bewegt sich zusammen mit der Luft im geraden Rohr als Zweiphasenströmung vertikal nach oben, wobei die Geschwindigkeit des Gutes mit \dot{y} und die der Luft mit w_L bezeichnet sei, wenn die vertikale Richtung mit y und die horizontale mit x festgelegt wird. Nach Erreichen des Krümmers wird der Gutstrom aufgrund der Richtungsänderung der Luftströmung in x -Richtung abgelenkt und prallt nach einer bestimmten Wegstrecke gegen die Krümmeraußenwand. Der Stoß ist als vollplastisch anzusehen, so daß das

Gut tangential weiterfliegt. Nach dem Stoß trennen sich Gut- und Luftstrom. Das Gut bewegt sich an der Außenwand des Krümmers zum Ausgang; seine Geschwindigkeit wird durch die Reibung zwischen Gut und Rohrwand reduziert, und es kann zu einer Ablösung des Gutstromes kommen, wenn die Schwerkraft größer ist als die auf den Gutstrom wirkende Zentrifugalkraft.

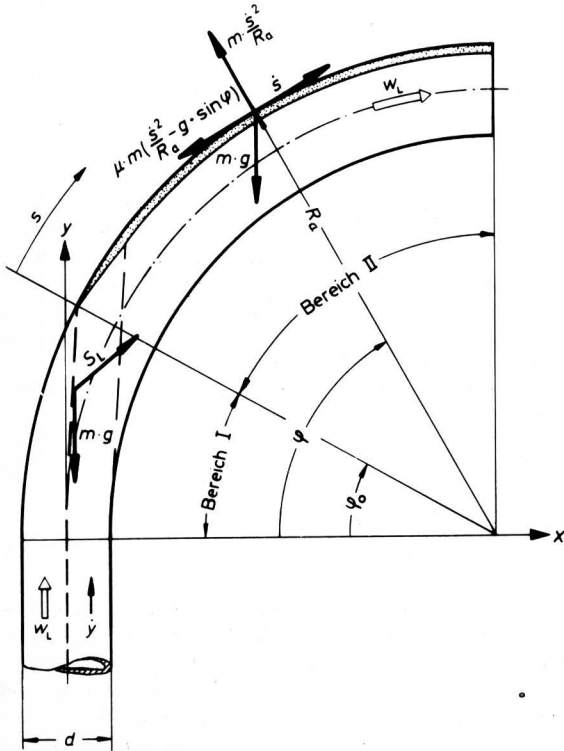


Bild 1. Bewegungsvorgänge und Kräfte im Krümmer.

Eine Aufnahme der Gutstrombewegung in einem 90°-Krümmer gibt Bild 2 wieder. Man erkennt deutlich die Zweiphasenströmung im Bereich vor dem Stoß mit einer gewissen Ablenkung in x-Richtung und die Trennung von Gut- und Luftstrom nach dem Stoß. Aufgrund der Abbremsung nimmt die Dicke des Gutstromes zu. Der dunkle Streifen an der Krümmerinnenwand ist ein Lichtschatten.

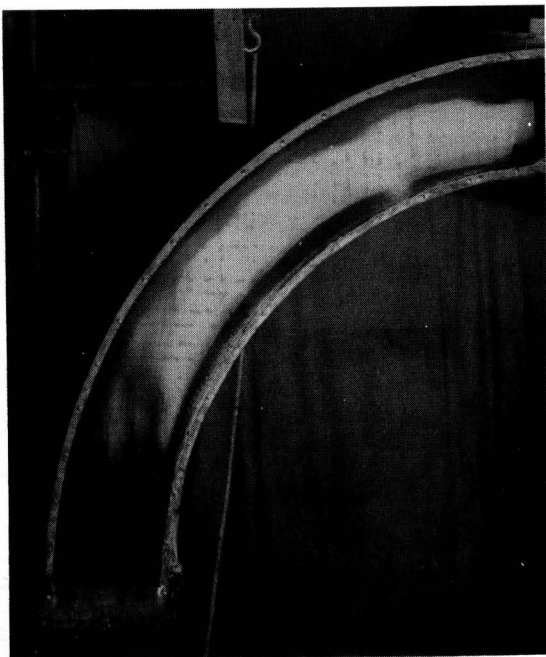


Bild 2. Aufnahme der Gutbewegung im Krümmer.

Um die Bewegungsgleichungen aufzustellen, müssen zwei Bereiche unterschieden werden. Im Bereich I sind Luft- und Gutströmung als Zweiphasenströmung anzusehen. Im Bereich II wird die Bewegung des Gutstromes getrennt von der Luftströmung betrachtet. Folgende Annahmen werden getroffen:

Für den Bereich I:

1. Die Luftgeschwindigkeit ist als mittlere Geschwindigkeit w_L gleichmäßig über den Querschnitt verteilt. Die Sekundärströmung wird vernachlässigt.
2. Der Gutstrom bewegt sich auf der Mittellinie im Vertikalrohr und trifft beim Winkel φ_0 auf die Krümmeraußenwand.
3. Auf ein Massenelement des Gutstromes wirken die Schwerkraft $m \cdot g$ und die Strömungskraft S_L .
4. Der vollplastische Stoß erfolgt zwischen Bereich I und II.

