

# Untersuchung von Torluftschleieranlagen

Teil I: Zweck der Untersuchungen · Theoretische Überlegungen · Versuchsmethode · Meßanlage · Messung eines Freistrahls

Von T. Lajos und L. Preszler

Luftschleieranlagen werden zunehmend in Anwendungsbereichen eingesetzt, bei denen die Durchströmung eines gasartigen Mediums durch einen gegebenen Querschnitt durch keine feste Wand zu verhindern ist. Hierzu gehören Eingänge von Warenhäusern und Kaufhallen sowie im industriellen Bereich Tore von Fertigungshallen.

Die Verfasser gehen im ersten Teil ihres Beitrages zunächst auf die Unterteilung der Luftschleieranlagen und ihre Anwendungsmöglichkeiten ein und berichten dann über den Zweck der Untersuchung, die Versuchsmethode sowie die Anordnung der Meßanlage. Abschließend wird die Messung eines Freistrahls behandelt.

Im zweiten Teil der Arbeit folgen Ausführungen über Vorversuche und ausführliche Messungen einschließlich der Bemessungsmethode und die Untersuchung des Luftschleierbetriebes bei verschiedenen Anordnungen.

DK 624.028.1:621.54:624.028.4

Mit einer Luftschleieranlage wird die durch die Druckdifferenz zwischen den beiden Seiten eines Torquerschnitts und die Außenluftbewegung verursachte Luftströmung in der Weise verhindert, daß zwischen dem äußeren und dem inneren Rand des gekrümmten Strahls eine Druckdifferenz entsteht, die gleich der zu kompensierenden Druckdifferenz ist, mit der ohne Luftschleier eine Strömung durch das Tor erzeugt würde (Bild 1).

Luftschleieranlagen lassen sich nach ihrer Verwendung, nach der Zahl der Luftstrahlen, der Strömungsrichtung des Strahls oder nach dem Luftzustand im Strahl unterteilen. Nach dem Verwendungszweck unterscheidet man Komfort- und Industrieluftschleieranlagen. Zum Einsatzgebiet der ersten Gruppe gehören Warenhäuser, Sporthallen, Theaterfoyers, Bahnhofshallen usw. Mit Hilfe von Industrieluftschleieranlagen werden die Tore von Industriebetrieben, Werkhallen, Kühlhäusern gegen Lufttritt gesperrt, oder es wird verhindert, daß bei bestimmten technologischen Prozessen anfallende schädliche oder heiße Gase durch die Öffnung entweichen.

Dr.-Ing. Tamás Lajos und Dr.-Ing. László Preszler, Technische Universität Budapest, Lehrstuhl für Strömungslehre.

Nach der Zahl der Luftstrahlen unterscheidet man Luftschleieranlagen mit einem oder zwei Luftstrahlen. Die Luftbewegung wird bei der zuerst genannten Möglichkeit durch einen, und bei der letzteren durch zwei oder mehrere Ventilatoren erzeugt.

Auf Bild 2 ist eine Luftschleieranlage mit einem Strahl schematisch dargestellt, die mit einem Axialventilator ausgestattet ist. Sie hat den Vorteil, daß sie auch nachträglich am Gebäudeeingang ohne größere Umbauarbeiten montiert werden kann. Bild 3 zeigt die schematische Darstellung einer Zweistrahl-Luftschleieranlage. Nach der Richtung des Luftstrahls unterscheidet man Anlagen mit vertikaler und mit horizontaler Strömung (seitliche Einbläsung). Die Anlage auf Bild 3 gehört zur ersteren und die auf Bild 2 zur letzteren Art.

## Zweck der Untersuchungen

Seitdem Luftschleieranlagen betrieben werden, sind zahlreiche Veröffentlichungen erschienen, in denen Fragen der Bemessung und der Konstruktion von Luftschleieranlagen behandelt wurden. In mehreren Beiträgen sind auch für die Bemessung von Luftschleiern entwickelte Zusammenhänge dargestellt worden. Diese liefern jedoch voneinander beträchtlich abweichende Ergebnisse und geben im allgemeinen die für den Betrieb dieser Anlagen notwendigen Informationen nicht an.

Die im Fachschrifttum beschriebenen Bemessungsverfahren lassen sich nach ihrem Ausgangspunkt wie folgt ableiten:

1. aus der Superposition von Strömungen
2. aus dem Impulssatz
3. aus der kinetischen Energie des Strömungsmediums
4. aus empirischen Grunddaten.

Zu 1: Nach dem von I. A. Schepelew ausgearbeiteten Verfahren [1; 2] läßt sich die das Strömungsbild des Luftschleiers beschreibende Stromfunktion  $\Psi = \Psi(x, y)$  als Superposition der Stromfunktion  $\Psi_1$  eines mit der Torebene einen Winkel  $\beta$  bildenden freien Strahls und der Stromfunktion  $\Psi_2$  einer auf das Tor senkrechten Parallelströmung herstellen, die der durch Druckdifferenz bzw. Windwirkung entstehenden Strömung entspricht. Aus dem so erhaltenen Strömungsbild können die Parameter des Luftschleiers bei vollem bzw. teilweise Querschnittsabschluß ermittelt werden.

