

Beitrag zur Theorie des Wurfgebläses

Institut für Landmaschinen, TH Braunschweig

Das Problem der Materialförderung mit Wurfgebläsen interessiert besonders für Feldhäcksler, Schneidhäcksler und Dreschmaschinen; ferner auch für Buschhacker, Schneeschleudern, Gießereisandschleudern. Bisher lagen nur einige Versuche von G. Seigler und Erfahrungswerte der Industrie vor.

Deshalb sind am Institut für Landmaschinen der Technischen Hochschule Braunschweig (Direktor: Prof. Dr.-Ing. G. Seigler) mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten weitere systematische Untersuchungen an Wurfgebläsen durchgeführt worden. Über den theoretischen Teil dieser Untersuchungen, nämlich den Vorgang auf den Schaufeln und die Wurfhöhe soll nachstehend berichtet werden. In einem weiteren Beitrag werden die mit Versuchsgebläsen praktisch erreichten Ergebnisse veröffentlicht.

Kenngrößen

b_R, b_T	m/s ²	Radial-, Tangentialbeschleunigung
b_c, b_z, b_{res}	ms ²	Coriolis-, Zentrifugal-, resultierende Beschleunigung
c_w		Widerstandsbeiwert
F	m ²	Widerstandsfläche
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
H, h	m	Wurfhöhe mit und ohne relative Luftgeschwindigkeit
m	$\frac{kg \cdot s^2}{m}$	Masse
n	U/min	Drehzahl
r_1, r_2	m	innerer, äußerer Schaufelradius
u_1, u_2	m/s	innere, äußere Schaufelumfangsgeschwindigkeit
v, v_L	m/s	Material-, Luftgeschwindigkeit in der Rohrleitung
v_u, v_s	m/s	Materialgeschwindigkeit in Umfangs-, in Schaufelrichtung
v_{rel}	m/s	Relativgeschwindigkeit
w_1, w_2	m/s	Eintritts-, resultierende Austrittsgeschwindigkeit
w_s	m/s	Schwebegeschwindigkeit
x	m	Länge des Schaufelblattes
\dot{x}	m/s	Geschwindigkeit in Schaufelrichtung
\ddot{x}	m/s ²	Beschleunigung in Schaufelrichtung
$\alpha, \varrho, \sigma, \sigma_e$	°	Winkel an den Schaufeln
β	°	Austrittswinkel zur Schaufelradtangente
$\gamma, \gamma_a, \gamma_e$	°	Austrittswinkel zur Gehäusesenkrechten
μ		Reibwert
φ, φ_0	°	Drehwinkel des Schaufelrades Drehwinkel des Fördergutes relativ zum Schaufelrad
ω	1/s	Winkelgeschwindigkeit
ϱ_L	$\frac{kg \cdot s^2}{m^4}$	Luftdichte
τ, τ_a, τ_e	°	Gehäusewinkel

Materialgeschwindigkeit auf den Schaufeln

Das Material erreicht auf den Schaufeln eine maximale Umfangsgeschwindigkeit v_u und eine maximale Geschwindigkeit längs der Schaufeln v_s je nach Schaufelstellung (Abb. 1).

a) Umfangsgeschwindigkeit v_u

Die Umfangsgeschwindigkeit an den äußeren Schaufelspitzen mit dem Radius $r_2 = 0,298$ m (Abb. 3a—e) ist

$$v_u = u_2 = \frac{2 \pi r_2}{60} \cdot n = 0,0312 \cdot n \quad (1)$$

Da $v_u = u_2$ ist, soll später nur noch die Bezeichnung u_2 gebraucht werden.

b) Geschwindigkeit längs der Schaufeln v_s

Die Geschwindigkeit längs der Schaufeln wird durch die am Material angreifenden Beschleunigungen hervorgerufen. Es müssen also zunächst die Beschleunigungen errechnet werden. Die Formeln lauten (Hütte, 27. Aufl., Band I, S. 372):

$$b_T = r \frac{d^2 \varphi_0}{dt^2} + r \frac{d\omega}{dt} + 2 \frac{dr}{dt} \frac{d\varphi_0}{dt} + 2\omega \frac{dr}{dt} \quad (2a)$$

und

$$b_R = \frac{d^2 r}{dt^2} - \left(\frac{d\varphi_0}{dt} \right)^2 r - \omega^2 r - 2\omega \frac{d\varphi_0}{dt} r \quad (3a)$$

Da $\frac{d\varphi_0}{dt}$ (Winkelgeschwindigkeit des Fördergutes relativ zum Schaufelrad) im Vergleich zu ω sehr klein ist, kann es gleich Null gesetzt werden und die Formeln ändern sich dann in

$$b_T = r \frac{d\omega}{dt} + 2\omega \frac{dr}{dt} \quad (2b)$$

$$b_R = \frac{d^2 r}{dt^2} - \omega^2 r \quad (3b)$$

ferner ist $\omega = \text{const.}$ also $\frac{d\omega}{dt} = 0$ und $-\omega^2 r = 0$, da das Material nicht vom Kreismittelpunkt festgehalten wird, sondern nach außen wandert.

Damit wird

$$b_T = 2\omega \frac{dr}{dt} \quad (2c)$$

$$b_R = \frac{d^2 r}{dt^2} \quad (3c)$$

Es ist

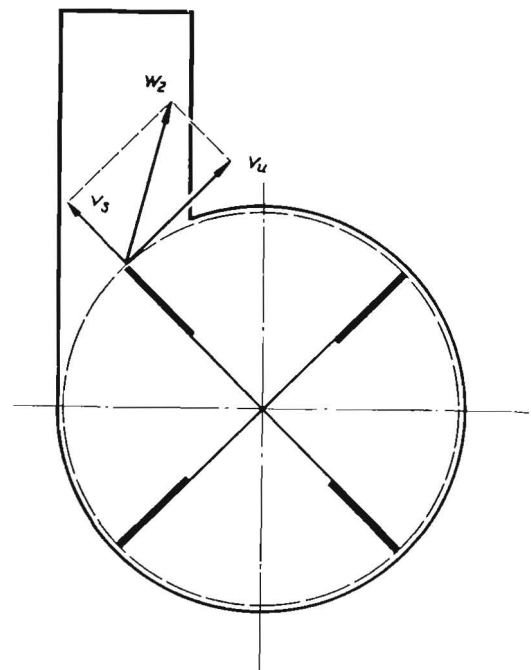
$$b_T = 2\omega \frac{dr}{dt} = 2\omega v_{rel}$$

die Coriolisbeschleunigung b_c

$$\text{und } b_R = \frac{d^2 r}{dt^2} = \omega^2 r \quad (3d)$$

die Zentrifugalbeschleunigung b_z .

Abb. 1



Wenn man beide Beschleunigungen zusammensetzt, erhält man die resultierende Beschleunigung b_{res} , die während des ganzen Weges am Material wirkt und am Schaufelrade die maximale Geschwindigkeit $v_s = v_{rel}$ hervorruft.

