

Wahl des Rohrdurchmessers für pneumatische Flugförderanlagen im Druckbetrieb

Von Hinrich Petersen, Braunschweig*)

DK 621.867.82

Für die Berechnung von pneumatischen Förderanlagen gibt es eine Vielzahl von Methoden, von denen aber nur wenige genauere Aussagen über die Wahl des Rohrdurchmessers machen. Aufbauend auf dem Scheinlängenverfahren von Segler, werden hinsichtlich der Größe der Gebläseantriebsleistung für pneumatische Flugförderanlagen von Weizen im Niederdruckbereich ($\Delta p < 100$ mbar) optimale Rohrdurchmesser berechnet. Für verschiedene Gebläsedrehzahlen, Förderströme und Scheinlängen werden die Ergebnisse in Diagrammform dargestellt.

1. Einleitung

Trotz einer Vielzahl von Veröffentlichungen über Berechnungsmethoden für pneumatische Förderanlagen liegen nur wenige Aussagen über die Wahl des Rohrdurchmessers vor. In vielen Fällen wird bei gegebenem Gutdurchsatz der Rohrdurchmesser bzw. die Gutbeladung als Erfahrungswert [1 bis 6] gewählt. Die Größe des Rohrdurchmessers bzw. der Gutbeladung ist aber von entscheidender Bedeutung für die Höhe des Energiebedarfs. Mit kleiner werdendem Rohrdurchmesser steigt der Energiebedarf infolge der erhöhten Luftreibung an; aber auch bei größerem Rohrdurchmesser nimmt der Energiebedarf aufgrund der Förderung eines höheren Luftvolumenstromes zu. Es muß also einen Rohrdurchmesser geben, bei dem der Energiebedarf zu einem Minimum wird.

Auf diese Verhältnisse hat bereits Nagel [7] hingewiesen. Kocsanyi [8] und Weber [9] haben die Wahl des Rohrdurchmessers bzw. der Gutbeladung μ als Funktion des Energiebedarfs bereits in ihre Berechnungsmethoden eingeführt. Aufbauend auf dem Scheinlängenverfahren von Segler [10, 11], werden in der vorliegenden Arbeit für Flugförderanlagen von Weizen im Niederdruckbereich ($\Delta p < 100$ mbar) hinsichtlich der Höhe der Gebläseantriebsleistung optimale Rohrdurchmesser angegeben. Einschränkend muß hier gesagt werden, daß das Scheinlängenverfahren von Segler, ähnlich wie das von Spiwakowski [6] für größere Gutdurchsätze, keine genaue Methode zur Dimensionierung pneumatischer Förderanlagen darstellt, daß es aber im Gegensatz zu vielen anderen Berechnungsmethoden sehr einfach und schnell übersichtliche Daten zur Dimensionierung liefert. Soll eine pneumatische Förderanlage genauer berechnet werden, sei auf die Arbeiten von Weber [9], Muschelknautz/Wojahn [12] oder Welschof [13] verwiesen.

2. Das Verfahren von Segler

Dieses Verfahren ist ausführlich beschrieben in [10, 11] und soll hier auch nicht in allen Einzelheiten wiederholt werden. Um das Verständnis zu erleichtern, seien aber die wichtigsten Ergebnisse noch einmal zusammengestellt.

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

2.1 Stopfgrenze

Aus der sog. Stopfgrenze, das ist die Luftgeschwindigkeit, bei der man erste Ablagerungen im Förderrohr beobachtet, wird die mittlere Geschwindigkeit des Luftstromes nach Gleichung (1) bestimmt.

$$w = 1,5 + 20,7 \dot{m}_K^{0,067} \quad (1)$$

Darin bedeuten:

w die Luftgeschwindigkeit in m/s
 \dot{m}_K der gegebene Gutdurchsatz in kg/s.

Der Summand 1,5 ist ein Sicherheitszuschlag und gewährleistet, daß die Anlage im sicheren Gebiet oberhalb der Stopfgefahr betrieben wird. Gleichung (1) ist gültig bis $\dot{m}_K = 2,5$ kg/s. Die Stopfgrenze ist in Bild 1 neben der Beschädigungsgrenze für Weizen wiedergegeben.