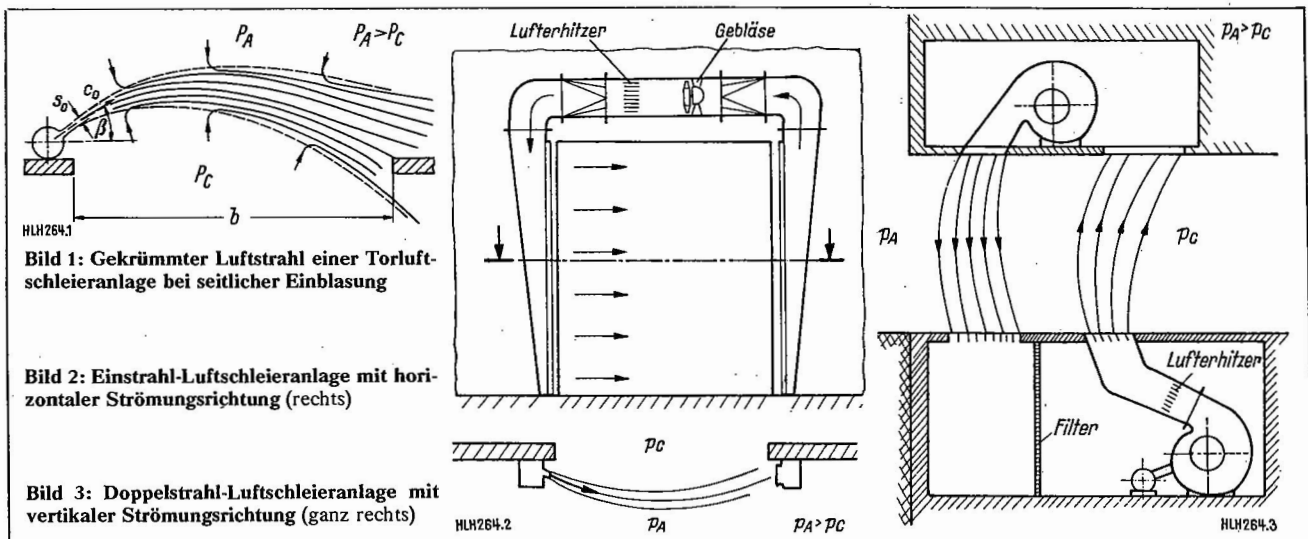


Bild 1: Gekrümmter Luftstrahl einer Torluftschleieranlage bei seitlicher Einbläsung

Bild 2: Einstrahl-Luftschleieranlage mit horizontaler Strömungsrichtung (rechts)

Bild 3: Doppelstrahl-Luftschleieranlage mit vertikaler Strömungsrichtung (ganz rechts)

Diese Methode ist jedoch mit Schwierigkeiten verbunden, die ihre Zuverlässigkeit bedenklich erscheinen lassen. Es ist leicht festzustellen, daß sich die zeitliche Änderung der Bewegungsgröße des aus der Superposition erhaltenen, gekrümmten Freistrahls in Abhängigkeit von dem Abstand von der Ausblasestelle ständig ändert. Durch die Superposition sind die Randbedingungen der Strömung, vor allem die Berücksichtigung der Wand gegenüber dem Ausblasespalt, nicht gewährleistet. Weitere Probleme ergeben sich durch die Superposition des wirbelbehafteten Freistrahls-Strömungsbildes, auf die hier jedoch nicht eingegangen wird.

Zu 2: Die aus dem Impulssatz abgeleiteten Methoden scheinen am besten fundiert zu sein. Die in dieser Weise erhaltenen Zusammenhänge weichen jedoch auch voneinander ab.

- a) Von Köhler und Gruhn [3] wird die Druckdifferenz zwischen den beiden Seiten des Luftschleiers außer acht gelassen.
- b) Fekete [4] nimmt an, daß sich der Strahl in zu der Torebene paralleler Richtung umkehrt, doch berücksichtigt er auch die Druckdifferenz.
- c) In den Veröffentlichungen von Mott [5] und Danielson [6] wird angenommen, daß die zeitliche Änderung der Bewegungsgröße des gekrümmten Freistrahls in allen Querschnitten konstant sei. Auf diese Weise läßt sich die auf die Torebene senkrechte Komponente des Vektors, der die zeitliche Änderung der Bewegungsgröße des Strahls ausdrückt, zweimal berücksichtigen. (Der Strahl gelangt unter einem dem Ausblaseswinkel gleichen Winkel zu der dem Ausblasen gegenüberliegenden Torseite.)
- d) Die von Elterman [9] mitgeteilte Bemessungsgleichung kann wegen der bei der Ableitung gemachten Annahmen nur bei teilweisem Schließen des Tores mit einem Luftschleier benutzt werden. (In der Bemessungsgrundgleichung kommt die für den Lufteintritt durch das Tor kennzeichnende Durchflußzahl vor, die bei vollständigem Schließen keine Rolle spielt.)

Zu 3: Der aus dem Gleichgewicht der kinetischen Energie ausgehende Gedankengang [7] scheint verfehlt zu sein, da die kinetische Energie nicht als Vektorgröße behandelt werden kann.

Zu 4: Empirische Zusammenhänge wurden vor allem für warme Luftschleier ausgearbeitet [8], wobei gewisse Probleme der Warmluftausblasung und nicht die Strömungsparameter berücksichtigt werden.

Von den in der zur Verfügung stehenden Literatur angeführten Methoden geben auch die, die am besten begründet scheinen (siehe Zu 2: Absatz c und d), keinen befriedigenden Anhaltspunkt für die Bemessung und den Entwurf von wirtschaftlichen Luftschleieranlagen, da

- die Wirkung der dem Ausblasespalt gegenüberliegenden Wand unberücksichtigt bleibt, was zu ungenauen Ergebnissen führt;
- diese Verfahren bei völligem oder teilweisem Schließen des Tores nicht brauchbar sind und
- keinen Aufschluß über den Betrieb der Luftschleieranlage unter vom Bemessungspunkt abweichenden Bedingungen geben.

Aus den vorgenannten Gründen hielten es die Verfasser für erforderlich, eine theoretische und experimentelle Arbeit zu erstellen und aus deren Ergebnis eine umfassendere, auch die strömungstechnischen und Konstruktionsparameter der Torluftschleieranlage mit seitlicher Einblasung berücksichtigende Bemessungsmethode zu entwickeln.

### Theoretische Überlegungen

Gegeben sei ein kalter Luftschleier für die Absperrung eines Tores mit dem Querschnitt  $b \cdot h$ , wobei  $h$  die Länge der Ausblaseöffnung des Luftschleiers ist. Weiterhin bedeutet  $s_0$  die Strahlbreite beim Ausblasen in m,  $c_0$  die Austrittsgeschwindigkeit in m/s,  $\rho_0$  die Dichte der austretenden Luft in kg/m<sup>3</sup>. Es ist eine Druckdifferenz zwischen beiden Seiten des Tores von  $\Delta p$  in N/m<sup>2</sup> zu überwinden. Der Eintritt der Außenluft in den geschützten Raum wird durch den Luftschleier verhindert.