Die Geschwindigkeit v_s kann man über nachfolgenden Ansatz (Gl. 4a) errechnen. Bei diesem Ansatz ist die Erdbeschleunigung nicht berücksichtigt worden, da sie bei Umfangsgeschwindigkeiten von 6 m/s und mehr gegenüber der Zentrifugalbeschleunigung vernachlässigbar klein ist.

$$b_z \gg g$$

Bei 6 m/s ist für das Versuchswurfgebläse $b_z > 12g$.

Dagegen spielt die Erdbeschleunigung bei der unteren Begrenzung der erforderlichen Umfangsgeschwindigkeit eine Rolle. Bei Vernachlässigung der dann sehr kleinen Coriolis-Beschleunigung muß die Zentrifugalkraft größer als die durch die Erdbeschleunigung hervorgerufene Reibkraft sein.

$$b_z > g \mu.$$

Die Grenze der Förderung für das Versuchswurfgebläse läge mit μ Weizen = 0,4 etwa bei $u = 1,1$ m/s. (Abb. 2)

$$b_{res} = b_z \cdot \cos \sigma - \mu (b_z \sin \sigma + b_c) \quad (4a)$$

$$= \omega^2 r (\cos \sigma - \mu \sin \sigma) - 2 \mu \omega v_{rel}$$

oder

$$\ddot{x} = \omega^2 r (\cos \sigma - \mu \sin \sigma) - 2 \mu \omega \dot{x} \quad (4b)$$

mit

$$r^2 = r_1^2 + x^2 - 2r_1 x \cos \varrho \quad (5)$$

und

$$\frac{\sin \sigma}{r_1} = \frac{\sin \varrho}{r} \quad (6)$$

wird

$$r (\cos \sigma - \mu \sin \sigma)$$

$$= \sqrt{r^2 (1 - \sin^2 \sigma)} - \mu r_1 \sin \varrho \quad (7a)$$

$$= \sqrt{r^2 - r_1^2 \sin^2 \varrho} - \mu r_1 \sin \varrho$$

$$= \sqrt{r_1^2 + x^2 - 2r_1 x \cos \varrho} - r_1^2 \sin^2 \varrho - \mu r_1 \sin \varrho$$

$$= \sqrt{r_1^2 (1 - \sin^2 \varrho) + x^2 - 2r_1 x \cos \varrho} - \mu r_1 \sin \varrho$$

$$= \sqrt{r_1^2 \cos^2 \varrho + x^2 - 2r_1 x \cos \varrho} - \mu r_1 \sin \varrho$$

$$= \sqrt{(x - r_1 \cos \varrho)^2} - \mu r_1 \sin \varrho$$

$$= x - r_1 \cos \varrho - \mu r_1 \sin \varrho \quad (7b)$$

und vorstehende Gleichung gibt:

$$\ddot{x} = \omega^2 (x - r_1 \cos \varrho - \mu r_1 \sin \varrho) - 2 \mu \omega \dot{x} \quad (8a)$$

$$\ddot{x} + 2 \mu \omega \dot{x} - \omega^2 x + \omega^2 r_1 (\cos \varrho + \mu \sin \varrho) = 0 \quad (8b)$$

also eine vollständige, lineare Differentialgleichung mit konstanten Koeffizienten (Hütte, 27. Auflage, Band I, S. 121).

$$\ddot{x} + 2A\dot{x} - Bx + C = 0$$

$$\text{mit } A = \mu\omega, B = \omega^2, C = \omega^2 r_1 (\cos \varrho + \mu \sin \varrho)$$

Mit dem Ansatz $x = e^{\lambda t}$ für die homogene D.-Gl. wird:

$$\lambda^2 + 2A\lambda - B = 0$$

$$\lambda^2 + 2A\lambda + A^2 = B + A^2$$

$$\lambda_{1,2} = \pm \sqrt{B + A^2} - A$$

$$\lambda_{1,2} = \omega (\pm \sqrt{1 + \mu^2} - \mu)$$

gibt:

$$x = D_1 e^{\lambda_1 t} + D_2 e^{\lambda_2 t}$$

$$\dot{x} = D_1 \lambda_1 e^{\lambda_1 t} + D_2 \lambda_2 e^{\lambda_2 t} + \dot{D}_1 e^{\lambda_1 t} + \dot{D}_2 e^{\lambda_2 t}$$

mit

$$\dot{D}_1 e^{\lambda_1 t} + \dot{D}_2 e^{\lambda_2 t} = 0$$

$$\ddot{x} = D_1 \lambda_1^2 e^{\lambda_1 t} + D_2 \lambda_2^2 e^{\lambda_2 t} + \dot{D}_1 \lambda_1 e^{\lambda_1 t} + \dot{D}_2 \lambda_2 e^{\lambda_2 t}$$

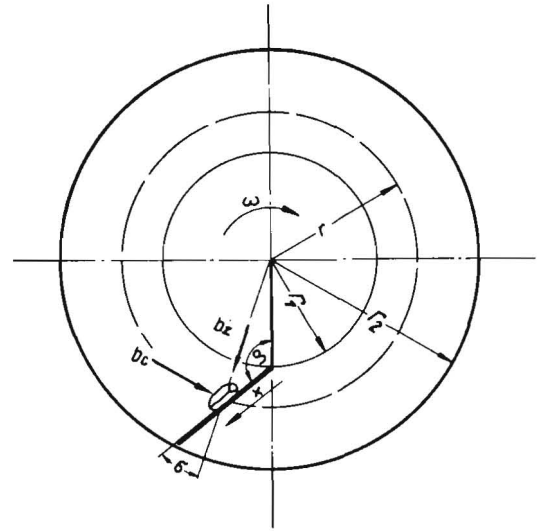


Abb. 2

mit

$$\dot{D}_1 \lambda_1 e^{\lambda_1 t} + \dot{D}_2 \lambda_2 e^{\lambda_2 t} = -C$$

Durch einfache Integration (Variation der Konstanten) werden die Konstanten bestimmt:

$$\dot{D}_1 e^{\lambda_1 t} + \dot{D}_2 e^{\lambda_2 t} = 0 \quad \cdot - \lambda_1$$

$$\dot{D}_1 \lambda_1 e^{\lambda_1 t} + \dot{D}_2 \lambda_2 e^{\lambda_2 t} = -C$$

$$\dot{D}_2 e^{\lambda_2 t} (\lambda_2 - \lambda_1) = -C$$

$$\dot{D}_2 = -\frac{C}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} \text{ gibt } D_2 = \frac{C}{(\lambda_2 - \lambda_1) \lambda_2} e^{-\lambda_2 t} + E_2$$

$$\dot{D}_1 e^{\lambda_1 t} = -\dot{D}_2 e^{\lambda_2 t}$$

$$\dot{D}_1 = \frac{C}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t}$$

$$\text{gibt } D_1 = \frac{-C}{(\lambda_2 - \lambda_1) \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} + E_1$$

eingesetzt ergibt sich:

$$x = \frac{-C}{(\lambda_2 - \lambda_1) \lambda_1} + E_1 e^{\lambda_1 t} + \frac{C}{(\lambda_2 - \lambda_1) \lambda_2} E_2 e^{\lambda_2 t}$$

$$x = \frac{-C}{(\lambda_2 - \lambda_1) \lambda_1 \cdot \lambda_2} (\lambda_2 - \lambda_1) + E_1 e^{\lambda_1 t} + E_2 e^{\lambda_2 t}$$

und

$$\dot{x} = \frac{-C}{\lambda_2 - \lambda_1} + E_1 \lambda_1 e^{\lambda_1 t} + \frac{C}{\lambda_2 - \lambda_1} + E_2 \lambda_2 e^{\lambda_2 t}$$

$$\dot{x} = E_1 \lambda_1 e^{\lambda_1 t} + E_2 \lambda_2 e^{\lambda_2 t}$$

$$\text{Für } t = 0 \quad x = 0 \quad \dot{x} = w_1 \quad \text{ist}$$

$$x = 0 = E_1 + E_2 - \frac{C}{\lambda_1 \cdot \lambda_2} \quad \cdot - \lambda_1$$

$$\dot{x} = w_1 = E_1 \lambda_1 + E_2 \lambda_2$$

$$w_1 = E_2 (\lambda_2 - \lambda_1) + \frac{C}{\lambda_1 \cdot \lambda_2} \cdot \lambda_1$$

$$E_2 = \frac{w_1 - \frac{C}{\lambda_1 \cdot \lambda_2}}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

$$= \frac{w_1 + r_1 (\cos \varrho + \mu \sin \varrho) (\sqrt{1 + \mu^2} - \mu) \omega}{-2 \sqrt{1 + \mu^2} \omega}$$

$$E_2 = \frac{\frac{w_1}{\omega} + r_1 (\cos \varrho + \mu \sin \varrho) (\sqrt{1 + \mu^2} - \mu)}{2 \sqrt{1 + \mu^2}}$$

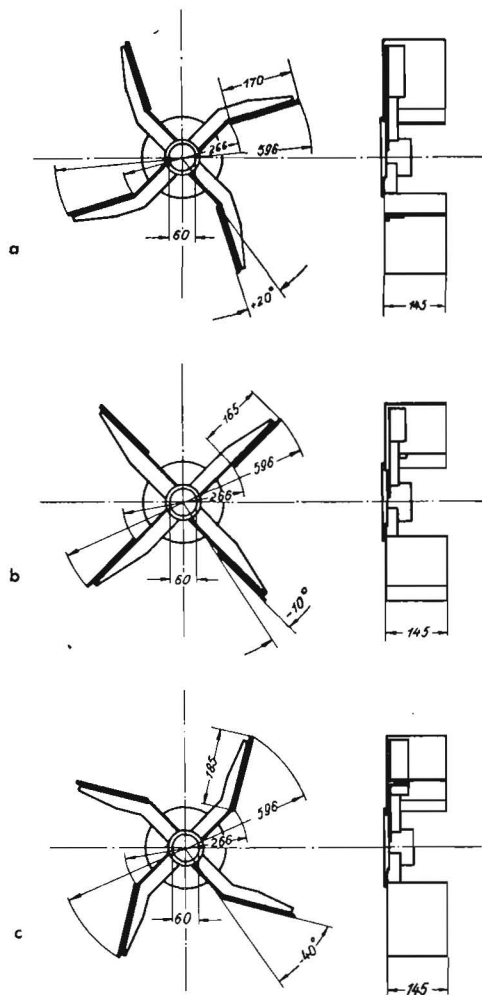


Abb. 3a-c: vorwärts-, normal- und rückwärtsgestellte Schaufeln eines Wurfgebläses von 600 mm \varnothing

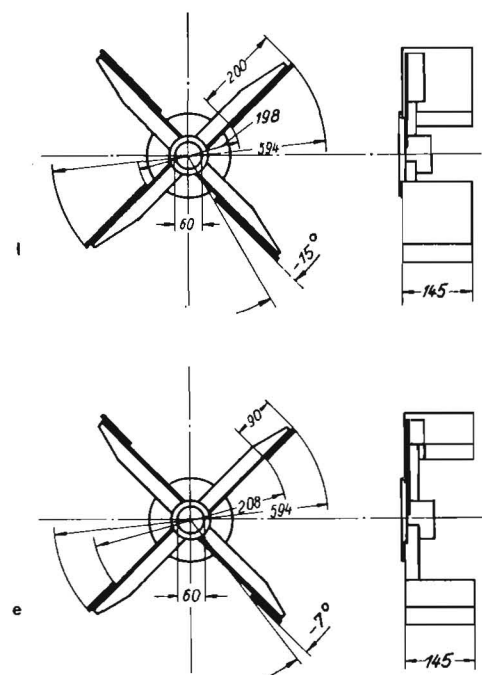


Abb. 3d-e: lange und kurze Schaufeln eines Wurfgebläses von 600 mm \varnothing

$$E_1 = -E_2 + \frac{C}{\lambda_1 - \lambda_2} = \frac{\frac{w_1}{\omega} + r_1 (\cos \varrho + \mu \sin \varrho) (\sqrt{1 + \mu^2} - \mu)}{2 \sqrt{1 + \mu^2}}$$

$$- r_1 (\cos \varrho + \mu \sin \varrho)$$

$$E_1 = \frac{\frac{w_1}{\omega} - r_1 (\cos \varrho + \mu \sin \varrho) (\sqrt{1 + \mu^2} + \mu)}{2 \sqrt{1 + \mu^2}}$$

Damit lautet die Lösung der Differentialgleichung mit der Eintrittsgeschwindigkeit w_1 :

$$x = \frac{\frac{w_1}{\omega} - r_1 (\cos \varrho + \mu \sin \varrho) (\sqrt{1 + \mu^2} + \mu)}{2 \sqrt{1 + \mu^2}} e^{(\sqrt{1 + \mu^2} - \mu) \omega t}$$

$$- \frac{\frac{w_1}{\omega} + r_1 (\cos \varrho + \mu \sin \varrho) (\sqrt{1 + \mu^2} - \mu)}{2 \sqrt{1 + \mu^2}} e^{-(\sqrt{1 + \mu^2} + \mu) \omega t} + r_1 (\cos \varrho + \mu \sin \varrho) \quad (9)$$

$$\dot{x} = v_s = \omega \left[(\sqrt{1 + \mu^2} - \mu) \right]$$

$$\cdot \frac{\frac{w_1}{\omega} - r_1 (\cos \varrho + \mu \sin \varrho) (\sqrt{1 + \mu^2} + \mu)}{2 \sqrt{1 + \mu^2}} \cdot e^{(\sqrt{1 + \mu^2} - \mu) \omega t} + (\sqrt{1 + \mu^2} + \mu) \frac{\frac{w_1}{\omega} + r_1 (\cos \varrho + \mu \sin \varrho) (\sqrt{1 + \mu^2} - \mu)}{2 \sqrt{1 + \mu^2}} e^{-(\sqrt{1 + \mu^2} + \mu) \omega t} \quad (10)$$

Beim Wurf interessiert nur das letzte die Schaufeln verlassende beziehungsweise die Schaufeln betretende Materialteilchen. Im Falle des ausgeführten Versuchsgebläses betritt das letzte Teilchen die Schaufeln senkrecht unter der Welle. Deshalb soll der Drehwinkel $\varphi = \omega t$ auch von dieser Senkrechten aus rechnen.