Für den Bereich II:

5. Der Gutstrom bewegt sich an der Außenwand.
6. Auf ein Massenelement wirken die Schwerkraft $m \cdot g$, die Zentrifugalkraft $m s^2 / R_a$ und die Reibkraft $\mu \cdot m [(\dot{s}^2 / R_a) - g \cdot \sin \varphi]$.
7. Der Einfluß der Luftströmung wird vernachlässigt. So beträgt z.B. bei einem Gutdurchsatz von 5 kg/s, einer Gutgeschwindigkeit von 10 m/s und einer Luftgeschwindigkeit von 15 m/s, bei einem Luftwiderstandsbeiwert von 0,1 an der Stelle $\varphi = 45^\circ$ das Verhältnis aus Reibungskraft zu Oberflächenwiderstand 80 : 1.
8. Wenn im Gutstrom die radiale Komponente der Schwerkraft die Zentrifugalkraft übersteigt, so löst sich der Gutstrom von der Außenwand. Zur Vereinfachung der Rechnung wird angenommen, daß sich der Gutstrom ohne Luftwiderstand bis zur Mittellinie des Krümmers weiterbewegt und erst dann vom Luftstrom erfaßt wird.

Die Strömungskraft wird zu $S_L = m g (w_{rel} / w_s)^2$ angenommen, wobei w_{rel} die Relativgeschwindigkeit zwischen Gut- und Luftstrom und w_s die Schwebegeschwindigkeit des Gutstromes bedeuten. Diese Beziehung gilt exakt nur für den Schwebestand, läßt sich aber mit guter Annäherung auch für die bei der Wurfförderung vorkommenden Geschwindigkeiten anwenden. Schwierigkeiten bereitet die Bestimmung der Schwebegeschwindigkeit von Gutströmen, die vom Gut selbst und der Gutkonzentration abhängt.

Im Bereich I wird die Gutbewegung in x- bzw. y-Richtung durch die Gleichungen (1) und (2) wiedergegeben:

$$x\text{-Richtung} \quad \ddot{x} = \frac{g}{w_s^2} (w_{Lx} - \dot{x}) w_{rel} \quad (1)$$

$$y\text{-Richtung} \quad \ddot{y} = \frac{g}{w_s^2} (w_{Ly} - \dot{y}) w_{rel} - g \quad (2)$$

Die Relativgeschwindigkeit w_{rel} wird aus

$$w_{rel} = \sqrt{(w_{Lx} - \dot{x})^2 + (w_{Ly} - \dot{y})^2}$$

bestimmt.

Die Gln. (1) und (2) stellen ein System von zwei gekoppelten nicht-linearen Differentialgleichungen dar, das z.B. nach dem Runge-Kutta-Verfahren gelöst werden kann. Für jeden Punkt müssen dabei die Komponenten der Luftgeschwindigkeit bestimmt werden.

Für den Bereich II sieht es einfacher aus: für die Gleitbewegung in tangentialer Richtung gilt Gl. (3), die analytisch gelöst werden kann, Gl. (4):

$$\dot{s} + g \cos \varphi + \mu [\dot{s}^2 / R_a - g \sin \varphi] = 0 \quad (3)$$

$$\dot{s}^2 = \frac{2 g R_a}{1 + 4 \mu^2} [(2 \mu^2 - 1) \sin \varphi - 3 \mu \cos \varphi] + C e^{-2 \mu \varphi} \quad (4)$$

Die Konstante C wird aus den Anfangsbedingungen ermittelt. An der Stelle φ_0 herrscht die tangentiale Geschwindigkeit \dot{s}_0 , die aus den Stoßgesetzen berechnet wird.

$$C = \frac{\dot{s}_0^2 - \frac{2gR_a}{1+4\mu^2} [(2\mu^2 - 1) \sin \varphi_0 - 3\mu \cos \varphi_0]}{e^{-2\mu\varphi_0}}$$

Als Bedingung für die Gleitbewegung gilt:

$$\dot{s}^2/R_a > g \sin \varphi \quad (5)$$

Sollte diese nicht mehr erfüllt sein, löst sich der Gutstrom von der Wand und vermischt sich nach kurzer Zeit wieder mit dem Luftstrom. Für diesen Zustand können dann die Gln. (1) und (2) angewendet werden.

Die Verhältnisse beim Stoß des Gutstromes an der Krümmersaußenwand werden in **Bild 3** erläutert: Unter einem Winkel α prallt das Gut mit der Geschwindigkeit w auf die Krümmersaußenwand und bewegt sich nach dem Stoß tangential mit der Geschwindigkeit w' weiter. Während des Stoßvorganges treten die Impulse I_t in tangentialer und I_n in normaler Richtung auf. Die Stoßgesetze für den vollplastischen Fall werden durch die Gln. (6) bis (8) ausgedrückt:

$$m(w_t - w'_t) = I_t \quad (6)$$

$$-m w_n = I_n \quad (7)$$

$$I_t = \mu I_n \quad (8)$$

Aus ihnen erhält man für die Geschwindigkeit w' die einfache Beziehung:

$$w' = w(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) \quad (9)$$

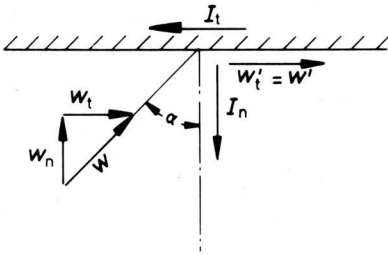


Bild 3. Geschwindigkeiten beim plastischen Stoß.