Die Strömung (als ebene Strömung betrachtet) wird nach der Eulerschen Gleichung im natürlichen Koordinatensystem für einen beliebigen Querschnitt  $y_B$  des gekrümmten Luftstrahls

#### Formelzeichen

- $x$  Koordinate parallel zur Ausblaseöffnung
- $y$  Koordinate parallel zur Ausblasegeschwindigkeit
- $z$  Koordinate senkrecht auf die Ausblasegeschwindigkeit und die Ausblaseöffnung
- $b$  Torbreite (Abmessung in Strahlrichtung)
- $h$  Torhöhe (Abmessung in Ausblaseöffnungsrichtung)
- $s_0$  Ausblaseöffnungsbreite
- $R$  Krümmungsradius der Stromlinie
- $\beta$  Ausblaseswinkel (der durch die Torebene und die Strahlachse gebildete Winkel auf der Ausblasestelle) in °
- $c$  Luftgeschwindigkeit im Strahl
- $w$  Mittlere Luftgeschwindigkeit in auf die Torebene senkrechter Richtung
- $p_A$  Absoluter Druck im Überdruckraum
- $p_C$  Absoluter Druck im Unterdruckraum
- $\Delta p$  Differenz der Drücke beiderseits des Luftschleiers
- $\rho$  Dichte in kg/m<sup>3</sup>
- $\nu$  kinematische Viskosität in m<sup>2</sup>/s
- $Q$  Volumenstrom in m<sup>3</sup>/s
- $P'$  Leistung je m Länge der Ausblaseöffnung in W/m
- $\alpha$  Durchflußzahl
- $t$  Lufttemperatur in °C
- $H$  Höhe
- $l$  Abmessung des Vordachs
- $m$  für die Lage der der Ausblasestelle gegenüber angeordneten Wand kennzeichnende Abmessung
- $n$  Abmessung des Spalts zwischen Wand und Luftschleier in m
- $A$  Fläche in m<sup>2</sup>

$$D = \frac{\Delta p}{\frac{\rho_0}{2} c_0^2} \quad \text{Druckverhältnis}$$

$$W = \frac{w}{\sqrt{\frac{2}{\rho_0} \Delta p}} \quad \text{dimensionslose Einströmemenge}$$

$$B = b/s_0 \quad \text{relative Breite}$$

$$Re = \frac{c_0 s_0}{\nu_0} \quad \text{Reynoldszahl}$$

$$C_1, C_2, C_3, C'_1, C'_2 \quad \text{Konstanten}$$

$$L = D^{3/2} B \quad \text{Leistungsverhältnis}$$

$$L_1, M, F \quad \text{dimensionslose Maße}$$

$$k, K \quad \text{Beiwerte}$$

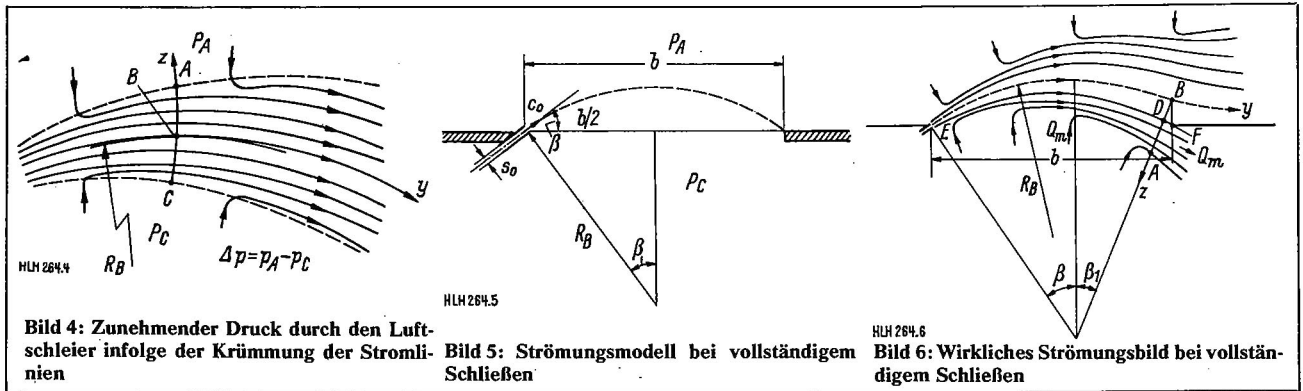
#### Indizes

0 auf den Ausblasequerschnitt bezogene Größe; bei dimensionslosen Größen der Wert für vollständiges Schließen

i innen

a außen

w die auf des Tor senkrechte Komponente der Außenluftbewegung



(Bild 4) in der auf die Stromlinien senkrechten Richtung  $z$  beschrieben:

$$\frac{dp}{dz} = \rho \frac{c^2}{R} \quad (1)$$

wobei  $R$  der Krümmungsradius der Stromlinie in m ist. Nach Trennung wird die Differenzialgleichung (1) den die Punkte  $C$  und  $A$  verbindenden, auf die Stromlinien in jedem Punkt senkrechten Kurvenabschnitt entlang integriert:

$$\Delta p = p_A - p_C = \int_C^A \rho \frac{c^2}{R} dz \quad (2)$$

Es sei  $R_B$  der Krümmungsradius in m der durch den Punkt  $B$  durchgehenden Stromlinie. Für Punkt  $B$  gilt:

$$\int_C^B \rho c^2 dz = \int_B^A \rho c^2 dz$$

Den Bogen  $AC$  entlang ändert sich der Wert des Krümmungsradius  $R$ . Da — das Quadrat der Geschwindigkeit (dem  $\frac{dp}{dz}$  proportional ist)

- von Punkt  $B$  zu den Punkten  $A$  bzw.  $C$  schnell abnimmt;
- die Bogenlänge  $AC$  im Vergleich zu  $R_B$  klein ist;
- bei  $z > z_B R/R_B > 1$  und bei  $z < z_B R/R_B < 1$  ist, d.h. sich die aus der Näherung entstehenden Fehler zum Teil ausgleichen, ist anzunehmen, daß man keinen großen Fehler begeht, wenn man in einem gegebenen Querschnitt  $y_B$  die Größe des Krümmungsradius  $R$  als konstant betrachtet:

$$R \approx R_B = \text{konstant.}$$

Damit lautet Gl. (2):

$$\Delta p \approx \frac{1}{R_B} \int_C^A \rho c^2 dz \quad (3)$$

Das Integral auf der rechten Seite von Gl. (3) ist gleich der zeitlichen Änderung der Bewegungsgröße in einem gegebenen Querschnitt des Strahls von Einheitsdicke.