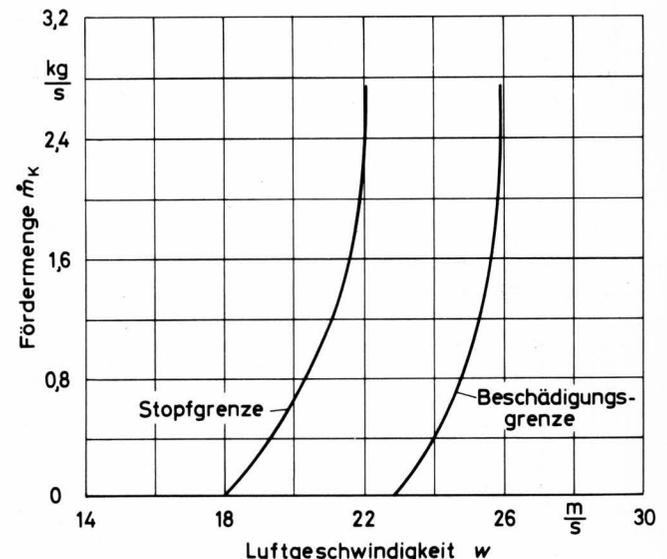


Bild 1. Stopf- und Beschädigungsgrenze für die Förderung von Weizen nach Segler [10].

2.2 Gerade Rohrstrecke

In Anlehnung an die Berechnung des statischen Druckabfalls infolge der Rohrreibung für inkompressible Strömungen verwendet Segler für den statischen Druckabfall der Zweiphasenströmung Feststoff – Luft im geraden Rohr die Gleichung:

$$\Delta p = \lambda_g \frac{1}{d_R} \frac{\rho}{2} w^2 \quad (2)$$

mit:

Δp statischer Druckabfall der Zweiphasenströmung,
 λ_g Widerstandsbeiwert der Zweiphasenströmung,
 l Förderrohrlänge,
 d_R Förderrohrdurchmesser,
 ρ Dichte der Luft und
 w mittlere Geschwindigkeit des Luftstromes im Förderrohr.

Segler hat den Widerstandsbeiwert λ_g für die Förderung von Weizen im geraden waagerechten Rohr aus umfangreichen Messungen

in Abhängigkeit von Rohrdurchmesser, Luftgeschwindigkeit und Gutdurchsatz gewonnen. Der Widerstandsbeiwert der geraden senkrechten Rohrströmung wird als doppelt so groß wie der der waagerechten Rohrströmung angenommen. In Bild 2 ist Gleichung (2) für die Förderung von Weizen im geraden waagerechten Rohr bei einer angenommenen Luftdichte von $\rho = 1,22 \text{ kg/m}^3$ bereits ausgewertet worden. Über der Luftgeschwindigkeit w ist der spezifische statische Druckabfall $\Delta p/l_s$ für verschiedene Rohrdurchmesser mit dem Gutdurchsatz \dot{m}_k als Parameter aufgetragen. Die Größe l_s ist die sog. Scheinrohrlänge und für die gerade waagerechte Förderung gleich der gegebenen Rohrlänge. Laut Defini-

