

Bemessung von Absaugeinrichtungen für Schadgase

Dipl.-Ing. G. Reschke, Forschungszentrum für Mechanisierung der Landwirtschaft Schlieben/Bornim der AdL der DDR

1. Aufgabenstellung

Bei der Herstellung von Strohpellets kommt neben Natronlauge auch 25%iges Ammoniakwasser als Aufschlußmittel für Stroh in der Pelletierpresse zum Einsatz. Die dabei entstehenden Ammoniakdämpfe stellen eine lästige Nebenerscheinung dar. Deshalb müssen sie aus der Aufenthalts- und Überwachungszone des Bedienpersonals entfernt werden ($MAK_D = 25 \text{ mg/m}^3$, $MAK_K = 50 \text{ mg/m}^3$ [1]). Bereits eine Dauerbelastung von 70 mg/m^3 wirkt nach kurzer Zeit tödlich [2]. Eine dringende Aufgabe besteht also darin, die bei der Strohpelletierung entweichenden Ammoniakdämpfe mit geeigneten Absauganlagen zu beseitigen.

2. Grundlagen für die Auslegung von Erfassungseinrichtungen

Absauganlagen, die zur örtlichen Absaugung schädlicher Luftverunreinigungen (Gase, Dämpfe, Stäube) dienen, bestehen aus folgenden Teilen:

- Erfassungseinrichtung an der Schadstoffquelle
- Saug- und Druckleitung
- Sauglüfter.

Die Abluft wird abhängig von der Art und Konzentration des Schadstoffs entweder unmittelbar in die Atmosphäre oder vorher durch eine Abluftreinigungsanlage geleitet. Der wichtigste Teil der Absauganlage ist die Erfassungseinrichtung an der Schadstoffquelle. Sie muß die Schadstoffe auffangen und deren Ausbreitung im Raum, d. h. die Vermischung mit großen Luftmengen, verhindern. Erfassungseinrichtungen werden unterteilt in:

- Saugöffnungen
- Saugschlitz
- Saughauben.

Saugöffnungen

Sie sind die einfachste Form einer Erfassungseinrichtung und bestehen aus einem Saugrohr. Die Luft strömt von allen Seiten in das Rohr ein (Bild 1). Jede Kurve stellt den geometrischen Ort gleicher Geschwindigkeit dar. Die dazu

Tafel 1. Berechnungsgleichungen für Saugöffnungen [3] [4]

Saugöffnung	Berechnungsformeln		Anmerkungen
	$\frac{x}{d_{gl}} \leq 0,5$	$\frac{x}{d_{gl}} > 0,5$	
rund	$\frac{w_x}{w_o} = \frac{0,95 \left(4 \frac{x}{d_{gl}}\right)^{-1,4}}{1,25 + \left(4 \frac{x}{d_{gl}}\right)^{-1,4}} \quad (1)$	$\frac{w_x}{w_o} = \left(4 \frac{x}{d_{gl}}\right)^{-2}$	(3) $d_{gl} = \frac{4A}{U}$; d_{gl} gleichwertiger Durchmesser
quadratisch		$\frac{w_x}{w_o} = \frac{4}{\pi} \left(4 \frac{x}{d_{gl}}\right)^{-2}$	(4) U Umfang der Saugöffnung
rechteckig	$\frac{w_x}{w_o} = \frac{\left(4 \frac{x}{d_{gl}}\right)^{-1,4}}{1,25 + \left(4 \frac{x}{d_{gl}}\right)^{-1,4}} \quad (2)$	$\frac{w_x}{w_o} = \frac{\left(4 \frac{x}{d_{gl}}\right)^{-1,7}}{1 + \left(4 \frac{x}{d_{gl}}\right)^{-1,7}} \quad (5)$	

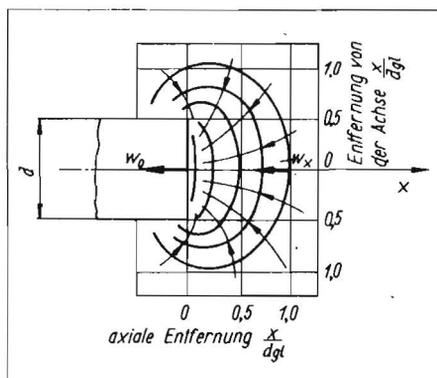


Bild 1. Geschwindigkeitsfeld vor einer runden Saugöffnung [5]