In erster Näherung sei angenommen, daß der Zusammenhang für ebene, gerade Freistrahlen

$$\int_A \bar{c} \rho \bar{c} d\bar{A} = \text{konstant}$$

auch für infolge der Druckdifferenz gekrümmte Freistrahlen gilt, d.h. daß die zeitliche Änderung der Bewegungsgröße in jedem Freistrahls-Querschnitt konstant sei.

Diese Annahme liefert bei ebenen Freistrahlen mit gerader Achse eine gute Näherung, da ja der Druck in den verschiedenen Querschnitten des Freistrahls praktisch gleich dem Außendruck ist. Bei einem Luftschleier ändert sich der Druck dem Querschnitt des Freistrahls entlang; daher kann die genannte Annahme nur näherungsweise gelten. Die Richtigkeit der Näherung läßt sich im Versuch nachweisen.

Dem Ansatz gemäß gilt also

$$\int_C^A \rho c^2 dz = \text{konstant} = \rho_0 c_0^2 s_0 \quad (4)$$

Vergleicht man die Gleichungen (3) und (4), gilt

$$\Delta p = \frac{\rho_0 c_0^2 s_0}{R_B}, \text{ d.h.} \quad (5)$$

$$R_B = \frac{\rho_0 c_0^2 s_0}{\Delta p}$$

Gl. (5) sagt aus, daß die Krümmung des Luftschleierstrahls unabhängig vom Abstand von der Ausblasestelle, von dem Turbulenzgrad an der Ausblasestelle und von der Dichteänderung des Strömungsmediums konstant ist. (Durch den Strahl wird an beiden Seiten Luft mitgerissen, daher ändert sich die Dichte des Strömungsmediums in Abhängigkeit von dem Abstand von der Ausblaseöffnung.)

Auf Bild 5 ist ein Tor der Breite  $b$  dargestellt. Aus dem Spalt der Breite  $s_0$  in der Torebene wird ein Strahl mit einer Geschwindigkeit  $c_0$ , der mit dieser Ebene einen Winkel  $\beta$  bildet, ausgelassen. Die im Vorstehenden bestimmte Achse des Strahls wurde mit gestrichelter Linie eingezeichnet.

Nach dem vereinfachten Modell wird geschrieben:

$$b = 2 \cdot R_B \cdot \sin \beta$$

Das ergibt unter Anwendung von Gl. (5)

$$b = 2 \frac{\rho_0 c_0^2 s_0}{\Delta p} \cdot \sin \beta \quad (6)$$

Nach Umordnen der Gl. (6) und Einführung von dimensionslosen Größen kann man schreiben:

$$B = \frac{4}{D_0} \cdot \sin \beta \quad (7)$$

Hierin ist:

$B = \frac{b}{s_0}$  die mit Hilfe der Anfangsbreite des Strahls auf dimensionslose Form gebrachte Torbreite.

$D_0 = \frac{\Delta p}{\frac{\rho_0}{2} c_0^2}$  die mit Hilfe des mit der Ausblasegeschwindigkeit berechneten dynamischen Drucks auf dimensionslose Form gebrachte Druckdifferenz bei geschlossenem Tor.

Im Sinne von Bild 5 bezieht sich Gl. (7) auf den Fall, bei dem durch die Strahlachse die beiden Torkanten verbunden werden.

Bei vollständigem „Abschließen“ des Tores mit Hilfe eines Luftschleiers weichen jedoch die Strömungsverhältnisse von dem in der Abbildung dargestellten Modell ab (Bild 6):

1. Ein kleinerer Teil des im Luftschleier strömenden Mediums, den der Strahl aus der Raumluft mitgerissen hat, muß in den Raum zurückkehren.

2. Der andere Teil des Strömungsmediums strömt auf der dem Ausblasen entgegengesetzten Seite die Wand entlang weiter, wobei er beim tornahen Teil der Wand einen örtlichen Druckanstieg verursacht, wie es aus der Krümmung der Stromlinien zu erkennen ist.

Auch aus den vorstehenden Ausführungen folgt, daß Gl. (7) nur als erste Näherung gelten darf. Wird an Stelle der Konstante mit dem Wert 4 eine von den Luftschleierparametern abhängige Konstante  $K$  eingesetzt, erhält man

$$B = \frac{K}{D_0} \cdot \sin \beta \quad (8)$$

wobei der Wert für  $K$  experimentell bestimmt wird.

Wegen der verwickelten Strömungsverhältnisse läßt sich lediglich die Tendenz der Abhängigkeit der Konstante  $K$  von  $\beta$  und  $B$  ermitteln.

Mit den Bezeichnungen auf Bild 6 wird nunmehr Gl. (7) in der folgenden Form geschrieben:

$$B = \frac{2}{D_0} (\sin \beta + \sin \beta_1) \quad (9)$$

Die aus der Raumluft die Linie  $\overline{EA}$  entlang mitgerissene Menge  $Q_m$  strömt den Abschnitt  $\overline{AD}$  entlang in den Raum zurück. Vorausgesetzt, daß sich die Zusammenhänge für den ebenen geraden Freistrahл zumindest qualitativ auch auf den vorliegenden Fall anwenden lassen, schreibt man:

$$\int_B^D c \, dz = \frac{c_0 s_0}{2}$$

In die übliche dimensionslose Form gebracht, ergibt sich

$$c_{\max} z_{1/2} \int_0^{\overline{BD}/z_{1/2}} \left( \frac{c}{c_{\max}} \right) d \left( \frac{z}{z_{1/2}} \right) = \frac{c_0 s_0}{2} \quad (10)$$

Hierin ist:

$c_{\max}$  die Höchstgeschwindigkeit im gegebenen Querschnitt in m/s.

$z_{1/2}$  der Abstand des durch die Geschwindigkeit  $c_{\max}/2$  gekennzeichneten Punktes von der Strahlachse in m.

Wird berücksichtigt, daß

$$\frac{c_{\max}}{c_0} \cong \frac{C_1}{\sqrt{\frac{y}{s_0}}} \quad \text{und} \quad \frac{z_{1/2}}{s_0} \cong C_2 \frac{y}{s_0} \quad \text{ist,}$$

kann man wie folgt schreiben:

$$\int_0^{\overline{BD}/z_{1/2}} \left( \frac{c}{c_{\max}} \right) d \left( \frac{z}{z_{1/2}} \right) \cong \frac{1}{2 \frac{C_1}{\sqrt{\frac{y_B}{s_0}}} C_2 \frac{y_B}{s_0}} = \frac{C_1'}{\sqrt{\frac{y_B}{s_0}}}$$

wobei  $C_1, C_1'$ , und  $C_2$  Konstanten sind.