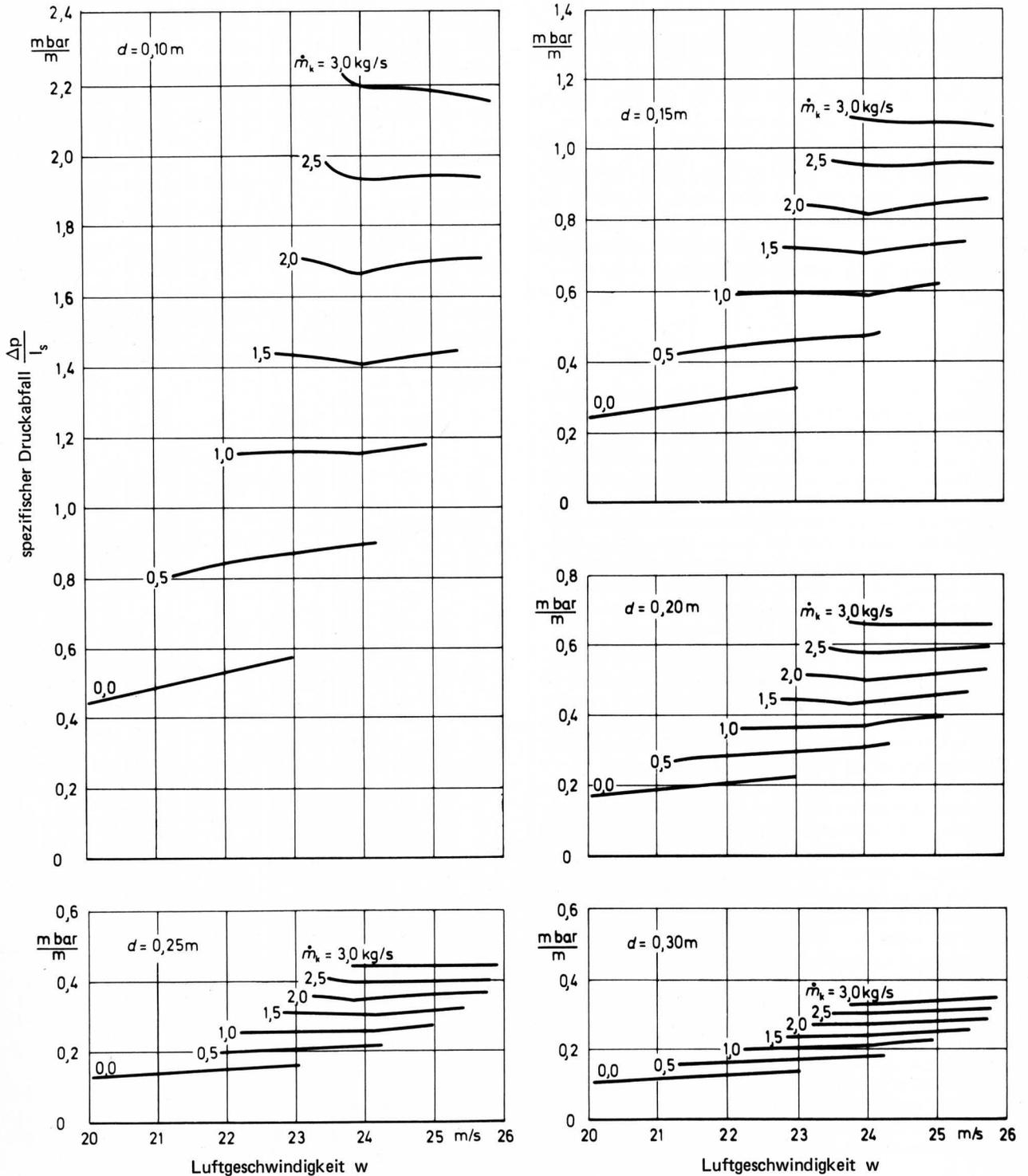


Bild 2. Spezifischer Druckabfall $\Delta p/l_s$ in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit für verschiedene Rohrdurchmesser und Fördermengen.

tion ist die Scheinrohlänge eines Fördervorganges oder einer Förderstrecke gleich der Länge einer geraden waagerechten Rohrstrecke im Beharrungszustand, die bei gleichem Förderzustand (Luftgeschwindigkeit, Gutdurchsatz) den gleichen Druckabfall aufweist. Damit ist die Scheinrohlänge der senkrechten Rohrstrecke doppelt so groß wie die aus der Förderanlage gegebene, da der Widerstandsbeiwert als doppelt so groß wie der der waagerechten Rohrstrecke angenommen wird.