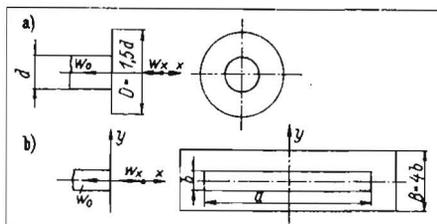


Bild 2. Erfassungseinrichtung mit optimalem Flansch:
a) runde Saugöffnung mit Flansch
b) rechteckiger Saugschlitz mit Flansch

senkrechten Linien zeigen die Strömungsrichtung an. Besonders wichtig für die richtige Bemessung ist die Kenntnis der Erfassungsgeschwindigkeit w_x in Richtung der x-Achse. Bereits bei der Entfernung $x = d_{gl}$ ist die Erfassungsgeschwindigkeit w_x auf rd. 7% des Wertes w_o an der Saugöffnung gesunken. w_x kann nach den in Tafel 1 zusammengestellten empirischen Gleichungen berechnet werden [3, 4].

Durch Anbringen eines Flansches an der Saugöffnung kommt es zu einer Erhöhung der örtlichen Erfassungsgeschwindigkeit um 33% (Bild 2). In [6] wird folgende Berechnungsgleichung für die Erfassungsgeschwindigkeit angegeben:

$$\frac{w_x}{w_o} = 1 - \frac{x/d}{\sqrt{(x/d)^2 + 4}} \quad (6)$$

Der optimale Flanschdurchmesser ist $D = 1,5 d$. Eine weitere Vergrößerung bringt keinen Unterschied zum unendlich großen Flansch (Bild 2a).

Saugschlitze

Als Saugschlitz bezeichnet man rechteckige Saugöffnungen, bei denen die Höhe b sehr klein gegenüber der Schlitzlänge a ist. Für ein Seitenverhältnis $b/a < 0,1$ gelten nach [7] folgende Berechnungsgleichungen für die Geschwindigkeit in x- und y-Richtung (Bild 2b):

$$\frac{w_x}{w_o} = \frac{1}{\pi} \left[\arctan \frac{y + \frac{1}{2}}{\frac{x}{b}} - \arctan \frac{y - \frac{1}{2}}{\frac{x}{b}} \right] \quad (7)$$

$$\frac{w_y}{w_o} = \frac{1}{\pi} \ln \left[\frac{\left(\frac{y + \frac{1}{2}}{\frac{x}{b}}\right)^2 + \left(\frac{x}{b}\right)^2}{\left(\frac{y - \frac{1}{2}}{\frac{x}{b}}\right)^2 + \left(\frac{x}{b}\right)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Für die resultierende Geschwindigkeit im Strömungsfeld gilt:

$$\frac{w}{w_o} = \sqrt{\left(\frac{w_x}{w_o}\right)^2 + \left(\frac{w_y}{w_o}\right)^2} \quad (9)$$

Für die Praxis hat der Fall $x > 0, y = 0$ besondere Bedeutung, weil danach die Tragweite der Saugströmung bestimmt werden kann:

$$\frac{w_x}{w_o} = \frac{2}{\pi} \arctan \frac{b}{2x} \quad (10)$$

Die mit dieser Gleichung errechneten Werte stimmen mit experimentellen Werten überein. Die optimale Flanschbreite beträgt $B = 4b$. Die Forderung nach gleichmäßiger Absaugung über längere Strecken kann durch Absaugkanäle mit seitlichem Absaugschlitz erfüllt werden. Die Geschwindigkeitsverteilung über den Saugschlitz w_{sx} , die Geschwindigkeit im Absaug-

Fortsetzung von Seite 458

1975/76 konzipiert und zum Patent angemeldet [1, 2]. Es werden die Einsatzgrenzen aufgezeigt. Die ersten praktischen Erprobungen erfolgten in der Erntekampagne 1977 [3, 4], die zur Weiterentwicklung der Systeme Anregungen gaben.