Da in einer nicht allzu großen Entfernung von der Strahlachse annähernd

$$\int_0^{z/z_{1/2}} \left( \frac{c}{c_{\max}} \right) d \left( \frac{z}{z_{1/2}} \right) \cong C_2 \frac{z}{z_{1/2}}$$

gilt, ergibt sich für die Strecke  $\overline{BD}$ :

$$\overline{BD} = C_3 s_0 \sqrt{\frac{y_B}{s_0}}$$

Unter den Bedingungen auf Bild 6 mit den Näherungen  $\overline{BD} \cong \overline{BF}$  und  $y_B \cong b$  ist

$$R_B/1 - \cos \beta \cong R_B/1 - \cos \beta_1 + \overline{BD} \quad (11)$$

Nach Umordnung des Zusammenhangs (11) erhält man

$$\cos \beta_1 = \cos \beta + \frac{C_3}{R_B} s_0 \sqrt{\frac{b}{s_0}} \quad (12)$$

Nach Bild 6 darf auch geschrieben werden:

$$R_B \cdot (\sin \beta + \sin \beta_1) = b \quad (13)$$

Löst man das Gleichungssystem mit zwei Unbekannten (12), (13) auf, erhält man als Ergebnis:

$$\sin \beta + \sin \beta_1 = \frac{2 \left( \sin \beta - C_3 \cos \beta \frac{1}{\sqrt{B}} \right)}{1 + \frac{C_3^2}{B}} \quad (14)$$

Aus dem Vergleich der Gleichungen (8) und (9) ergibt sich für den Faktor  $K$ :

$K \cdot \sin \beta = 2 (\sin \beta + \sin \beta_1)$ , d.h. unter Heranziehung von Gl. (14):

$$K = 4 \frac{1 - \frac{C_3}{\operatorname{tg} \beta \sqrt{B}}}{1 + \frac{C_3^2}{B}} \quad (15)$$

Es ist zu erkennen, daß  $K$  um so kleiner ist, je kleiner der Wert von  $B$  ausfällt, und daß mit zunehmendem  $\beta$  bei einem gegebenen  $B$ -Wert die Größe  $K$  zunimmt.

## Versuchsmethode

Der im vorigen Abschnitt beschriebene Gedankengang beruht auf mehreren Annahmen. Daher schien es für die Ausarbeitung einer Bemessungsmethode von befriedigender Genauigkeit notwendig, die Wirkung der einzelnen Parameter auf dem Versuchsweg zu untersuchen. Der für eine gegebene Druckdifferenz  $\Delta p$  bemessene Luftschleier sperrt das Tor nicht vollkommen, wenn die Druckdifferenz einen Wert über dem Bemessungswert erreicht. Die Versuche waren auch deshalb erforderlich, weil die im vorigen Abschnitt behandelten Lösungen über die in einem solchen Falle einströmende Luftmenge keinen Aufschluß geben.

Vernachlässigt man bei Luftschleieranlagen mit seitlicher Kaltlufteinblasung die Wirkung der aus der unterschiedlichen Dichte entstehenden Auftriebskraft, kommen folgende Parameterwerte vor:

Torhöhe  $h$  in m

Länge der Ausblaseöffnung der Luftschleieranlage  $h'$ , in m

Torbreite  $b$  in m

Ausblasespaltbreite  $s_0$  in m

Dichte der Ausblaseluft  $\rho_0$  in  $\text{kg/m}^3$ , die gleich der Dichte der Außenluft  $\rho_a$  ist

Luftdichte im geschützten Innenraum  $\rho_i$  in  $\text{kg/m}^3$

Ausblasegeschwindigkeit  $c_0$  in m/s

kinematische Viskosität der Ausblaseluft  $\nu_0$  in  $\text{m}^2/\text{s}$

Ausblasewinkel  $\beta$  in  $^\circ$

mittlere Geschwindigkeit der den Torquerschnitt durchströmenden Luft  $w$  in m/s

Druckdifferenz zwischen den beiden Seiten des Luftschleiers

$\Delta p$  in  $\text{N/m}^2$ .

Aus diesen elf Veränderlichen können nach den Regeln der Dimensionsanalyse acht dimensionslose Gruppen gebildet werden:

$$\pi_1 = h/s_0, \quad \pi_2 = h'/s_0, \quad \pi_3 = b/s_0, \quad \pi_4 = \frac{\Delta p}{\frac{\rho_0}{2} c_0^2},$$

$$\pi_5 = \frac{w}{\sqrt{\frac{2}{\rho_0} \Delta p}}, \pi_6 = \frac{c_0 s_0}{v_0}, \pi_7 = \rho_i / \rho_0, \pi_8 = \beta.$$

Bei den hier behandelten Versuchen wurde angestrebt, eine zweidimensionale Strömung zu erhalten. Daher spielten die Gruppen  $\pi_1$  und  $\pi_2$  praktisch keine Rolle. Erfahrungsgemäß bleibt das Verhalten von turbulenten Freistrahlen zwischen breiten Reynoldszahl-Grenzen unverändert, daher kann von Gruppe  $\pi_6$  als Parameter abgesehen werden. Bei den durchgeführten Messungen betragen die Werte der Reynoldszahl

$$Re = \frac{c_0 s_0}{v_0} \geq 104.$$

$\rho_i / \rho_0$  hatte bei den Versuchen den Wert 1. Infolge der Eigenschaften der Freistrahlen ist bei der Kaltluftschleieranlage mit seitlicher Einblasung anzunehmen, daß die Gruppe  $\pi_7$  keine wesentliche Rolle spielt.