Die Daten für die Schaufeln (Abb. 3a-e) lauten:

a) vorwärtsgestellte Schaufeln:

$$\alpha = 20^\circ \quad \varrho = 160^\circ \quad r_1 = 0,133 \text{ m} \quad x = 0,170 \text{ m} \quad \sigma_\epsilon = 8^\circ 50'$$

b) rückwärts gestellte Schaufeln:

$$\alpha = -40^\circ \quad \varrho = -140^\circ \quad r_1 = 0,133 \text{ m} \quad x = 0,185 \text{ m} \quad \sigma_\epsilon = -16^\circ 40'$$

γ) normale, radiale Schaufeln:

$$\alpha = -10^\circ \quad \varrho = -170^\circ \quad r_1 = 0,133 \text{ m} \quad x = 0,165 \text{ m} \quad \sigma_\epsilon = -4^\circ 30'$$

δ) kurze, radiale Schaufeln:

$$\alpha = -7^\circ \quad \varrho = -173^\circ \quad r_1 = 0,208 \text{ m} \quad x = 0,090 \text{ m} \quad \sigma_\epsilon = -4^\circ 30'$$

ε) lange, radiale Schaufeln:

$$\alpha = -15^\circ \quad \varrho = -165^\circ \quad r_1 = 0,098 \text{ m} \quad x = 0,200 \text{ m} \quad \sigma_\epsilon = -4^\circ 30'$$

Da bei jedem vorhandenen Wurfgebläse die Konstruktion und damit die Abmaße feststehen, kann sich in obigen Gleichungen nur der Reibwert μ und die Eintrittsgeschwindigkeit w_1 je nach Art des Fördergutes ändern. Deshalb wurde in den folgenden Diagrammen als Abszisse der Reibwert μ von 0 bis 1,0 aufgetragen. Ferner wurde jeweils eine Kurvenschar mit $w_1 = 0$ und eine mit $w_1 = r_1 \omega$ errechnet. Da bei kurzen, normalen und bei langen Schaufeln r_1 verschieden ist, kann man keinen Vergleich innerhalb der Kurvenschar mit $w_1 = r_1 \omega$ in den Diagrammen für kurze, normale und für lange Schaufeln anstellen. Die Gegenüberstellung gilt hier nur immer für eine Schaufelart zwischen der Kurve mit $w_1 = 0$ und der mit $w_1 = r_1 \omega$.

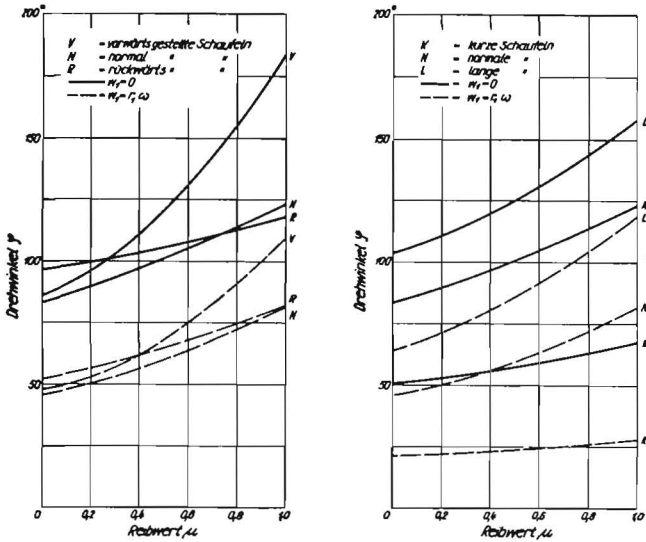


Abb. 4 a—b: Der erforderliche Drehwinkel φ eines Wurfgebläses von 600 mm \varnothing bei tangentialen Abwurf mit verschiedenen Schaufelformen

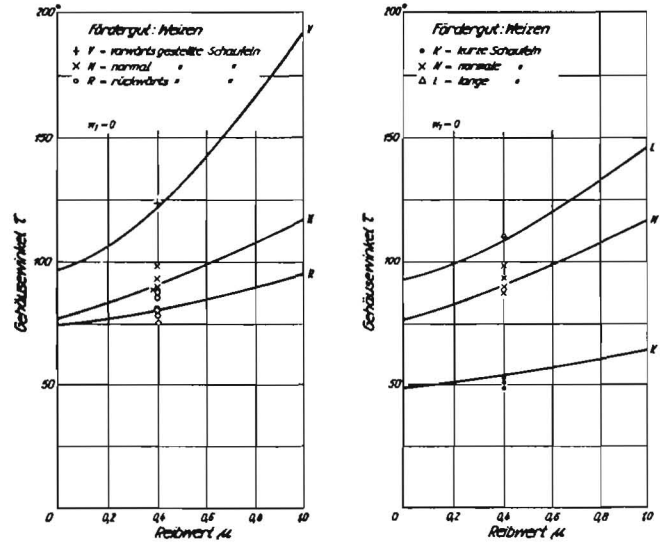


Abb. 5a—b: Der Gehäusewinkel τ eines Wurfgebläses von 600 mm \varnothing bei tangentialen Abwurf mit verschiedenen Schaufelformen

In den Diagrammen Abbildungen 4a—b ist Drehwinkel $\varphi = f(\mu)$ für verschiedene Schaufelformen aufgetragen. Es zeigt sich, daß für $\mu = 0$ die Größe φ allein von dem absoluten Wert des Schaufelwinkels α und damit der Länge des Schaufelweges abhängt, denn für rückwärtsgestellte Schaufeln ist φ größer als bei normalen Schaufeln. Erst bei steigenden μ -Werten nähern und schneiden sich schließlich beide Kurven. Dann ist φ für rückwärtsgestellte Schaufeln am kleinsten, wie es den Erwartungen entspricht.

Der Vorteil der rückwärtsgestellten Schaufeln ist aber ganz deutlich aus den Diagrammen Abbildungen 5a—b ersichtlich. Dort ist der Gehäusewinkel τ über μ aufgetragen. Er kennzeichnet die Stelle des Gehäuses, an der sich das Schaufelende befindet, wenn das letzte Material die Schaufel radial verläßt. Bis hierhin muß der Gehäusemantel geführt werden, um einen nur tangentialen Abwurf zu erhalten. Die Kurven zeigen, daß die rückwärtsgestellten und die kurzen Schaufeln am günstigsten liegen.

Nach Abbildung 6 ist

$$\tau = (180 - \varrho - \sigma_e) + \varphi \quad (11)$$

Außerdem sind in Abbildung 5a—b die mit Stroboskop und Filmaufnahmen ermittelten Meßpunkte eingetragen, die sehr gut im Bereich der ermittelten Kurven liegen.