2.3 Gutbeschleunigung, Rohrkrümmer, Austrittsverlust

Für die Beschleunigung des Gutes hinter der Eingabeschleuse gibt Segler eine Scheinlänge l_{sb} an, die, unabhängig vom Rohrdurchmesser, nur vom Gutdurchsatz \dot{m}_K abhängig ist, Bild 3. Diese Angaben gelten für Luftgeschwindigkeiten von $w = 22 \text{ m/s}$. Für höhere Luftgeschwindigkeiten sind die Scheinlängen etwas niedriger, man kann aber durchaus mit den in Bild 3 angegebenen Werten rechnen.

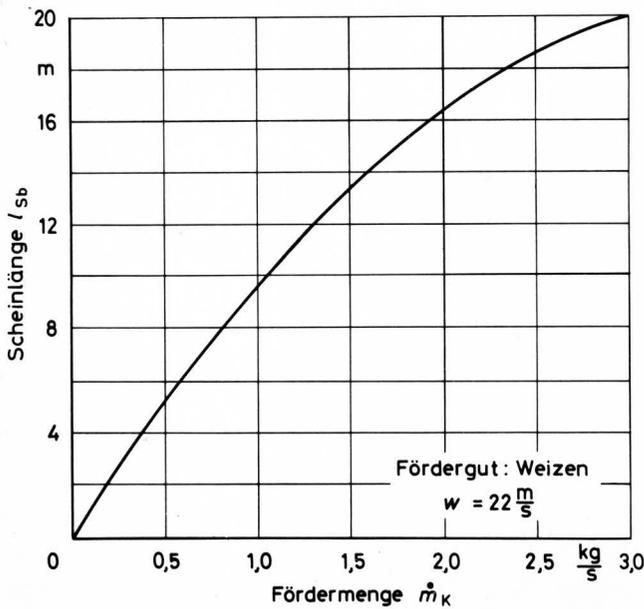


Bild 3. Druckabfall infolge der Gutbeschleunigung ausgedrückt als Scheinlänge l_{sb} nach Segler [11].

Für den 90°-Krümmer ist in Bild 4 ebenfalls über dem Gutdurchsatz \dot{m}_K die Scheinlänge l_{skr} für drei verschiedene Rohrdurchmesser aufgetragen. Der mittlere Radius der Krümmer sollte sich da-

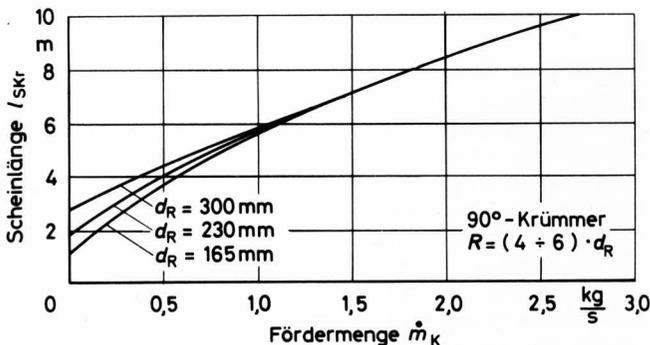


Bild 4. Druckabfall in 90°-Krümmern bei verschiedenen Rohrdurchmessern und Fördermengen ausgedrückt als Scheinlänge l_{skr} nach Segler [11].

bei in den Grenzen $R = (4 \div 6) d_R$ bewegen. Wird das Gut am Ende der Leitung ins Freie geblasen, so entsteht ein Austrittsverlust, dessen Scheinlänge l_{sa} von Segler mit 1 m angegeben wird. Für Fliehkraftabscheider sind keine Angaben über die Scheinlänge vorhanden. Hier muß man aus dem bekannten oder geschätzten Druckabfall und einem geschätzten Rohrdurchmesser nach Gleichung (2) die Scheinlänge berechnen. Die Summe der Einzelscheinlängen ergibt dann die Gesamtscheinlänge der Förderanlage.

3. Optimaler Rohrdurchmesser

Die Antriebsleistung eines Radialgebläses für eine Druckanlage, bei der die Kompressibilität der Förderluft nicht beachtet werden muß ($\Delta p < 100 \text{ mbar}$), ergibt sich aus:

$$N = \Delta p_g \dot{V} / \eta \quad (3)$$

mit:

- \dot{V} Luftvolumenstrom in der Förderleitung,
- Δp_g Gesamtdruckabfall und
- η Wirkungsgrad des Gebläses.