Beim Versuch wurde der funktionelle Zusammenhang zwischen folgenden Parametern untersucht:

$$W = \frac{w}{\sqrt{\frac{2}{\rho_0} \Delta p}}, D = \frac{\Delta p}{\frac{\rho_0}{2} c_0^2}, B = \frac{b}{s_0}, \beta.$$

Der Faktor  $K$  in der abgeleiteten Beziehung (8) läßt sich bei geschlossenem Tor mit den dimensionslosen Faktoren in der folgenden Form ausdrücken:

$$K = \frac{B \cdot D_0}{\sin \beta} \quad (16).$$

Ein wichtiger Parameter ist weiterhin die für die Erzeugung eines Luftstrahles von 1 m Breite erforderliche Leistung  $P_L$  in Watt/m:

$$P_L = \frac{\rho_0}{2} c_0^3 s_0 \quad (17).$$

Im folgenden wird nun das definierte Leistungsverhältnis  $L$  eingeführt:

$$L = \frac{1}{\alpha_T} \left| \frac{P_c'}{P_L} \right| = \frac{Q_T \Delta p}{\alpha_T P_L} = \frac{\sqrt{\frac{2}{\rho_0} \Delta p} b \Delta p}{P_L} \quad (18),$$

wobei  $Q_T$  das ohne Luftschleier durch einen 1 m hohen Torabschnitt in der Zeiteinheit einströmende Luftvolumen in  $m^3/sm$  und  $\alpha_T$  die Durchflußzahl bedeutet.

$L$  ist proportional dem Quotienten aus der kinetischen Energie der in der Zeiteinheit ohne Luftschleieranlage einströmenden

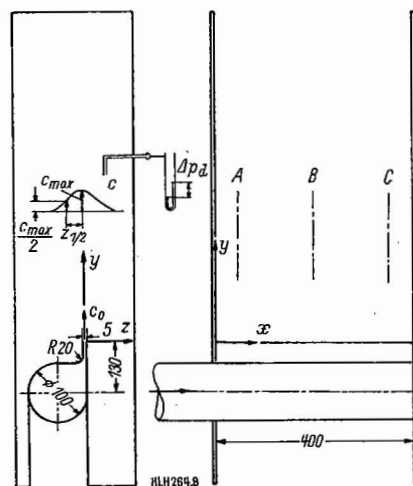


Bild 8: Schematische Darstellung der Freistrahlmessung

Luftmasse  $P_c'$  und aus der für den Betrieb der Luftschleieranlage erforderlichen Leistung  $P_L$ . Der Proportionalitätsfaktor  $1/\alpha_T$  ist der Reziprokwert der Durchflußzahl der Einströmung durch das Tor.

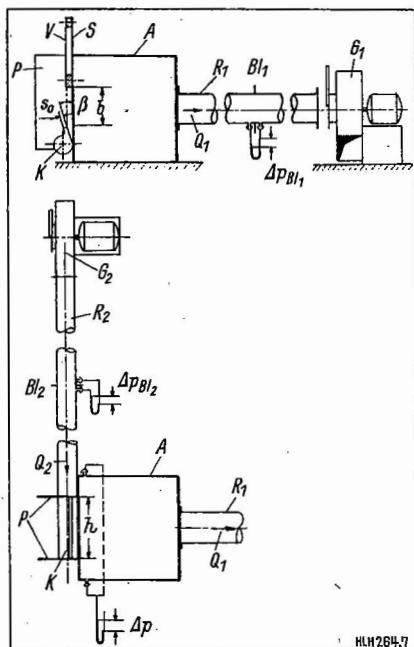
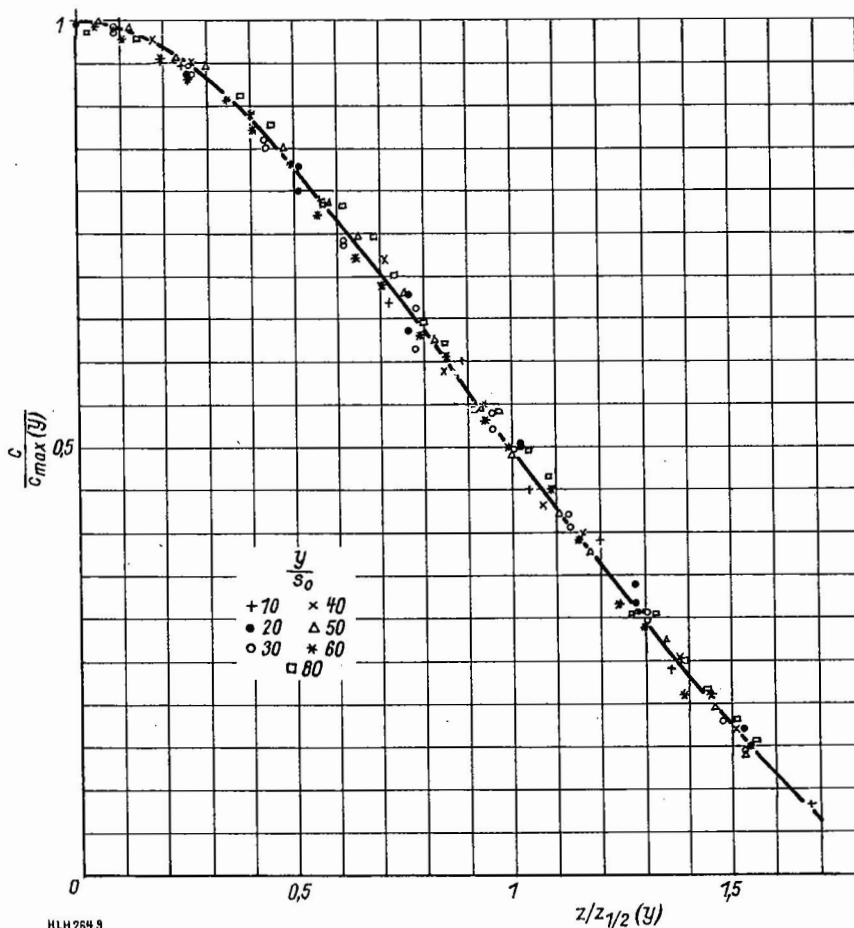


Bild 7: Schematische Darstellung der Meßeinrichtung

Bild 9: Dimensionslose Geschwindigkeitsverteilung in verschiedenen Querschnitten des ebenen Freistrahls





Setzt man Gl. (17) in (18) ein, erhält man

$$L = \frac{\sqrt{\frac{2}{\rho_0} \Delta p \Delta p b}}{\frac{\rho_0}{2} c_0^3 s_0} \quad (19)$$

Wird Gl. (19) in dimensionsloser Form ausgedrückt, ergibt sich

$$L = D^{3/2} B \quad (20)$$

Aus der Definition der Größe  $L$  folgt, daß der Energiebedarf des für gegebene Parameter  $\Delta p, b, \rho_0$  entworfenen Luftschleieranlage um so kleiner sein wird, je größer  $L$  ist.