Literatur

- [1] Exner, G.; Brändle, M.; Neufert, K.: Freilager für Schüttgut, vorzugsweise für Häckselstroh. Wirtschaftspatent Nr. 121 623 vom 27. Juni 1975.
- [2] Exner, G.: Vorrichtung zur Bildung eines Großlagers für Schüttgut im Freien, vorzugsweise für Häckselstroh. Wirtschaftspatent Nr. 128 449 vom 18. Nov. 1976.
- [3] Herrmann, K.: Maschinenkomplexe für die Futterstrohernte. agrartechnik 28 (1978) H. 5, S. 193—196.
- [4] Boss, W.; Herrmann, K.: Erste Ergebnisse beim Einsatz von Hilfsmitteln zur Formung von Strohdriemen. Feldwirtschaft (1978) H. 6, S. 270—272. A 2137

kanal w_{kx} und die Druckverhältnisse können berechnet werden [8, 9]. Im Bild 3 sind zwei Absaugkanäle konstanten Querschnitts ($A_x = A_1$) mit einem seitlichen Saugschlitz konstanter Höhe h (Bild 3a) und veränderlicher Höhe $h_0 \geq h_x \geq h_1$ (Bild 3b) dargestellt. Die Druck- und Geschwindigkeitsverhältnisse hängen in erster Linie vom Verhältnis der Saugschlitzfläche A_{Schl} zur Absaugkanalfläche A_1 ab. Bei konstanter Höhe des Saugschlitzes kann eine gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung über den Saugschlitz nur bei einer kleinen Schlitzhöhe h und damit hohen Ventilatorpressung erreicht werden. Es läßt sich eine gekrümmte Schlitzkontur finden, bei der eine gleichmäßige Absaugmengenverteilung über die Schlitzlänge bei 50% Einsparung an statischer Pressung erreicht wird [9]. Aus fertigungstechnischen Gründen wird der Saugschlitz keilförmig mit geraden Flanken ausgeführt und dafür die optimale Absaugmengenverteilung bestimmt. In Tafel 2 werden die Berechnungsgleichungen für Absaugkanäle mit seitlichem Saugschlitz angegeben [10].

Die Formkennzahl a gibt die geometrische Form des Saugschlitzes an:
 $a = 0$; ($h_1 = h_0$) Rechteckform
 $a = +1$; ($h_1 = 0$) Dreieckform
 $0 < a < +1$; ($h_1 < h_0$) Trapezform
 $a = -1$; ($h_1 = 2 h_0$) Trapezform.
 Für die Druckverlustkennziffer des Absaugkanals gilt:

$$\zeta_k = 1 - \frac{2}{\tanh^2 \alpha} \quad (\text{bei } p_a = 0) \quad (21)$$

Die Differenz $p_a - p_1$ stellt die statische Pressung dar, die zum Betreiben des Absaugkanals nötig ist:

$$\frac{p_a - p_1}{\frac{\rho}{2} w_1^2} = 2 \frac{\cosh^2 \alpha}{\sin^2 \alpha} \quad \left(\frac{x}{l} = 1 \right)$$

Die optimale Verteilungskurve entsteht, wenn am Anfang und Ende des Saugschlitzes die gleiche Luftmenge einströmt bei gleichzeitig geringstem Druckverlust. Das wird erreicht, wenn die Kanalkonstruktion folgende Bedingung erfüllt (Bild 4):

$$\cosh \alpha = \frac{1}{1-a} \quad (22)$$

Für die Bemessung des keilförmigen Saugschlitzes wird in [4] ein grafisches Verfahren angegeben. Es gilt die Bedingung $w_{sx} h_x = \text{konst.}$ Im Bild 5 ist die Funktion