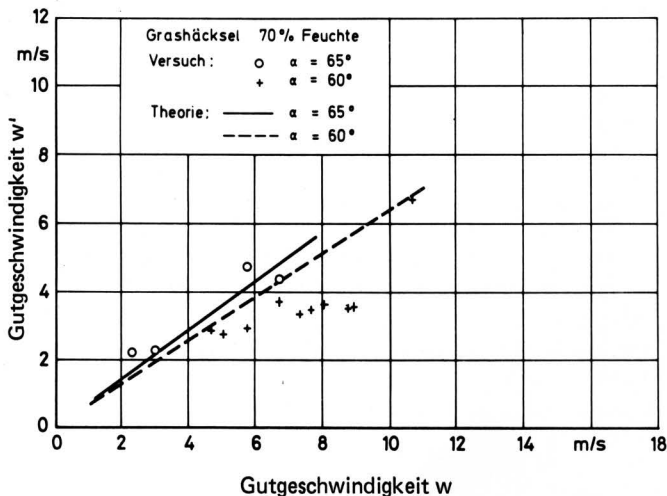


Bild 4. Überprüfung der Geschwindigkeiten beim Stoß.

In **Bild 4** werden die Werte nach Gl. (9) mit experimentell ermittelten Werten überprüft. Über der Gutgeschwindigkeit w ist die Geschwindigkeit w' aufgetragen. Als Gut wurde Grashäcksel mit einer Feuchte von 70 % verwendet. Für den Stoßwinkel $\alpha = 60^\circ$ liegen die gemessenen Werte unterhalb der aus der Theorie gewonnenen Geraden. Diese Abweichungen sind in der Meßmethode begründet, da die Geschwindigkeiten nicht direkt am Ort des Stoßes, sondern in einem gewissen Abstand davon gemessen wurden.

2.2 Krümmer nach Chancellor

Wie bereits erwähnt, hat *Chancellor* einen Krümmer mit einem geraden Einlauf vorgeschlagen, um die Stoßverluste möglichst gering zu halten. Einen solchen Krümmer zeigt **Bild 5**: unter einem Winkel α_0 , der 70° bis 85° betragen kann, ist der gerade Einlauf zur Horizontalen geneigt und wird soweit geführt, daß die innere Kante des Vertikalrohres auf gleicher Höhe ist wie das Ende der äußeren Krümmerwand im geraden Einlauf. An das gerade Einlaufstück schließt sich bis zum Winkel φ_1 ein Bogenstück mit kleinem Radius an, während das Ende durch ein Bogenstück mit großem Radius gebildet wird. Diese Aufteilung ergibt sich aus der Bewegungsgleichung (3). Durch Umformen dieser Gleichung erhält man Gl. (10), die die Abnahme des Geschwindigkeitsquadrates \dot{s}^2 mit dem Winkel φ angibt:

$$\frac{d(\dot{s}^2)}{d\varphi} = 2R_a g (\mu \sin \varphi - \cos \varphi) - 2\mu \dot{s}^2 \quad (10)$$

Bei kleinem Winkel φ ist der 1. Summand auf der rechten Seite negativ, d.h. damit die Summe möglichst klein bleibt, muß der Radius R_a klein gewählt werden. Von einem bestimmten Winkel φ_1 an wird der 1. Summand positiv, und man sollte einen großen Radius des Bogenstückes einsetzen. Der Umschlag von negativen zu positiven Werten liegt bei $\tan \varphi_1 = 1/\mu$ und ist damit abhängig vom Reibwert zwischen Gut und Krümmerwand.

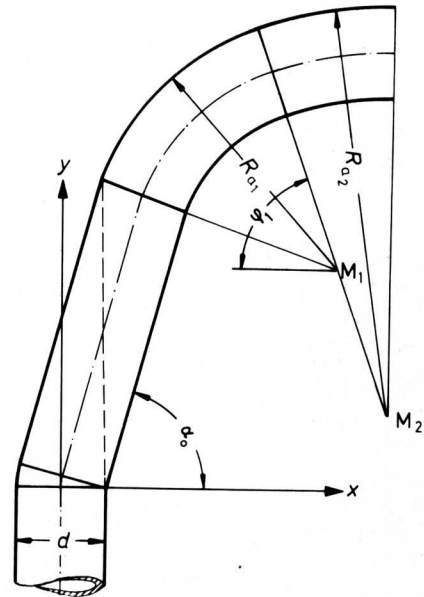


Bild 5. Krümmer nach *Chancellor* [8].