Die spez. Materialgeschwindigkeit in Schaufelrichtung $\frac{v_s}{\omega}$, in

Umfangsrichtung $\frac{u_2}{\omega}$ und die spez. Umfangsgeschwindigkeit

an der Schaufelinnenkante $\frac{u_1}{\omega}$ sind in den Diagrammen Ab-

bildung 7a—b über dem Reibwert μ zu sehen. Bei den Geschwindigkeiten wurde die Ausdrucksform $\frac{v_s}{\omega}$, $\frac{u_1}{\omega}$, $\frac{u_2}{\omega}$ und

später auch $\frac{w_2}{\omega}$ gewählt, um einen drehzahlunabhängigen

Vergleich zwischen den einzelnen Schaufelformen anstellen zu können. Man sieht, daß bei gesteuertem Abwurf, d. h. wenn das Fördergut vor dem Abwurf bereits die Gehäuseaußenwand erreicht hat, und an ihr entlanggeführt wird, die Materialgeschwindigkeit in Schaufelrichtung bei vorwärts-gestellten und kurzen Schaufeln am geringsten ist, also für empfindliches Fördergut besonders geeignet. In diesem Fall wird die Materialgeschwindigkeit durch die Gehäuseaußenwand in Schaufelrichtung auf Null gebremst. Der Abwurf erfolgt dann allein in tangentialer Richtung mit der Umfangsgeschwindigkeit u_2 .

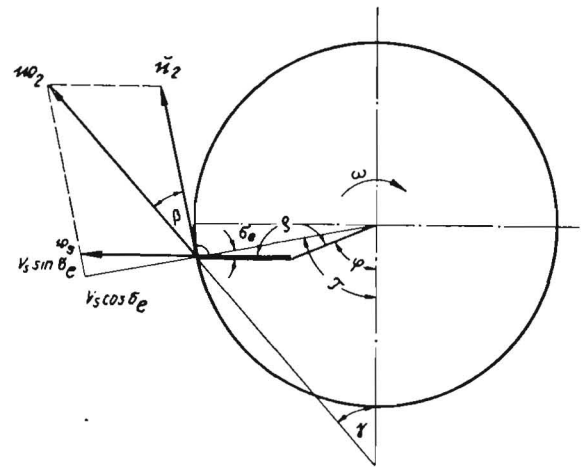


Abb. 6

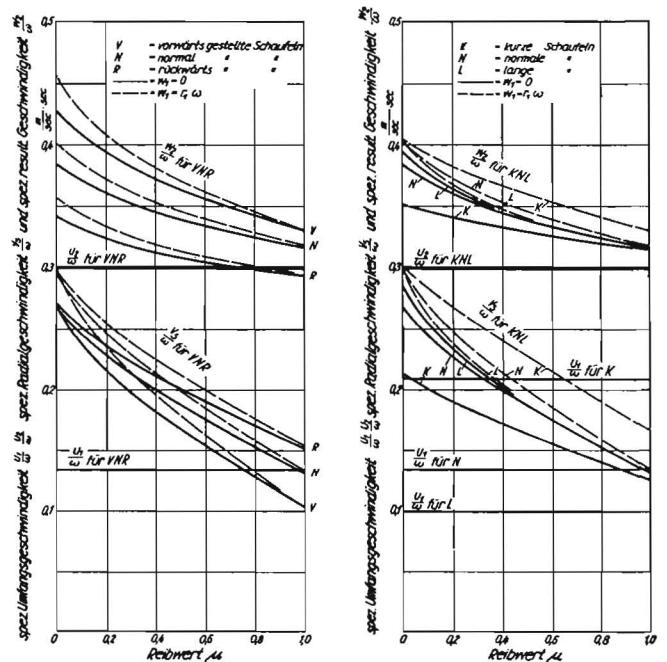


Abb. 7a—b: Die spez. Geschwindigkeiten $\frac{u_1}{\omega}$, $\frac{u_2}{\omega}$, $\frac{v_s}{\omega}$, $\frac{w_2}{\omega}$ eines Wurfgebläses von 600 mm \varnothing bei Abwurf mit verschiedenen Schaufelformen

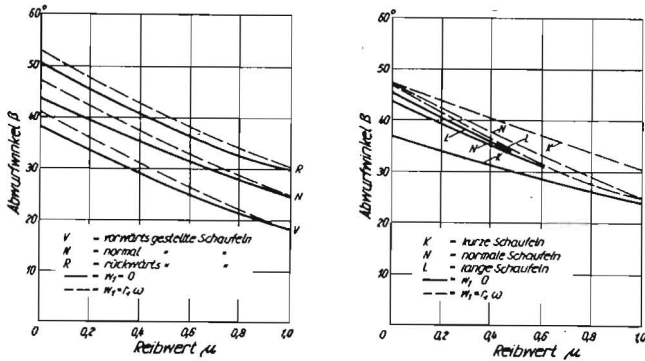


Abb. 8a—b: Der Abwurfwinkel β von den Schaufeln eines Wurfgebläses bei 600 mm ϕ bei freiem Abwurf und verschiedenen Schaufelformen

c) Die resultierende Abwurfgeschwindigkeit und der Abwurfwinkel bei freiem Austritt am Schaufelende

Die noch auf den Schaufeln wandernde Materialmenge wird bei freiem Austritt mit der resultierenden Geschwindigkeit w_2 unter dem Winkel β von diesen abgeworfen. w_2 erhält man durch Addition der beiden Geschwindigkeitsvektoren w_s und u_2 .

Nach Abbildung 6 ist

$$w_2 = \sqrt{v_s^2 \cos^2 \sigma_e + (u_2 + v_s \sin \sigma_e)^2} \quad (12)$$

und

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{v_s \cos \sigma_e}{u_2 + v_s \sin \sigma_e} \quad (13)$$