$$\frac{w_{sx}}{w_{x0}} = f \left[\frac{x}{l}; \frac{w_1}{w_{x0}} \right]$$

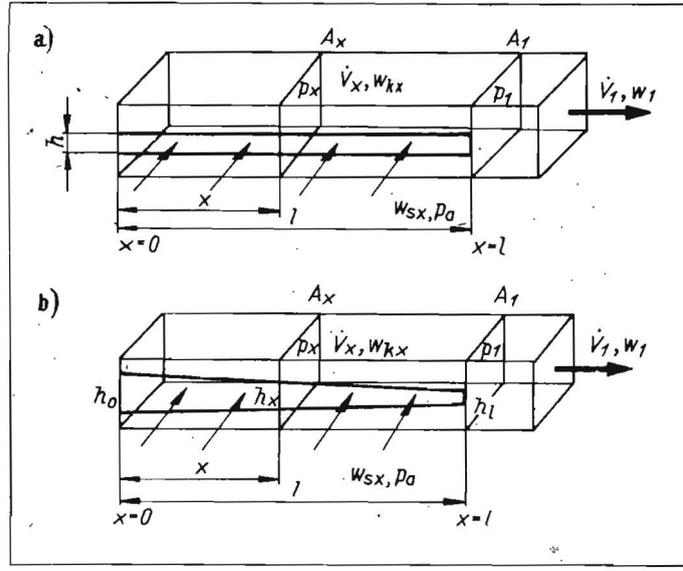


Bild 3. Absaugkanal mit seitlichem Saugschlitz;
 a) Schlitzhöhe konstant
 b) Schlitzhöhe keilförmig

Tafel 2. Berechnungsgleichungen für Absaugkanäle mit seitlichem Schlitz [10]

Berechnungsgröße	keilförmiger Saugschlitz $0 < a \leq +1$	konstanter Saugschlitz $a = 0$	Bemerkungen
Schlitzhöhe	$h_x = h_0 \left(1 - a \frac{x}{l} \right)$	(11) $h_x = h_0$	$a = \left(1 - \frac{h_x}{h_0} \right)$, (11 a)
Schlitzfläche	$A_{Schl} = h_0 l \left(1 - \frac{a}{2} \right)$	(12) $A_{Schl} = h_0 l$	(17) Formkennzahl des Saugschlitzes
relative Geschwindigkeit im Absaugkanal	$\frac{\dot{V}_x}{\dot{V}_1} = \frac{w_{kx}}{w_1} = \frac{\sinh \left[\alpha \frac{x}{l} \left(\frac{1 - \frac{a}{2} \frac{x}{l}}{1 - \frac{a}{2}} \right) \right]}{\sinh \alpha}$	(13) $\frac{w_{kx}}{w_1} = \frac{\sinh \left(\alpha \frac{x}{l} \right)}{\sinh \alpha}$	(18) $w_{kx} = \frac{\dot{V}_x}{A_1}$ Geschwindigkeit im Kanal $w_1 = \frac{\dot{V}_1}{A_1}$
relative Geschwindigkeit im Saugschlitz	$\frac{d(\dot{V}_x/l)}{d(x/l)} = \frac{w_{sx}}{w_0} = \frac{\alpha \left(\frac{1 - \frac{a}{2} \frac{x}{l}}{1 - \frac{a}{2}} \right) \cosh \left[\alpha \frac{x}{l} \left(\frac{1 - \frac{a}{2} \frac{x}{l}}{1 - \frac{a}{2}} \right) \right]}{\sinh \alpha}$	(14) $\frac{w_{sx}}{w_0} = \frac{\alpha \cosh \left(\alpha \frac{x}{l} \right)}{\sinh \alpha}$	(19) w_{sx} Geschwindigkeit im Saugschlitz w_0 mittlere Geschwindigkeit im Saugschlitz $w_0 = \dot{V}_1 / A_{Schl}$
relativer statischer Druck längs der Kanalachse	$\frac{p_a - p_x}{\frac{\rho}{2} w_1^2} = \frac{2 \cosh^2 \left[\alpha \frac{x}{l} \left(\frac{1 - \frac{a}{2} \frac{x}{l}}{1 - \frac{a}{2}} \right) \right]}{\sinh^2 \alpha}$	(15) $\frac{p_a - p_x}{\frac{\rho}{2} w_1^2} = \frac{2 \cosh^2 \left(\alpha \frac{x}{l} \right)}{\sinh^2 \alpha}$	(20) p_a statischer Druck im Außenraum p_x statischer Druck im Querschnitt A_x
relativer statischer Druck längs der Kanalachse	$\frac{p_a - p_x}{p_a - p_1} = \frac{\cosh^2 \left[\alpha \frac{x}{l} \left(\frac{1 - \frac{a}{2} \frac{x}{l}}{1 - \frac{a}{2}} \right) \right]}{\cosh^2 \alpha}$	(15a) $\frac{p_a - p_x}{p_a - p_1} = \frac{\cosh^2 \left(\alpha \frac{x}{l} \right)}{\cosh^2 \alpha}$	(20a) p_1 statischer Druck im Querschnitt A_1
Kanalkennwert	$\alpha = \frac{\sqrt{2} \epsilon A_{Schl}}{\sqrt{1 + \zeta} A_1}$	(16)	ϵ Kontraktionszahl; ζ Widerstandsbeiwert am Schlitz ($\ll 1$)