Der Gesamtdruckabfall setzt sich zusammen aus dem statischen und dem dynamischen Druckanteil

$$\Delta p_g = \Delta p + p_d \quad (4)$$

Für den Wirkungsgrad η gibt Eck [14] in Abhängigkeit von der Schnellaufzahl σ des Gebläses Optimalwerte an, die in Bild 5 wiedergegeben sind. Die Schnellaufzahl wird dabei nach folgender Gleichung ermittelt:

$$\sigma = \frac{1}{28,5} \dot{V}^{1/2} \frac{\Delta p_g}{\rho}^{-3/4} n \quad (5)$$

In diese Zahlenwertgleichung sind einzusetzen

- der Volumenstrom \dot{V} in m^3/s ,
- die Größe $\Delta p_g / \rho$ in m^2/s^2 und
- die zu wählende Gebläsezahl n in min^{-1} .

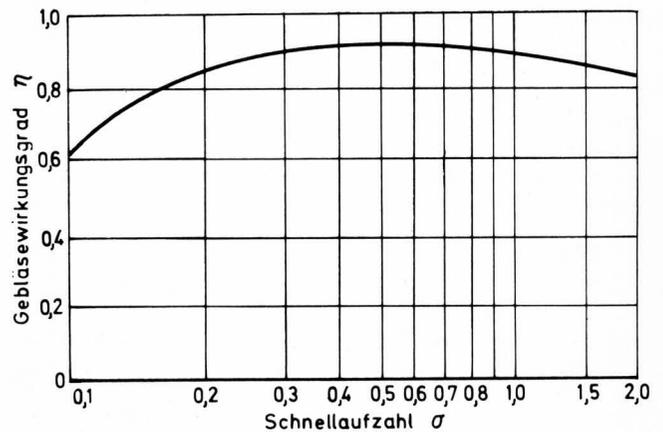


Bild 5. Optimaler Gebläsewirkungsgrad η über der Schnellaufzahl σ nach Eck [14].

Soll nun für eine projektierte Förderanlage der Rohrdurchmesser bestimmt werden, so wird zuerst die Scheinrohlänge dieser Anlage festgestellt und für verschiedene Rohrdurchmesser die Gebläseantriebsleistung N berechnet. Für ein bestimmtes gewähltes Beispiel ergibt sich dabei der in Bild 6 gezeigte Verlauf der Leistung N über dem Rohrdurchmesser. Wie bereits erwähnt, nimmt

die Antriebsleistung sowohl bei kleiner wie auch bei größer werdendem Rohrdurchmesser zu und weist bei einem bestimmten Wert ein Minimum auf. Dieser Wert ist der hinsichtlich der Größe der Antriebsleistung optimale Rohrdurchmesser, und der Rohrdurchmesser der Anlage sollte daher möglichst in der Nähe dieses Wertes gewählt werden.

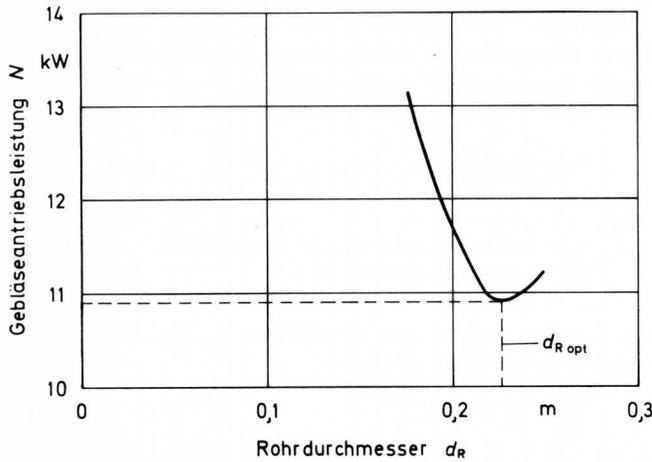


Bild 6. Gebläseantriebsleistung N als Funktion des Rohrdurchmessers d_R für ein bestimmtes gewähltes Beispiel.