Aus Gl. (20) folgt, daß der Leistungsbedarf, der erforderlich ist, um ein Tor mit einem Luftschleier zu sperren, der Torbreite (und Höhe) sowie der  $3/2$ -Potenz der Druckdifferenz proportional ist.

### Meßanlage

Um den Betrieb der Luftschleieranlage zu untersuchen, wurden Modellversuche durchgeführt. Die Versuchsanlage ist auf *Bild 7* schematisch dargestellt. Der durch einen Luftschleier geschützte Innenraum wurde mit Hilfe des Kastens *A* modelliert, in dessen Wand eine Öffnung der Länge  $h = 0,4$  m angeordnet ist und dessen Breite  $b$  durch die Lage der verschiebbaren Platte *S* bestimmt wird. An die andere Seite des Kastens ist das Rohr  $R_1$  mit eingebauter Blende  $Bl_1$  für die Messung des Volumenstroms  $Q_1$  angeschlossen.

Parallel zu der Seite der Länge  $h$  der Öffnung von  $h \times b$  ist ein Spalt der Breite  $s_0$  vorgesehen, aus dem ein ebener Luftstrahl mit der Geschwindigkeit  $c_0$  austritt, der mit der Torebene einen Winkel  $\beta$  bildet. Der im ebenen Luftstrahl ausströmende Volumenstrom  $Q_2$  wurde mit Hilfe der im Rohr  $R_2$  angeordneten Blende  $Bl_2$  gemessen.

Der ebene Luftstrahl ist durch die Platten *P* begrenzt. Auf die in senkrechter Richtung verschiebbare Platte *S* war mit Hilfe von Abstandhaltern die Vorderplatte *V* befestigt, deren Ebene bei allen Ausblasewinkeln  $\beta$  durch die neben dem Kasten liegende Ausblaseöffnungskante durchging (*Bild 7*). Der Unterdruck  $\Delta p$  im Kasten sowie die Druckdifferenzen zwischen den beiden Seiten der Blenden  $\Delta p_{Bl_1}, \Delta p_{Bl_2}$  wurden mit Betzschens Mikromanometern gemessen.

Der Volumenstrom  $Q_1$  wurde mit Hilfe eines Ventilators  $G_1$  abgesaugt, wobei die Regelung des Volumenstroms mit einem Beipaß in der dargestellten Weise geschah. Der Luftstrahl der Luftschleieranlage wurde durch den Ventilator  $G_2$  erzeugt und der Volumenstrom  $Q_2$  durch Drosselung auf der Ansaugseite geregelt.

Bei den Messungen wurden  $h$  und  $s_0$  (d.h. die Öffnungslänge und die Breite des Ausblasestrahls) konstant gehalten und  $Q_2$  in geringem Maße verändert. Nach Einstellen von  $\beta$  und dem nächsten  $b$ -Wert wurde durch die Regelung des Ventilators  $G_1$  der Unterdruck  $\Delta p$  in dem Kasten geändert und das durch die Öffnung mit den Abmessungen  $h \times b$  auf Wirkung des Unterdrucks in der Zeiteinheit einströmende Luftvolumen gemessen.

### Messung des ebenen Freistrahls

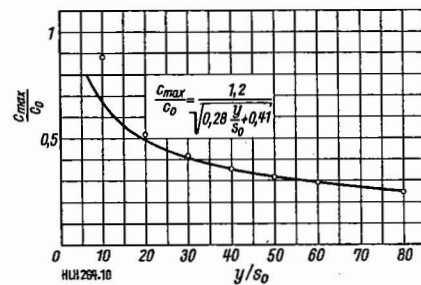
Bevor die Modellversuche begannen, wurden Messungen durchgeführt, um den Betrieb des Verteilungskanals (*Bild 7*, Ziffer *K*) und die kennzeichnenden Eigenschaften des aus dem Kanal austretenden Freistrahls zu prüfen. *Bild 8* zeigt die Versuchsanordnung für Freistrahlmessung. Die Geschwindigkeitsverteilung im Freistrahls wurde mit einer Gesamtdrucksonde in den Querschnitten *A, B* und *C* des Verteilerkanals in den Abständen  $y/s_0 = 0,4$  und 20 sowie im Querschnitt *B* in den Abständen  $y/s_0 = 0,4, 10, 20, 30, 40, 50, 60$  und 80 gemessen.

Aufgrund der Meßergebnisse lassen sich folgende Feststellungen machen:

1. Die Meßwerte des für die zeitliche Änderung der Bewegungsgröße des Strömungsmediums im Strahl kennzeichnenden Integrals  $\int \rho c^2 dz$  in den Querschnitten *A, B* und *C* (*Bild 8*) wichen verhältnismäßig wenig voneinander ab, die Differenz zwischen dem Höchst- und dem Mindestwert lag nicht über 15% des Mittelwertes. Die Änderung der Ausblasegeschwindigkeit  $c_0$  überschritt nicht 3% der Durchschnittsgeschwindigkeit. Daher konnte man die Strömung im Freistrahls annähernd als ebene Strömung betrachten.
2. Bei den im Querschnitt *B* in verschiedenen Abständen  $y/s_0$  gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen (in der üblichen Weise auf eine dimensionslose Form gebracht) fielen die Meßpunkte im Bereich  $y/s_0 \geq 10$  praktisch auf dieselbe Kurve, die der im Schrifttum für einen flachen Freistrahls angegebenen Kurve entspricht (*Bild 9*). Bekanntlich wird das Verhältnis der Höchstgeschwindigkeiten in verschiedenen Schnitten  $y$  eines ebenen Freistrahls zu der Ausblasegeschwindigkeit wie folgt beschrieben [1]:

$$\frac{c_{\max}(y)}{c_0} = \frac{1,2}{\sqrt{\frac{a y}{s_0} + 0,41}} \quad (21)$$

wobei  $a$  eine von dem Turbulenzgrad abhängige Konstante ist.



**Bild 10:** Änderung der Maximalgeschwindigkeit im ebenen Freistrahls in Abhängigkeit vom Abstand der Ausblaseöffnung

Wie auf *Bild 10* zu erkennen ist, ergab sich im vorliegenden Falle der Wert der Konstante zu  $a = 0,28$ .