dargestellt. Dabei bedeuten:
 w_1 Geschwindigkeit im Kanal beim Querschnitt A_1 ($w_1 = \dot{V}_1 / A_1$)
 w_{x0} Geschwindigkeit im Schlitz bei $x = 0$ (wird mit ≤ 10 m/s angenommen)
 w_{sx} Geschwindigkeit im Schlitz ($0 \leq x \leq l$)
 h_x Schlitzhöhe.
 Die Berechnung erfolgt am günstigsten in

Tabellenform (Tafel 3). Die Schlitzhöhe h_0 folgt aus

$$h_0 = \frac{\dot{V}_1}{w_{x0} l}$$

Nach Übergang zu den absoluten Werten x und w_{sx} kann die Schlitzhöhe h_x berechnet werden:
 $w_{x0} h_0 = \text{konst.}$
 $w_{sx} h_x = \text{konst.}$

Saughauben

Pyramiden- oder kegelförmige Lufteinlässe bezeichnet man als Saughauben. Nach ihrer Anordnung unterscheidet man Oberhauben, Unterhauben, Seitenhauben und Wandoberhauben. Saughauben arbeiten dann wirksam, wenn im Raum zwischen der Absaugöffnung und der Schadstoffquelle eine genügend hohe Ansauggeschwindigkeit vorhanden ist, damit die Schadstoffe auch bei Querströmung in die Haube gelangen. Außerdem ist eine hinreichend

Tafel 3. Berechnungstabelle

x/l	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
w_{sx}/w_{x0}	1	I Werte für (w_1/w_{x0}) aus Bild 5 ablesen				

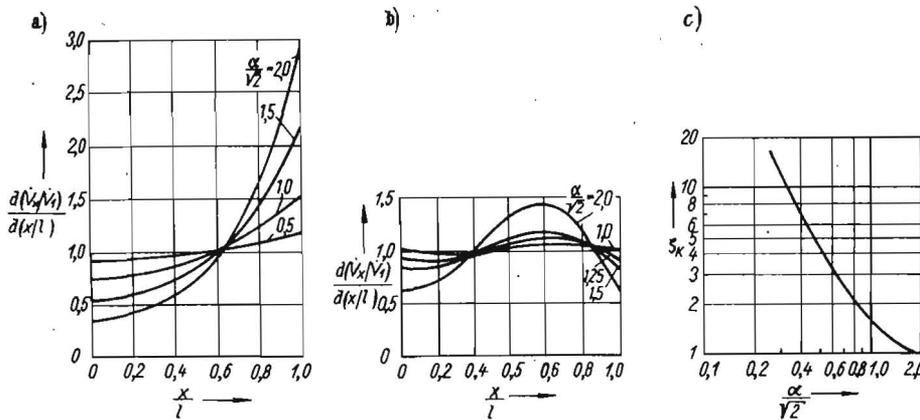


Bild 4. Absaugmengenverteilung und Druckverlustkennziffer; a) Schlitzhöhe konstant; a = 0 b) keilförmiger Saugschlitz; $\cosh \alpha = [1/(1-a)]$ c) Druckverlustkennziffer des Absaugkanals