Mit Hilfe einer digitalen Rechenanlage wurde der optimale Rohrdurchmesser für verschiedene Scheinrohrängen, Gutdurchsätze und Gebläsedrehzahlen errechnet. Für drei verschiedene Gebläsedrehzahlen sind die Ergebnisse in Bild 7 in Abhängigkeit von der Scheinlänge l_s mit dem Gutstrom \dot{m}_K als Parameter wiedergegeben. Ist die Scheinlänge der Anlage bestimmt, so läßt sich mit den Diagrammen für einen bestimmten Gutstrom und eine gewählte Gebläsedrehzahl der optimale Rohrdurchmesser sehr schnell ermitteln. In Bild 8 ist für die Gebläsedrehzahl $n = 4000 \text{ min}^{-1}$ die Antriebsleistung N über der Scheinlänge l_s mit dem Gutstrom \dot{m}_K als Parameter aufgetragen. Für die beiden anderen Drehzahlen ($n = 3000 \text{ min}^{-1}$; $n = 5000 \text{ min}^{-1}$) weichen die Werte kaum von den hier angegebenen ab.

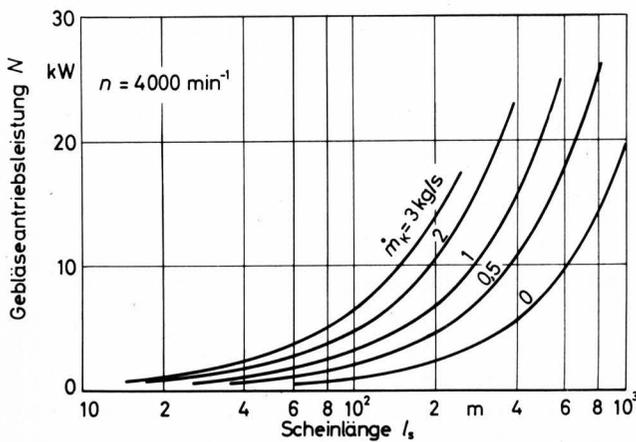


Bild 8. Gebläseantriebsleistung N in Abhängigkeit von der Scheinlänge l_s bei einer Gebläsedrehzahl $n = 4000 \text{ min}^{-1}$ und für verschiedene Fördermengen.