2.3 Ellipsenförmiger Krümmer

Als dritte Krümmerform wird eine Ellipse eingesetzt. Die große Halbachse a wird in y -Richtung, die kleine Halbachse b in x -Richtung gewählt. Durch Veränderung der Halbachsenlängen ist es möglich, eine Vielfalt von Krümmerformen zu erhalten, die vom Kreis (gleiche Halbachsenlängen) bis zu einer Form reichen, die einem steilen *Chancellor*-Krümmer ähnlich ist.

3. Ergebnisse der theoretischen Betrachtung

Im folgenden soll auf den Einfluß eingegangen werden, den die verschiedenen Parameter, wie Krümmerform, Luftgeschwindigkeit, Schwebegeschwindigkeit und Reibbeiwert des Gutes, auf den Geschwindigkeitsverlauf im Krümmer haben.

In Bild 6 ist für Krümmer mit Mittenradien von $R = 2 d$ bis $R = 8 d$ und für die drei Luftgeschwindigkeiten $w_L = 0$; 10 und 20 m/s die Gutaustrittsgeschwindigkeit w_2 über der Eintrittsgeschwindigkeit w_1 aufgetragen. Als weitere Einflußgrößen wurden gewählt: Schwebegeschwindigkeit des Gutes $w_s = 2,5$ und $w_s = 5,0$ m/s, Reibbeiwert $\mu = 0,4$ und Rohrdurchmesser $d = 0,2$ m.

Für die Luftgeschwindigkeit $w_L = 0$ m/s sind die Verhältnisse sehr ungünstig. Hier sinkt bei $w_s = 2,5$ m/s und Mittenradien von $R = 6 d$ und $R = 8 d$ die Gutgeschwindigkeit bereits bei einer Anfangsgeschwindigkeit von $w_1 = 14$ m/s auf Null. Bei $w_s = 5,0$ m/s treten bei zu geringen Eintrittsgeschwindigkeiten ebenfalls Verstopfungen im Krümmer auf. Für die Luftgeschwindigkeit $w_L = 0$ m/s eignet sich am besten der Krümmer $R = 2 d$.

Bei der Luftgeschwindigkeit $w_L = 10$ m/s ergeben sich ganz andere Verhältnisse. Die Krümmer verstopfen bei $w_s = 2,5$ m/s auch bei kleinen Eintrittsgeschwindigkeiten nicht mehr, bei $w_s = 5,0$ m/s nur noch für die Krümmer $R = 6 d$ und $R = 8 d$. Hier fällt das Gut bei einer bestimmten Eintrittsgeschwindigkeit auf die Krümmerinnenwand, so daß man mit Verstopfungen rechnen muß. Für $R = 4 d$ löst sich das Gut ebenfalls von der Krümmeraußenwand, wird

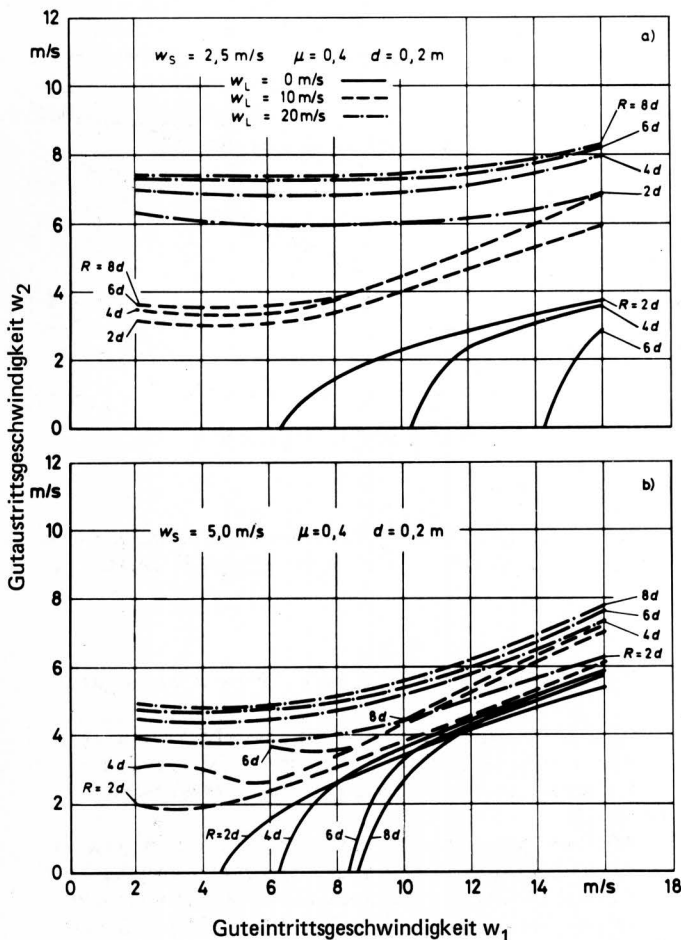


Bild 6. Austrittsgeschwindigkeit w_2 als Funktion der Eintrittsgeschwindigkeit w_1 für unterschiedliche Luftgeschwindigkeiten und Krümmungsradien ($\mu = 0,4$; $d = 0,2$ m; oben: $w_s = 2,5$ m/s; unten: $w_s = 5,0$ m/s).

aber vom Luftstrom mitgerissen, so daß mit kleiner werdender Eintrittsgeschwindigkeit die Austrittsgeschwindigkeit ansteigt. Für die Krümmer $R = 4 d$ bis $R = 8 d$ ist bei höheren Eintrittsgeschwindigkeiten kaum ein Unterschied festzustellen.