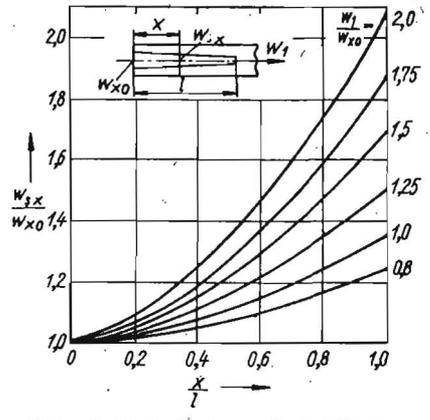


Bild 5. Grafische Auslegung des keilförmigen Saugschlitzes

Tafel 4. Berechnungsformeln für Oberhauben

Berechnungsgröße	Berechnungsformel	Bemerkungen
Geschwindigkeit w in einem beliebigen Punkt unter der Saughaube	$w = w_{y0} \frac{r_0^2}{x^2 + y^2}$	(23) Erfahrungswerte für w_0 bei 4seitig offenen Hauben 0,9...1,25 m/s 3seitig offenen Hauben 0,8...1,1 m/s 2seitig offenen Hauben 0,7...1,7 m/s 1seitig offenen Hauben 0,5...0,8 m/s
Geschwindigkeit für die Achsen I-I und 1-1, die in der Haubenöffnungs-ebene liegen	$w_x = w_{y0} \frac{h^2}{h^2 + x^2}$	(24) $\dot{V} = w_0 \cdot (ab)$ \dot{V} abzugsaugendes Volumen a, b Seitenlängen der Haubenöffnung
Geschwindigkeit für die mittlere Vertikalachse (a)	$w_y = w_{y0} \frac{h^2}{(h+y)^2}$	(25) quadratische Hauben $\alpha = 60^\circ \rightarrow w_{y0} = 1,03 w_0$ $\alpha = 90^\circ \rightarrow w_{y0} = 1,65 w_0$
	$w_y = w_{y0} \frac{h^2}{ h + (\frac{a}{b} - 0,5a) y ^2}$	(26) rechteckige Hauben $\alpha = 60^\circ \rightarrow w_{y0} = 1,09 w_0$ a/b = 2...4

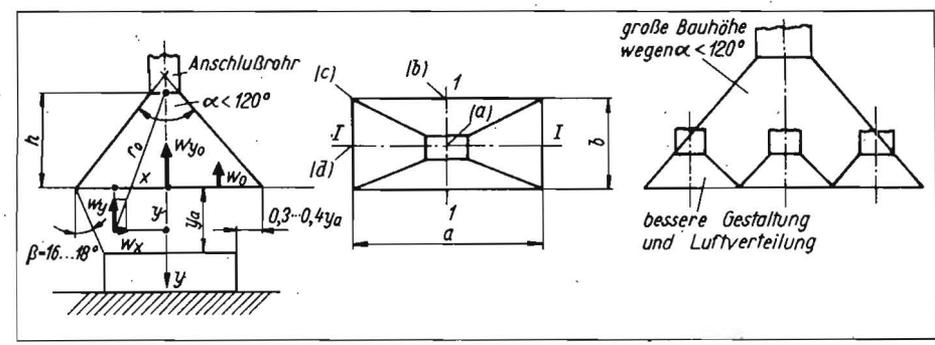


Bild 6. Konstruktive Gestaltung von Oberhauben

gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung über die gesamte Eintrittsfläche der Haube erforderlich. Die Wirksamkeit einer Saughaube hängt somit wesentlich von ihrer konstruktiven Gestaltung ab (Bild 6). Grundsätzlich muß bei der Auslegung folgendes beachtet werden [3, 4]:

- Der Öffnungswinkel der Haube muß $< 120^\circ$ sein, da sonst ein Stau und Rücktransport erfolgen kann.
- Die Haubenfläche soll größer als die darunter befindliche abzugsaugende Fläche sein ($\beta = 16 \dots 18^\circ$).
- Die Saughaube soll so dicht wie möglich an die Schadstoffquelle herangebracht werden.
- Bei großen emittierenden Flächen haben Saughauben wegen $\alpha < 120^\circ$ sehr große