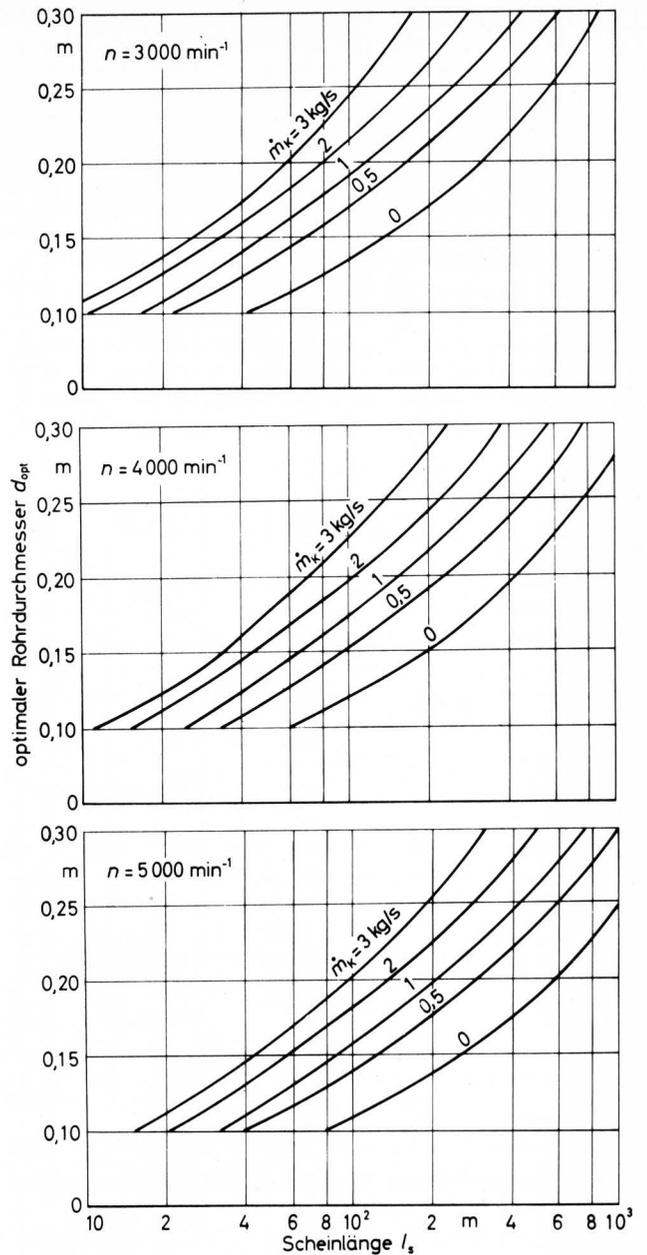


Bild 7. Optimaler Rohrdurchmesser d_{opt} in Abhängigkeit von der Scheinlänge l_s für verschiedene Gebläsedrehzahlen und Fördermengen.

4. Zusammenfassung

Die Wahl des Rohrdurchmessers einer pneumatischen Förderanlage ist von entscheidender Bedeutung für die Größe der Gebläseantriebsleistung. Es läßt sich ein Rohrdurchmesser finden, bei dem die Antriebsleistung zu einem Minimum wird. Nach dem Scheinlängenverfahren von Segler ist der hinsichtlich der Größe der Antriebsleistung optimale Rohrdurchmesser einer pneumatischen Druckförderanlage von Weizen im Niederdruckbereich ($\Delta p < 100 \text{ mbar}$) für verschiedene Scheinlängen, Gutdurchsätze und Gebläsedrehzahlen ermittelt und in Diagrammen dargestellt worden. Mit ihrer Hilfe läßt sich sehr schnell bei gegebenem Gutdurchsatz, bekannter Förderstrecke und einer gewählten Gebläsedrehzahl der Rohrdurchmesser der Anlage bestimmen. Bedingt durch das Scheinlängenverfahren, sind die Angaben nicht sehr genau, liefern aber übersichtliche Daten zur Dimensionierung der Anlage.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] *Krause, F.*: Berechnung pneumatischer Flugförderanlagen für elastische, körnige Fördergüter in der Praxis. Hebezeuge und Fördermittel 7 (1967) H. 4, S. 99/103.
- [2] *Krause, F.*: Beispiel für die Berechnung einer pneumatischen Förderanlage für Weizen nach neuen Berechnungsverfahren. Hebezeuge und Fördermittel 7 (1967) H. 5, S. 149/52.
- [3] ● *Stoess, H.A.*: Pneumatic Conveying. New York, London, Toronto: Wiley Interscience 1970.
- [4] *Müller, W.*: Zur Berechnung von pneumatischen Förderanlagen mit niedrigem Betriebsdruck. Fördern und Heben 17 (1967) Nr. 8, S. 442/48.
- [5] ● *Pajer, G. u. F. Kurth*: Stetigförderer. Berlin: VEB-Verlag Technik 1967.
- [6] ● *Spiwakowski, A.O. u. W.K. Djatschkow*: Förderanlagen. Braunschweig: Vieweg 1959.
- [7] *Nagel, R.*: Das pneumatische Fördern, seine Grenzen und sein Energieverbrauch. Staub-Reinhaltung-Luft 27 (1967) Nr. 2, S. 70/76.
- [8] *Kocsanyi, L. u. G. Vygazo*: Die Bemessung pneumatischer Transportleitungen. Energietechnik 6 (1956) H. 11, S. 496/500 u. H. 12, S. 547/52.
- [9] ● *Weber, M.*: Strömungsfördertechnik. Mainz: Krausskopf 1974.
- [10] *Segler, G.*: Untersuchungen an Körnergebläsen und Grundlagen für ihre Berechnung. Diss. TH München 1934.
- [11] ● *Segler, G.*: Pneumatic Grain Conveying. Eigenverlag Braunschweig 1951.
- [12] ● *Muschelknautz, E. u. H. Wofahn*: "Fördern" in Ullmann's Encyklopädie der technischen Chemie, Bd. 3. Weinheim: Verlag Chemie 1973.
- [13] *Welschhof, G.*: Pneumatische Förderung bei großen Fördergutkonzentrationen. VDI-Forschungsheft 492. Düsseldorf: VDI-Verlag 1962.
- [14] ● *Eck, B.*: Ventilatoren. Berlin, Heidelberg: Springer 1971.