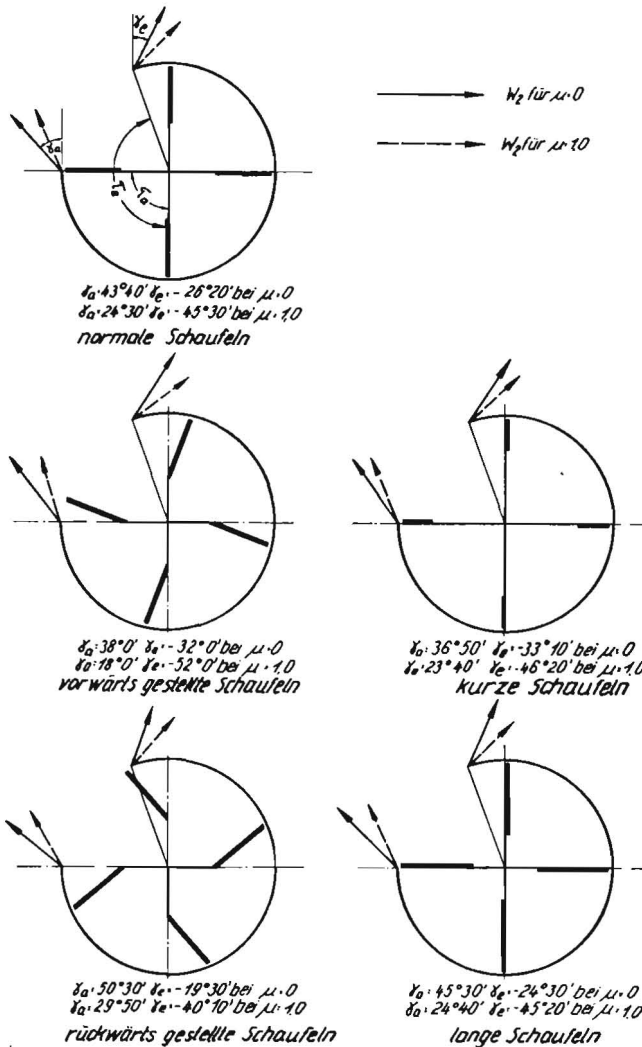


Abb. 9: Die Abwurfwinkel γ_a und γ_e am Gehäuse eines Wurfgebläses bei 600 mm ϕ bei freiem Abwurf und verschiedenen Schaufelformen

Die spez. resultierende Geschwindigkeit $\frac{w_2}{\omega}$ ist in den Diagrammen Abbildung 7a—b aufgetragen. w_2 ist außer bei stark rückwärtsgestellten Schaufeln und stärkerem Reibwert immer größer als die Umfangsgeschwindigkeit u_2 .

In den Diagrammen Abbildung 8a—b ist der Wurfwinkel β über μ aufgetragen. Er wird mit zunehmendem Reibwert, also geringerer Geschwindigkeit v_s kleiner. Wie schon nach den Diagrammen Abbildung 7a—b zu erwarten war, ist er für vorwärtsgestellte Schaufeln am geringsten.

Wesentlicher als der Winkel β , welcher relativ zum drehenden Schaufelrad gemessen wird, ist der Winkel γ relativ zum Gehäuse, und zwar zur Gehäusesenkrechten (Abb. 6). Er gibt die Streuung der einzelnen Wurfbahnen an und ändert sich mit dem Drehwinkel φ des Schaufelrades.

$$\gamma = 180 - \tau - (90 - \beta) \quad (14a)$$

$$\gamma = 90 - \tau + \beta \quad (14b)$$

wobei

$$\gamma_a = 90 - \tau_a + \beta \quad (15)$$

und

$$\gamma_e = 90 - \tau_e + \beta \quad (16)$$

ist.

Die Abwurfrichtung relativ zum Gehäuse ändert sich also von γ_a bis γ_e , wodurch nur eine geringe Materialmenge parallel zur anschließenden Rohrleitung abgeworfen wird. Der größte Teil prallt auf die Rohrwände. Durch die Streuung entstehen starke Beschädigungen an Rohrleitung und Fördergut. Die infolge der größeren resultierenden Geschwindigkeit höhere Wurfweite wird durch den Aufprall und die Wandreibung wieder vermindert. Dies sind Nachteile, die mit zunehmender Streuung erheblich wachsen. Deshalb sollte man versuchen, die Streuung ganz auszuschalten, indem die radiale Wurfkomponente verhindert wird. Es müßte also der Winkel τ_a so liegen, daß sich dort bereits sämtliches Material an den Schaufelenden befindet.

Abbildung 9 zeigt die Streuung der einzelnen Wurfbahnen mit $\tau_a = 90^\circ$, $\tau_e = 160^\circ$, $w_1 = 0$ für $\mu = 0$ und $\mu = 1$,

Wurfhöhe

Bestimmend für die Wurfhöhe sind in erster Linie Abwurfgeschwindigkeit und Abwurfrichtung beziehungsweise die Abwurfform. Das Fördergut soll mit Schaufelumfangsgeschwindigkeit tangential in Richtung der Rohrleitung abgeworfen werden. Für jedes Materialteilchen gilt, daß beim Wurfvorgang die Summe der inneren Kräfte gleich der Summe der äußeren Kräfte, also in diesem Fall $-G$ und $-W$, ist (Abb. 10).

Damit lautet der Ansatz:

$$K_i = -G - W \quad (17a)$$

$$m \frac{dv}{dt} = -c_w \frac{\rho L}{2} F v^2 - mg \quad (17b)$$

$$-dt = \frac{dv}{\frac{c_w}{m} \cdot \frac{\rho L}{2} \cdot F v^2 + g}$$

$$\text{mit } \frac{c_w}{m} \cdot \frac{\rho L}{2} \cdot F = a$$

$$-dt = \frac{dv}{a v^2 + g}$$

$$t = -\frac{1}{g} \int \frac{dv}{\frac{a}{g} v^2 + 1} \text{ mit } \sqrt{\frac{a}{g}} v = z \text{ und } \sqrt{\frac{a}{g}} dv = dz$$

$$t = -\frac{1}{g} \sqrt{\frac{g}{a}} \int \frac{dz}{z^2 + 1}$$

$$t = -\frac{1}{g} \sqrt{\frac{g}{a}} \operatorname{arc} \operatorname{tg} z$$

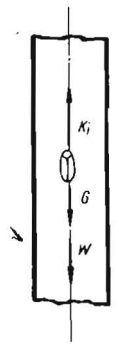


Abb. 10

$$t = -\frac{1}{g} \sqrt{\frac{g}{a}} \left[\text{arc tg} \sqrt{\frac{a}{g}} v - C \right] \quad (18a)$$

Zur Zeit $t = 0$ gilt die Umfangsgeschwindigkeit, also $v = u_2$, dann wird

$$C = \text{arc tg} \sqrt{\frac{a}{g}} u_2$$

und

$$t = \frac{1}{g} \sqrt{\frac{g}{a}} \text{arc tg} \sqrt{\frac{a}{g}} \frac{u_2 - v}{1 + u_2 v \frac{a}{g}}$$

$$\text{mit } \sqrt{\frac{g}{a}} = \sqrt{\frac{mg}{c_w \frac{\rho_L}{2} F}} = w_s$$

$$t = \frac{w_s}{g} \text{arc tg} \cdot \frac{w_s}{1 + \frac{u_2 \cdot v}{w_s^2}} \quad (18b)$$

Da beim Wurfvorgang in der Rohrleitung auch eine bestimmte Luftgeschwindigkeit v_L herrscht, die auf den Fördervorgang begünstigend wirkt, ist in obige Gleichung die Relativgeschwindigkeit einzuführen. Sie lautet dann:

$$t = \frac{w_s}{g} \text{arc tg} \frac{\frac{(u_2 - v_L - v + v_L)}{w_s}}{1 + \frac{(u_2 - v_L)(v - v_L)}{w_s^2}} \quad (19)$$

Wenn man die Geschwindigkeit $v = 0$ setzt, so ergibt sich die Zeit t_{max} , in der das Material den Gipfelpunkt erreicht hat und der Fördervorgang beendet ist.