Bauhöhen. Sie sollten in diesem Fall untergliedert werden (Bild 6). Aus experimentellen Untersuchungen [3, 4] lassen sich folgende Schlußfolgerungen ableiten:

- Die Geschwindigkeitsänderung auf der vertikalen Mittelachse (a) hängt vom Öffnungswinkel α der Haube ab und ist von der Höhe h und dem Seitenverhältnis a/b unabhängig. Je größer α ist, desto höher ist die relative axiale Geschwindigkeit. Bei $y/d_{gl} = 0,5$ beträgt $w_y/w_0 = 0,3 \dots 0,4$, bei $y/d_{gl} = 0,9$ beträgt $w_y/w_0 = 0,15$ für alle Hauben:

$$d_{el} = \frac{2ab}{a+b}; w_0 = \frac{\dot{V}}{ab}$$

— In der Ebene der Haubenöffnung hängt die

Geschwindigkeitsänderung ebenfalls vom Öffnungswinkel α ab. Bei gleichem Öffnungswinkel und veränderlicher Haubenhöhe bleibt die Ungleichförmigkeit der relativen Geschwindigkeit auf den Horizontalachsen I-I und 1-1 erhalten.

- Beim Öffnungswinkel $\alpha = 90^\circ$ ist die Geschwindigkeit in der Mitte der Haubenöffnung $1,65 w_0$ und nimmt zu den Rändern hin rasch ab. Bei $\alpha = 60^\circ$ beträgt die Geschwindigkeit in der Haubenmitte annähernd w_0 und bleibt bis zu den Haubenrändern konstant.
- Die Geschwindigkeiten auf den Vertikalachsen (b), (c) und (d) nehmen sehr schnell ab.
- Wenn die Geschwindigkeit w_{y0} bekannt ist (Bild 6), kann für die Praxis die Geschwindigkeitsverteilung der Saughaube berechnet werden.
- Die Widerstandszahl ζ_{ges} hängt vom Öffnungswinkel ab. Bei $\alpha = 60^\circ$ ist $\zeta_{ges} = 0,17$, bei $\alpha = 90^\circ$ ist $\zeta_{ges} = 0,66 \dots 0,8$.

In Tafel 4 sind die Berechnungsformeln für Oberhauben zusammengestellt [3, 4]. Die Berechnung der Seiten- und Unterhauben erfolgt nach den Gleichungen der freien Saugöffnung.

Literatur

- [1] TGL 22310 Arbeitshygiene; Maximal zulässige Konzentration toxischer Stoffe in der Luft am Arbeitsplatz.
- [2] Kleines Lexikon des Arbeitsschutzes. Berlin: Verlag Tribüne 1973.
- [3] Baturin, W. W.: Lüftungsanlagen für Industriebauten. Berlin: VEB Verlag Technik 1959.
- [4] Baturin, W. W.: Fundamentals of Industrial Ventilation. Oxford/New York/Braunschweig: Pergamon Press 1972.
- [5] Recknagel; Sprenger: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. München/Wien: R. Oldenbourg Verlag 1974.
- [6] Drkal, F.: Strömungsverhältnisse bei runden Saugöffnungen mit Flansch. Heizung — Lüftung — Haustechnik 21 (1970) Nr. 8, S. 271—273.
- [7] Drkal, F.: Theoretische Bestimmung der Strömungsverhältnisse bei Saugschlitzten. Heizung — Lüftung — Haustechnik 22 (1971) Nr. 5, S. 167—172.
- [8] Reichardt, H.; Tollmien, W.: Die Verteilung der Durchflußmenge in einem ebenen Verzweigungssystem. Mitteilungen aus dem Max-Planck-Institut für Strömungsforschung Göttingen (1952) Nr. 7.
- [9] Gref, H.: Untersuchungen über die Strömung bei einem in Richtung der Rohrachse verlaufenden Spalt. Schiffstechnik (1955/56) Bd. 3, S. 248—253.
- [10] Regenschiet, B.: Ausblase- und Absaugkanäle lufttechnischer Anlagen. VDI-Berichte (1959) Bd. 34, S. 21—34. A 2130