Ganz ähnlich verhält es sich bei der Luftgeschwindigkeit $w_L = 20$ m/s. Ab $R = 6 d$ ist mit größer werdendem Mittenradius kaum noch eine höhere Austrittsgeschwindigkeit zu erreichen.

Die für die hier gewählten Einflußgrößen geltenden Verhältnisse erhält man auch für andere Reibbeiwerte und Rohrdurchmesser. In Bild 7 sind die Ergebnisse für unterschiedliche Reibbeiwerte μ dargestellt. Da das Gut bei kleinem Reibbeiwert weniger abgebremst wird, herrschen hier höhere Austrittsgeschwindigkeiten als bei großem Reibbeiwert. Die für $\mu = 0,6$ (Bild 7 unten) bei niedrigen Eintrittsgeschwindigkeiten auftretenden höheren Austrittsgeschwindigkeiten für $w_L = 10$ m/s und $R = 8 d$ ergeben sich wieder aus der Ablösung des Gutes von der Krümmeraußenwand. Man beachte, daß bei den Werten $\mu = 0,6$ und $w_s = 2,5$ m/s, die leichtem, feuchtem Häckselgut entsprechen (Bild 7 unten), die Gutgeschwindigkeit im Krümmer bei Luftgeschwindigkeiten um 10 m/s auf ein Drittel des Anfangswertes abgebremst wird. Auch beim Rohrdurchmesser $d = 0,3$ m liegen ähnliche Verhältnisse vor, Bild 8. Hier kann man bei $w_L = 0$ m/s Krümmer mit Mittenradien größer 4 d nicht mehr einsetzen.

Für einen Krümmer nach Chancellor lohnt es nicht, zwei verschiedene Mittenradien zu verwenden, da bei höheren Luftgeschwindigkeiten kaum Unterschiede in der Austrittsgeschwindigkeit auftreten, Bild 9 oben. Auch die Neigung des geraden Einlaufstückes ist

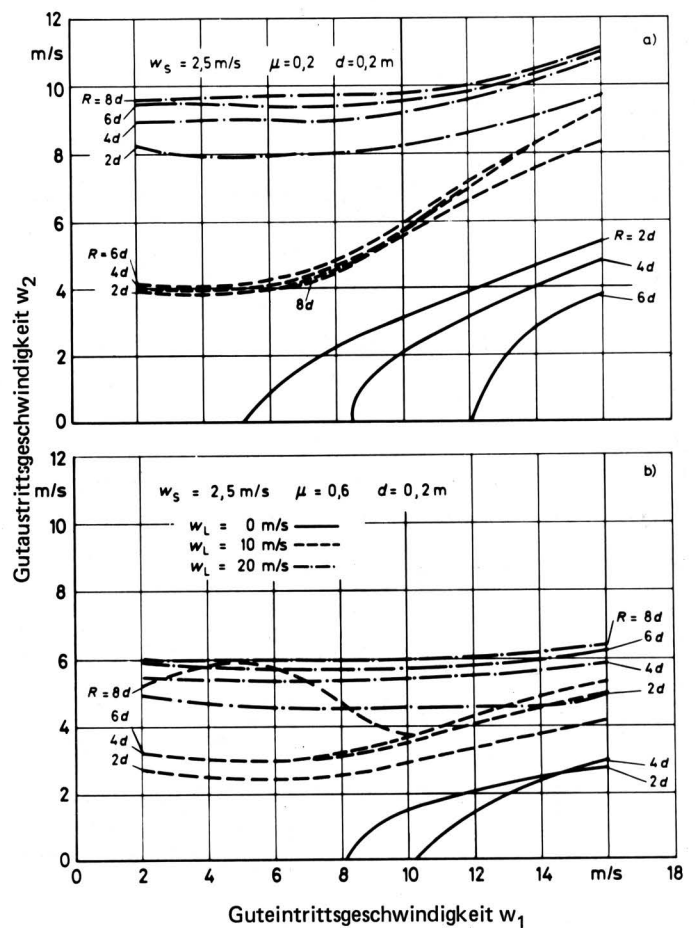


Bild 7. Austrittsgeschwindigkeit w_2 als Funktion der Eintrittsgeschwindigkeit w_1 für unterschiedliche Luftgeschwindigkeiten und Krümmungsradien ($w_s = 2,5$ m/s; $d = 0,2$ m; oben: $\mu = 0,2$; unten: $\mu = 0,6$).

bei höheren Luftgeschwindigkeiten ohne wesentlichen Einfluß auf die Austrittsgeschwindigkeit, (Bild 9 unten). Aus Bild 10, auf dem verschiedene Krümmern mit konstantem Krümmungsradius mit einem Krümmer nach Chancellor ($\alpha_0 = 70^\circ$) verglichen werden, geht hervor, daß es sich kaum lohnt, einen solchen zu verwenden.