$$t_{max} = \frac{w_s}{g} \text{arc tg} \frac{\frac{u_2}{w_s}}{1 - \frac{v_L}{w_s} \cdot \frac{(u_2 - v_L)}{w_s}} \quad (20)$$

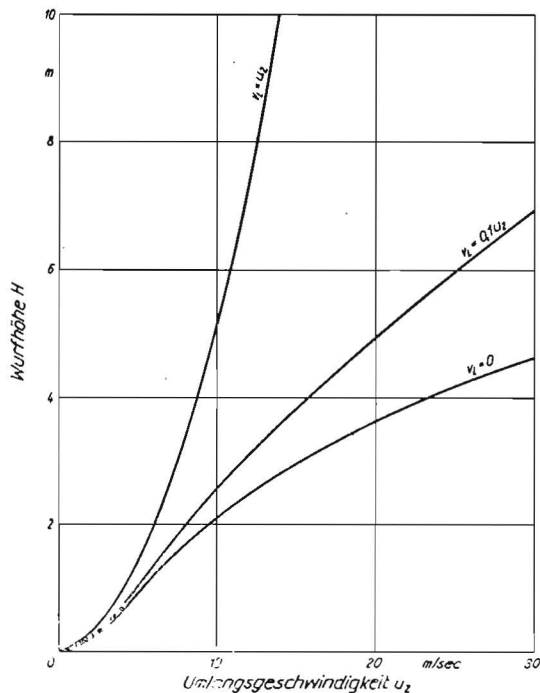


Abb. 11: Die theoretische Wurfhöhe bei einer Luftgeschwindigkeit $v_L = 0$; $v_L = 0,1 u_2$; $v_L = u_2$ mit $w_s = 5 \text{ m/s}$.

Durch weitere Integration bekommt man die zur Zeit t_{max} erreichte maximale Wurfhöhe h

$$\text{tg} (C - \sqrt{agt}) = \sqrt{\frac{a}{g}} v = \sqrt{\frac{a}{g}} \frac{dh}{dt}$$

$$h = \sqrt{\frac{g}{a}} \int \text{tg} (C - \sqrt{agt}) dt \text{ mit } C - \sqrt{agt} = w \text{ und } -\sqrt{ag} dt = dw$$

$$h = \sqrt{\frac{g}{a}} \int \text{tg} w \frac{dw}{-\sqrt{ag}}$$

$$h = -\frac{1}{a} \int \text{tg} w dw$$

$$h = \frac{1}{a} \ln \cos w \Big|_0^{t_{max}}$$

$$h = \frac{1}{a} \left[\ln \cos (C - \sqrt{ag} t_{max}) - \ln \cos C \right]$$

$$h = \frac{1}{a} \left[\ln \frac{\cos (C + \sqrt{ag} t_{max})}{\cos C} \right]$$

$$h = \frac{1}{a} \left[\ln \frac{\cos C \cos \sqrt{ag} t_{max} + \sin C \sin \sqrt{ag} t_{max}}{\cos C} \right]$$

$$h = \frac{1}{a} \ln \left[\cos \sqrt{ag} t_{max} + \text{tg} C \sin \sqrt{ag} t_{max} \right]$$

$$h = \frac{1}{a} \ln \left[\cos \sqrt{ag} t_{max} + \text{tg} \left(\text{arc tg} \sqrt{\frac{a}{g}} u_2 \right) \right]$$

$$\sin \sqrt{ag} t_{max} \Big]$$

$$h = \frac{1}{a} \ln \left[\cos \sqrt{ag} t_{max} + \sqrt{\frac{a}{g}} u_2 \sin \sqrt{ag} t_{max} \right]$$

$$h = \frac{w_s^2}{g} \ln \left[\cos \frac{g}{w_s} t_{max} + \frac{u_2}{w_s} \sin \frac{g}{w_s} t_{max} \right] \quad (21)$$

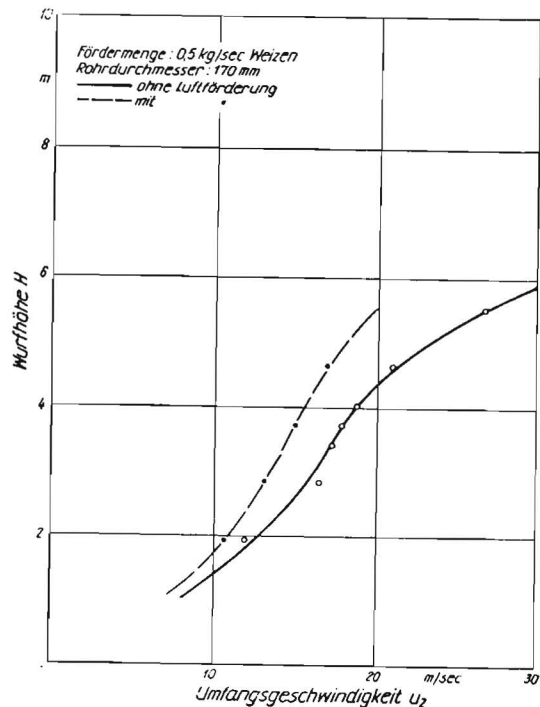


Abb. 12: Die gemessene Wurfhöhe für Weizen bei einem Wurfgebläse von 600 mm \varnothing mit vier rückwärtsgestellten Schaufeln

Bei Berücksichtigung der Relativgeschwindigkeit ergibt sich:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{dh}{dt} - v_L \quad \text{mit} \quad u_2 = v_L$$

Dann lautet die Gleichung:

$$H = \frac{w_s^2}{g} \ln \left[\cos \frac{g}{w_s} t_{\max} + \frac{u_2 - v_L}{w_s} \sin \frac{g}{w_s} t_{\max} \right] + v_L t_{\max} \quad (22)$$

Für den Extremfall $v_L = u_2$, also der Förderung im luftleeren Raum bzw. ohne Relativgeschwindigkeit, vereinfacht sich die Gleichung zu:

$$H = \frac{u_2^2}{2g} \quad (23)$$

Im Fall $v_L = 0$, also der Förderung bei stationärer Luft, wird sie:

$$H = \frac{w_s^2}{g} \ln \left[\cos \frac{g}{w_s} t_{\max} + \frac{u_2}{w_s} \sin \frac{g}{w_s} t_{\max} \right] \quad (24)$$

mit

$$t_{\max} = \frac{w_s}{g} \arctg \frac{u_2}{w_s} \quad (25)$$

Beide Kurven mit $w_s = 5$ m/s sind in dem Diagramm Abbildung 11 aufgetragen. In Wirklichkeit wird sich aber eine

Kurve mit $v_L = k \cdot u_2$ einstellen, ähnlich wie sie beispielsweise mit $v_L = 0,1 \cdot u_2$ aufgetragen ist. Die in Diagramm Abbildung 12 aufgetragenen Meßkurven zeigen tendenzielle Übereinstimmung mit den theoretischen Kurven. Die Abweichungen sind auf die sehr schwer zu erfassenden Einflüsse der Reibung von Material gegen Material und Material gegen Wand, ferner auf die doch immer vorhandene Streuung eines gewissen Materialteiles zurückzuführen. Hinzu kommt, daß die tatsächlich vorhandene Luftgeschwindigkeit in der Rohrleitung von der Wurfgebläseausführung, der Rohrleitung selbst und der Fördergutmenge abhängt. Mit größerer Windgeschwindigkeit nimmt die Förderhöhe, aber auch der Kraftbedarf zu, so daß es zweckmäßig ist, einen Kompromiß zwischen günstiger Förderhöhe oder niedrigerem Kraftbedarf zu finden.