Wirtschaftliche und technische Aspekte der Kornverlustfassung am Mähdrescher

Von Ewald Graeber, Gottmadingen*)

DK 631.354.2:62 - 53

Die Körnerverluste spielen bei der Erntebergung mit dem Mähdrescher eine wichtige Rolle. Die Höhe der Verluste wird im wesentlichen bestimmt von der Leistungsfähigkeit der Maschine einerseits und von den Einsatzbedingungen und der Betriebsweise andererseits. Daher sind sowohl die Konstrukteure wie auch die Betreiber der Mähdrescher daran interessiert, Informationen zur Höhe der Körnerverluste zu gewinnen. Für eine Optimierung des Mähdreschereinsatzes genügt die Kenntnis der Verluste allein nicht; es muß sich eine Bewertung der Verluste anschließen.

1. Einleitung

Untersuchungen in der DDR [1] ergaben, daß Ernteverluste von über 10 % nicht selten sind. Allgemein sieht man einen Körnerverlust in Höhe von 1 % als zulässig bzw. wirtschaftlich an. Unter Körnerverlust wird hier der mit der Arbeit von Schüttler und Sieben verbundene Verlust verstanden, also nicht der unter Umständen erhebliche Verlust durch unvollständiges Erfassen des Gutes (Schneidwerkverlust) und durch unvollständiges Entkörnen des Fruchtstandes (Ausdruschverlust).

Die heute üblichen Bauarten der Elemente Schüttler und Sieb erlauben es, den Körnerverlust durch Beschränken des Erntegutdurchsatzes auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Häufig wird daher die Fahrgeschwindigkeit der Maschine und damit der Durchsatz soweit gedrosselt, daß bei grober Betrachtung keine Verluste mehr erkennbar sind.

Eine derartige Betriebsweise ist sicher nicht optimal und läßt sich nur aus der Tatsache erklären, daß der Landwirt keine praktikable Möglichkeit hat, die Verluste hinreichend genau zu bestimmen und als Grundlage einer wirtschaftlichen Betrachtung zu verwenden.

2. Der zulässige Körnerverlust

Daß die Frage, welcher Körnerverlust zulässig ist, nicht durch Angabe eines bestimmten Grenzwertes beantwortet werden kann, ergibt sich bereits aus den Unterschieden im Getreidepreis zwischen einzelnen Ländern. So ist z.B. der Weizenpreis in der Schweiz rund doppelt so hoch wie in der Bundesrepublik. Ein Körnerverlust von 1 % schlägt also in der Schweiz mit dem doppelten Wert zu Buche, bei etwa gleichen Maschinenkosten. Weiterhin bestehen Unterschiede im Wert zwischen den verschiedenen Körnerfruchtarten. Schließlich bestimmen noch Qualität, Verwendungszweck und Feuchtegehalt den tatsächlichen Wert der Körnerverluste. Sehr verschieden sind beispielsweise Verluste von Saatgetreide und Futtergetreide zu bewerten.

Einsatzversuche mit einem bestimmten Mähdrescher haben ergeben, daß dessen Betriebspunkt je nach Ernteverhältnissen bei Werten für den Körnerdurchsatz zwischen 6 und 16 t/h liegt. Unter Betriebspunkt ist dabei der Betrieb mit einem Körnerverlust von 1 % zu verstehen.

*) Dr.-Ing. E. Graeber ist Leiter von Automatisierungsprojekten in Fa. Maschinenfabrik Fahr AG, Gottmadingen.