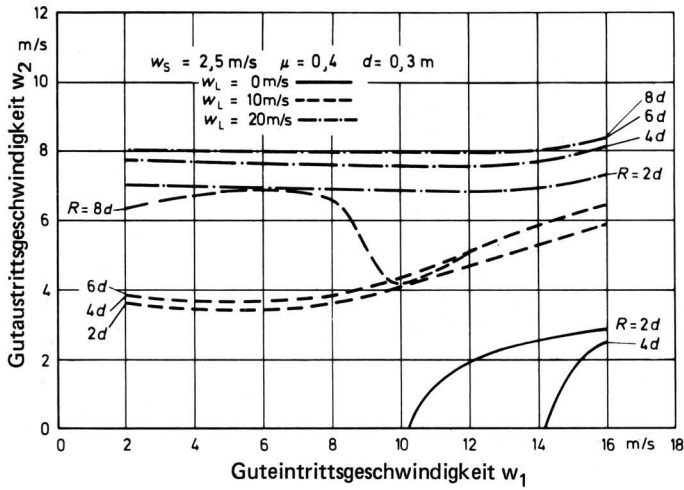


Bild 8. Austrittsgeschwindigkeit w_2 als Funktion der Eintrittsgeschwindigkeit w_1 für unterschiedliche Luftgeschwindigkeiten und Krümmungsradien ($w_s = 2,5 \text{ m/s}$; $\mu = 0,4$; $d = 0,3 \text{ m}$).

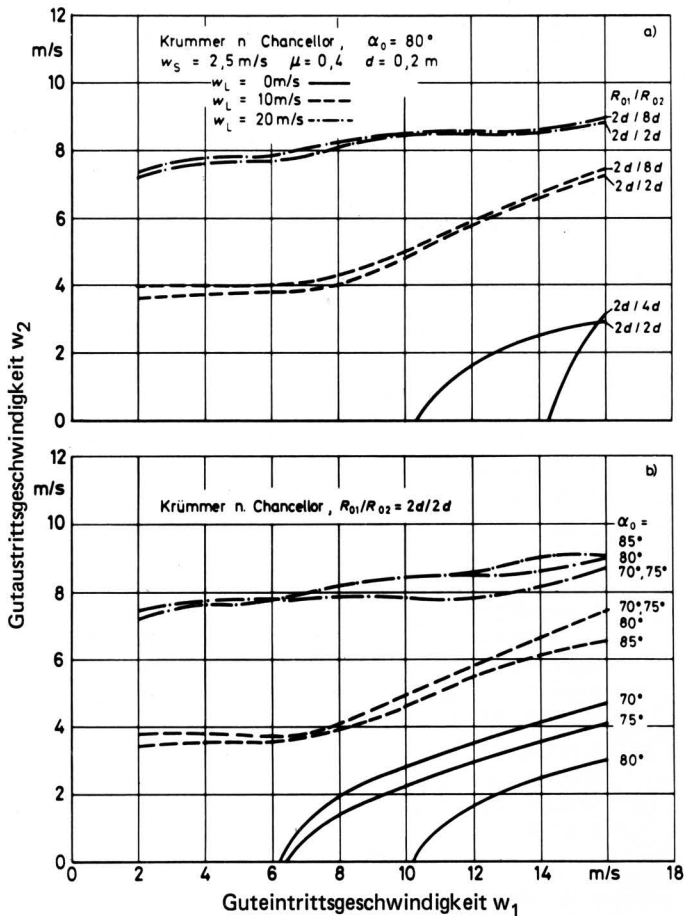


Bild 9. Austrittsgeschwindigkeit bei verschiedener Ausbildung des Krümmers nach Chancellor.

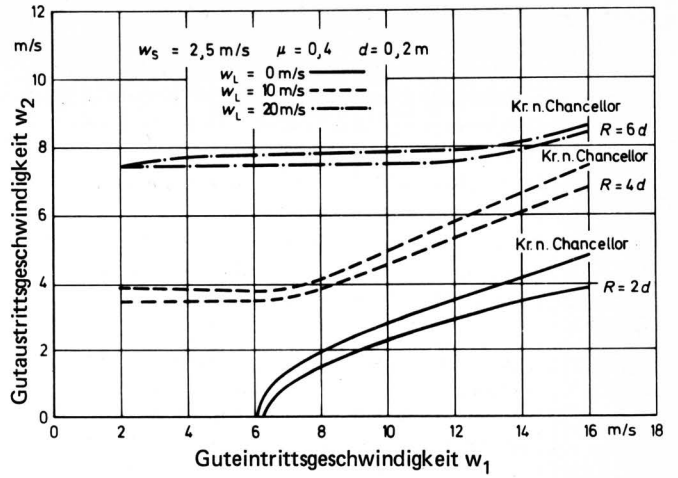


Bild 10. Austrittsgeschwindigkeit für einen Krümmer mit konstantem Krümmungsradius und einen Krümmer nach Chancellor.

Nach Bild 11 bringt auch ein ellipsenförmiger Krümmer gegenüber einem mit konstantem Krümmungsradius bei höheren Luftgeschwindigkeiten keine Verbesserungen.