Mit Hilfe vorstehender Gleichungen, die jedoch nur für reine Wurf Förderung gelten, ist die Möglichkeit gegeben, eine günstige Wurfgeblöse-Konstruktion im Voraus zu errechnen und die angenäherte Wurfhöhe zu ermitteln.

Schrifttum:

- Blevins, Hansen: Analysis of Forage Harvester Design. Agr. Eng., 37 (1956) S. 21-26.
 G. Kampf: Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Wurfgebläsen. Diss. Braunschweig 1956.
 E. Petersen: Beitrag zur Theorie der Wurförderer. Unveröffentlichter Bericht.
 G. Segler: Untersuchungen an Körnergebläsen und Grundlagen für ihre Berechnung. Selbstverlag G. Segler, Mannheim 1944.
 G. Segler: Konstruktion landwirtschaftlicher Fördergeblöse. Landt. Forsch. 1 (1951) S. 2-10.

Résumé:

Dr.-Ing. G. Kampf: „Beitrag zur Theorie des Wurfgebläses.“

Das Problem der Materialförderung mit Wurfgebläsen interessiert besonders für Feldhäcksler, Schneidhäcksler und Dreschmaschinen; ferner auch für Buschhacker, Schneeschleudern und Giebereisandschleudern. Das Institut für Landmaschinen der TH Braunschweig hat systematische Untersuchungen an Wurfgebläsen durchgeführt, über deren theoretischen Teil hier berichtet wird. Im nächsten Heft werden die mit Versuchsergebnissen praktisch erreichten Ergebnisse veröffentlicht. Der Verfasser stellt verschiedene Formeln auf, mit deren Hilfe die Materialgeschwindigkeit auf den Schaufeln und die Wurfhöhe errechnet werden kann. Damit ist die Möglichkeit gegeben, eine günstige Wurfgeblöse-Konstruktion im Voraus zu errechnen und die angenäherte Wurfhöhe zu ermitteln. Die Gleichungen gelten nur für reine Wurf Förderung.

Dr.-Ing. G. Kampf: „A Contribution to the Theory of Pneumatic Conveyors.“

The problems involved in the conveyance of materials by pneumatic means are of special interest in the design of chaff and feed cutters and threshing and harvesting equipment, as well as in the design of brushwood cutters, rotary snow ploughs and sand conveyors in foundries. The Institute for Agricultural Engineering at the Technical University at Braunschweig (Brunswick) recently conducted a series of systematic investigations on pneumatic conveyors. The theoretical results derived therefrom are included in this paper, whilst the practical results obtained from the conveyor under investigation will be published in our next number. The author gives various formulae whereby the velocity of the material at the impeller vanes and the height to which it is ejected can be theoretically determined. This enables a satisfactory design for a pneumatic conveyor to be made and the approximate height of ejection to be determined. The equations given are only valid for conveyance by impulse and ejection.

Dr.-Ing. G. Kampf: «Considérations théoriques sur les transporteurs mécano-pneumatiques.»

Le problème posé par le transport de matières à l'aide de transporteurs mécano-pneumatiques touche en particulier les hache-paille fixes et mobiles et les batteuses, ainsi que les coupeuses de bois, les chasse-neige et les propulseurs de sables de fonderie. L'Institut du Machinisme Agricole de l'Ecole Technique Supérieure de Brunswick a effectué des essais systématiques sur des transporteurs mécano-pneumatiques, dont la partie théorique est exposée dans l'article présente. Les résultats pratiques obtenus lors des essais sur les transporteurs expérimentaux seront publiés dans le numéro prochain. L'auteur a établi différentes formules à l'aide desquelles on peut calculer la vitesse de translation des matières sur les aubes et la hauteur de propulsion. Elles permettent de calculer à l'avance les données constructives de transporteurs mécano-pneumatiques et de déterminer approximativement la hauteur de propulsion. Les formules ne sont valables que pour la seule force de translation mécanique.

Ing. Dr. G. Kampf: «Reseña sobre la teoría de la máquina soplante de lanzamiento.»

El problema del transporte por máquinas soplantes de lanzamiento es de interés para las cortadoras de paja en el campo, cortadoras de pastos y las trilladoras, además para cortadoras de ramaje, máquinas lanza-nieve y máquinas de lanzar arena en los talleres de fundición. El Instituto para Máquinas agrícolas de la Universidad Industrial de Braunschweig ha llevado a cabo investigaciones sistemáticas en estas máquinas, dándose aquí un informe de la parte teórica, mientras en el número siguiente vamos a publicar los resultados prácticos. El autor establece varias fórmulas para el cálculo de la velocidad del material en las palas y de la altura de proyección, pudiendo de este forma calcularse de antemano la construcción de una máquina soplante de lanzamiento favorable y de conocer la altura aproximada de proyección. Las ecuaciones sólo se refieren al transporte de lanzamiento puro.

Eine erfreuliche Mitteilung

Heute vor fünf Jahren, Ende 1951, ist die erste Nummer der „Landtechnischen Forschung“ erschienen. In ihrem Vorwort hatte Ministerialdirigent von Waechter sie als einen Mittler bezeichnet, der das Erarbeitete der Wissenschaft zum Verarbeiten der Industrie übergibt. Oberlandwirtschaftsrat Wesselhoeft wünschte, daß sie eine Brücke schlage zwischen den landtechnischen Instituten, Forschungsstätten und Konstruktionsbüros zur Schlepper- und Landmaschinenfertigung. Daß die Zeitschrift diese Aufgaben im Laufe der vergangenen Jahre immer besser erfüllt hat, ist hauptsächlich das Verdienst der Mitarbeiter, die sich trotz anderweitiger starker Inanspruchnahme die Zeit genommen haben, die Ergebnisse ihrer Arbeiten in eine Form zu bringen, die eine Veröffentlichung in der „Landtechnischen Forschung“ erlaubte. Ihnen gilt unser besonderer Dank. Gleichzeitig können wir unseren Lesern die erfreuliche Mitteilung machen, daß die Zeitschrift dank dem Entgegenkommen der Fachgemeinschaft Landmaschinen und des Verlages Neureuter ab 1. Januar 1957 alle zwei Monate, also sechsmal jährlich, erscheinen wird. Wir erfüllen damit einen Wunsch, der von verschiedenen Seiten wiederholt an uns herangetragen worden ist.

Herausgeber und Verleger