3. Anhand der Messungen konnte die Ausblaserichtung genau festgestellt werden, daher wurde im weiteren der Ausblasewinkel  $\beta$  nicht aus der Geometrie der Ausblaseöffnung bzw. des -kanals, sondern nach der wirklichen Ausblaserichtung bestimmt.

### Schrifttum

- [1] *Baturin, W. W.*: Lüftungsanlagen für Industriebauten. VEB Verlag Technik, Berlin 1953.
- [2] *Schmidt, K.*: Luftschleier für Kaufhäuser und Industriebetriebe, Installateur, Klempner, Zentralheizungsbauer. 18 (1963). 17. 1244 bis 1248.
- [3] *Köhler, K., und G. Gruhn*: Theoretische Untersuchungen zur Berechnung und wirtschaftlichen Auslegung von Luftschleieranlagen. Energietechnik 12 (1962) Nr. 5, S. 205 bis 215.
- [4] *Fekete, K.*: Luftschleiertüren. Gesundheits-Ingenieur 88 (1967) Nr. 4, S. 122 bis 124.
- [5] *Mott, L. F.*: Design for protection by air curtain H. and A. C. 28 (1962) Nr. 2, S. 164 bis 166.
- [6] *Danielson, P. O.*: Luftriader och luftportar Tidskr. VVS. 43 (1972) Nr. 7, S. 21 bis 26.
- [7] *Küken, H.*: Zur Praxis der Planung und Berechnung von Lufttüren. Gesundheits-Ingenieur 85 (1964) Nr. 12, S. 360 bis 362.
- [8] *Kläusler, J.*: Luftschleusen für Geschäfts- und Warenhäuser. Gesundheits-Ingenieur 79 (1958) Nr. 10, S. 296 bis 299.
- [9] *Eltermann, V. M.*: Vozdusnie zaveszi Izdatel'stvo „Masinoszrojenie“. Moszkva 1966. 1 bis 164. [H 264a]

# Alles Sperrige: Ruck-zuck- verpackt



Gleichgültig, wie Ihr Produkt aussieht: Die Schrumpfer von A & B bringen Ihre Produkte sekundenschnell unter die Haube. Für wenige Pfennig - ohne großen Aufwand. A & B - mobile und stationäre Haubenschrumpfer - für jede Verpackungs-Kapazität. Fordern Sie Unterlagen an!

Ahrendt + Birkendahl oHG  
Herstellung und Modifikation von Verpackungsmaschinen  
5144 Wegberg/Rhld.  
Zur Kringsmühle 7  
Telefon: (0 24 34) 35 81-82  
Telex 8 329 818

HOGRA

Gültig ist die  
Preisliste Nr. 16  
v. 1. Sept. 1974

**WILLBRANDT**  
GUMMI  
EUROPA-  
KOMPENSATOREN  
D2 Hamburg 54  
Telefon: 040/540 4034  
Telex: 215 144

**Sanitär**  
Typ 49 blau  
für Trinkwasser  
und Warmwasser

**Heizung**

Typ 49A rot  
bis 100°C und 10 bar  
Garantie 5 Jahre  
Lebensdauer

## Pneumatische Kompaktregler

# centair<sup>®</sup>

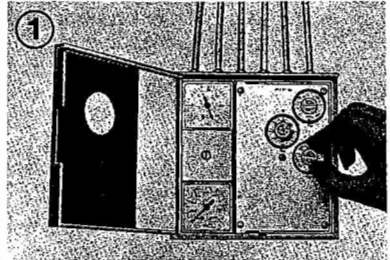
von

# SAUTER

## Es gibt nichts Vergleichbares.

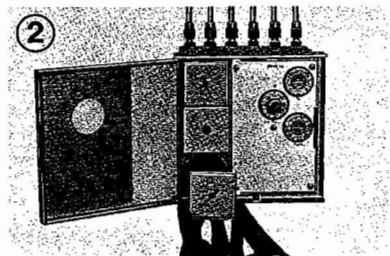
### centair

- ① Absolut problemlose Einstellung durch justierte Skalen.



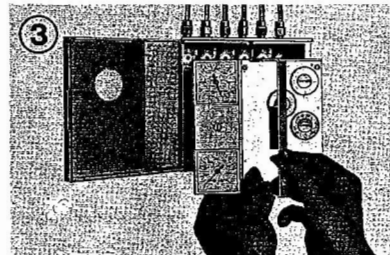
### centair

- ② Absolut problemlose Montage und Installation durch steckbaren Regeleinsatz.



### centair

- ③ Absolut problemlose Anzeige durch steckbare Manometer.



### centair

- ④ Absolut problemloser Service durch steckbare Einheitsbaugruppen.



SAUTER löst mit nur sieben Kompaktregler-Typen alle Regelaufgaben in HLK-Anlagen.

Für SAUTER ist ein komplettes Sortiment an Meßwertgebern und Ventilen mit umkehrbaren Antrieben selbstverständlich.

Centair von SAUTER senkt die absoluten Schaltschrank-, Installations- und Servicekosten.

Das preiswerteste System, das SAUTER je hatte.

Centair von SAUTER ist eine überzeugende Lösung für die Probleme des Praktikers. Es gibt nichts Vergleichbares.



**SAUTER** -Geräte sind:

- preisgünstig
- robust
- wartungsfrei
- energiesparend
- wirtschaftlich
- zuverlässig

SAUTER bietet eine Erfahrung aus über 50 Jahren.

Technische Verkaufsbüros:  
Düsseldorf, Tel. (0211) 219028-29  
Frankfurt, Tel. (0611) 551284  
Friedberg, Tel. (0821) 601844  
Hamburg, Tel. (040) 684374  
Hannover, Tel. (0511) 796036  
Karlsruhe, Tel. (0721) 24504  
München, Tel. (089) 844271  
Nürnberg, Tel. (0911) 465836  
Saarlouis, Tel. (06831) 6387-88  
Stuttgart, Tel. (0711) 283177/8



**SAUTER**

Cumulus-Werke GmbH.  
78 Freiburg i. Br.  
Hans-Bunte-Straße 15  
Telefon (0761) 50526-29

## COUPON

Name \_\_\_\_\_

Firma \_\_\_\_\_

Ort \_\_\_\_\_

Straße \_\_\_\_\_

Senden Sie mir bitte  
die neuesten Unterlagen über  
pneumatische Kompaktregler  
Centair