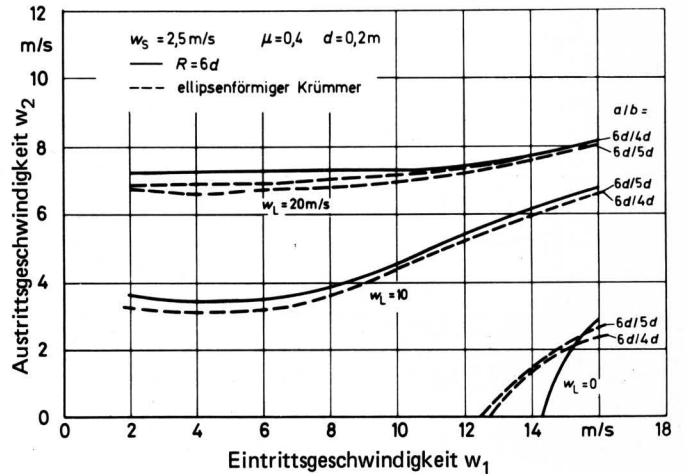


Bild 11. Austrittsgeschwindigkeit für einen Krümmer mit konstantem Krümmungsradius und einen ellipsenförmigen Krümmer.

4. Experimentelle Bestimmung der Gutgeschwindigkeit

Als Meßmethode wurde die radiometrische gewählt, die bereits in einer früheren Arbeit beschrieben worden ist [10], so daß hier nicht näher auf sie und den Versuchsaufbau eingegangen zu werden braucht.

In Bild 12 sind für verschiedene Güter und Krümmern die gemessenen Gutgeschwindigkeiten den theoretisch ermittelten gegenübergestellt. Bild 12 zeigt oben die über der Eintrittsgeschwindigkeit w_1 aufgetragene Austrittsgeschwindigkeit w_2 für Maishäcksel von 55 % Feuchtigkeit ($w_s = 3,0 \text{ m/s}$, $\mu = 0,5$) und einen 90° -Krümmer mit einem Mittenradius gleich dem sechsfachen Rohrdurchmesser und einem quadratischen Querschnitt. Die durchgezogenen Kurven entsprechen der Theorie für die angegebenen Luftgeschwindigkeiten. Trotz der Streuung der Meßwerte kann man von einer guten Übereinstimmung sprechen. Für die verschiedenen Gutdurchsätze haben sich keine abweichenden Meßergebnisse ergeben.

In Bild 12 sind in der Mitte die Meßergebnisse für Grashäcksel von 57 % Feuchtigkeit ($w_s = 2,8 \text{ m/s}$, $\mu = 0,4$) und einen Krümmer mit einem Mittenradius $R = 3 \text{ d}$ und einem kreisförmigen Querschnitt wiedergegeben. Als drittes Beispiel sind, Bild 12 unten, die Ergebnisse für die Förderung von Grashäcksel von 70 % Feuchtigkeit ($w_s = 3,7 \text{ m/s}$, $\mu = 0,47$) durch einen Krümmer nach *Chancellor* ($R_{01} = R_{02} = 3 \text{ d}$) dargestellt. Eine gute Übereinstimmung ist hier ebenfalls festzustellen.

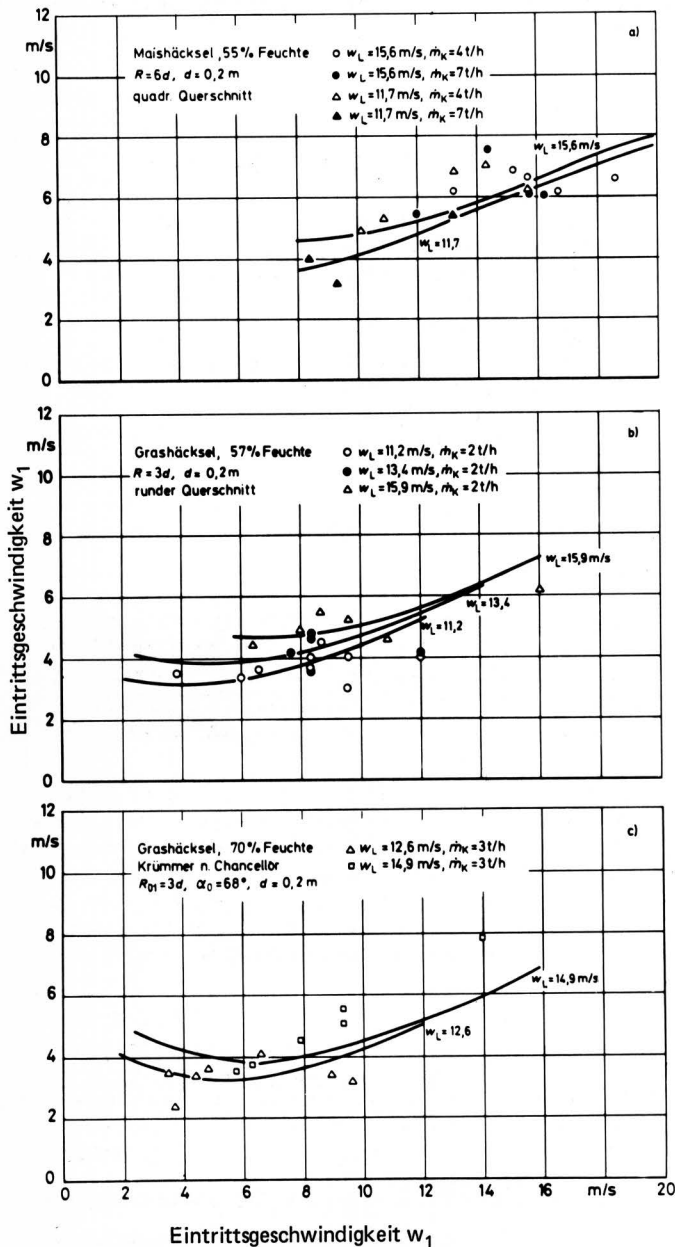


Bild 12. Vergleich der theoretisch gewonnenen Daten (durchgezogene Kurven) mit den experimentell ermittelten Austrittsgeschwindigkeiten.

5. Zusammenfassung

Die Luftgeschwindigkeit erweist sich als einflußreichster Parameter bei der Berechnung des Geschwindigkeitsverlustes in Krümmern unterschiedlicher Form. Daneben haben noch die Schwebegeschwindigkeit und der Reibbeiwert eine wesentliche Bedeutung. Will man Verstopfungen im Förderrohr vermeiden, so sollte man für die Förderung von Häckselgut mit Schwebegeschwindigkeiten bis 5 m/s eine Luftgeschwindigkeit von ungefähr 10 m/s wählen. Für Güter mit größerer Schwebegeschwindigkeit ist eine Luftgeschwindigkeit von 20 m/s zu empfehlen. Die hier gezeigten Ergebnisse stimmen also mit denen für die vertikale Förderung darin überein, daß es wirtschaftlich sinnvoller ist, für größere Höhen eine Wurfförderung nur mit Unterstützung einer Luftströmung vorzunehmen. Es sei hier auf den Vorschlag von *Gluth* [5] hingewiesen, ein Wurfgebläse mit einem "pneumatischen" Gebläse zu kombinieren, um auch bei höheren Gutdurchsätzen, wenn die Luftströmung im Wurfgebläse selbst behindert wird, eine ausreichende Luftströmung zu erhalten.

Die Form des Krümmers hat nur einen untergeordneten Einfluß; es ist ausreichend, Krümmer mit konstantem Krümmungsradius einzusetzen. Bei höheren Luftgeschwindigkeiten sollten Krümmer mit Krümmungsradien von $R = 6 \text{ d}$ bis $R = 8 \text{ d}$ verwendet werden, da sie den geringsten Geschwindigkeitsverlust bzw. die größte Geschwindigkeitszunahme aufweisen. Bei fehlender oder sehr geringer Luftströmung sind dagegen Krümmer mit einem Krümmungsradius $R = 2 \text{ d}$ günstiger. Hier ist besonders für feine Teilchen mit niedriger Schwebegeschwindigkeit die Länge der Verzögerungsstrecke entscheidend für den Geschwindigkeitsverlust.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] *Kampf, G.*: Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Wurfgebläsen. VDI-Forschungsheft 466, Düsseldorf: VDI-Verlag 1958.
- [2] *Chancellor, W.J.*: A study of the influences of particle movement on the energy losses in an impeller blower. Agric. Engng. vol. 41 (1960) Nr. 2, S. 92/94.
- [3] *Totten, D.S.*: Mathematical description of particle path in the forage blower. Transactions of the ASAE vol. 4 (1961) S. 219/21.
- [4] *Totten, D.S. u. W.F. Millier*: Energy and particle path analysis: forage blower and vertical pipe. Transactions of the ASAE vol. 9 (1966) Nr. 5, S. 629/36 und 640.
- [5] *Gluth, M.*: Untersuchungen zur Wurfgebläseförderung. VDI-Forschungsheft 544, Düsseldorf: VDI-Verlag 1971.
- [6] *Vavra, A.*: Beitrag zur Theorie der Wurfgebläse-Kinematik des Transportprozesses. Zemedelska technika 14 (1968) H. 5, S. 259/78.
- [7] *Chomenko, Ju. V.*: Untersuchung der Vorgänge bei der Gebläse- und Wurfförderung von Material. TIB Hannover S Lan R 700 / Z Z 1446 (60), S. 45/54.
- [8] *Chancellor, W.J. u. G.E. Laduke*: Analysis of forage flow in a deflector elbow. Agric. Engng. vol. 41 (1960) Nr. 4, S. 234/36 und 240.
- [9] *Fiser, Z.*: Gebläsebefüllung von Hochsilos durch ein Mittelrohr. Zemedelska technika 15 (1969) S. 433/46.
- [10] *Petersen, H.*: Messung der Teilchengeschwindigkeit in pneumatischen und in Wurfförderanlagen mit Hilfe von Isotopen. Grndl. Landtechnik Bd. 24 (1974) Nr. 2, S. 64/67.