

STRÖMUNGSTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN AN FILTERSCHLÄUCHEN

J. MARSCHALL und L. PREZLER
Lehrstuhl für Strömungslehre,
Technische Universität, H-1521 Budapest
Eingegangen am 7. Sept. 1982.

Vorgelegt von Prof. T. Szentmártony

Summary

Fabric hose filters are in general use for cleaning dusty gases. To correctly evaluate their functioning, several parameters have to be taken into consideration, possibly only through versatile tests. The most important feature of filtering equipment, that of flow through the fabric hose will be discussed, and a relationship established for calculating the length-wise distribution of velocity and pressure in suction and compression hoses. Filtering velocity increases along the flow, and significantly deviates from the mean, causing uneven dust load on the fabric surface. The theoretical discussion relies on plane fabric measurement results, and on determinations of surface dust load and the relevant fabric resistance.

A dimensionless number has been introduced to determine fluid mechanical characteristics of fabric hoses, to hose design, and to estimate the correctness of model tests. The criterion of similarity relates the fabric (or fabric-dust) resistance, the medium features, the hose geometry, and the mean filtering velocity. Tests made in the practical range confirmed theoretical assumptions and results.

Einleitung

Die Entwicklung der Industrie wird im letzten Jahrzehnt auch durch den Umweltschutz beeinträchtigt, weshalb sich die Aufmerksamkeit immer mehr der Wirksamkeit der Staubabscheidung zuwendet.

Die Beurteilung der in der Praxis gebräuchlichen Gewebefilter beruht auf vielen Parametern, deren gleichzeitige eingehende Untersuchung praktisch nicht möglich ist. Darum werden die einzelnen Teile dieser Staubabscheider theoretisch und experimentell untersucht, um ihre Wirkungsweise näher kennenzulernen und die Möglichkeit von Modellversuchen zu prüfen.

Die vorliegende Arbeit behandelt eingehend die Strömung (die Geschwindigkeits-, und Druckverteilung) in einem Element eines Schlauchabscheiders, ferner die Wirkung einzelner Einflußgrößen auf diese. Es wird auch auf den Unterschied zwischen mit Überdruck und mit Unterdruck betriebenen Schläuchen hingewiesen. Es wurden theoretische und anschließend experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um durch Messungen bewiesene Zusammenhänge zu erhalten, die es ermöglichen, aus den für ebene Gewebeproben gültigen Kennwerten, die Eigenschaften der Filterschläuche zu bestimmen. Diese sollen auch die Bewertung von Filterschläuchen, ferner ihre

richtige Ausgestaltung ermöglichen. Die Eigenschaften von ebenen Gewebeproben können der Literatur entnommen oder verhältnismäßig einfach gemessen werden.

Die Ausführungen beziehen sich hauptsächlich auf zylindrische Filterschläuche, können jedoch auch auf Gewebe anderer Geometrie (z. B. auf Taschen) angewendet werden.

Dieses Thema behandelnde Mitteilungen ([4], [5], [6], [7], [8] usw.) enthalten meistens an gewisse Anlagen gebundene, berechnete oder gemessene Ergebnisse. Diese sind meistens auf gewisse, für die jeweiligen Verfahren bezeichnende Durchschnittswerte (z. B. Durchschnittliche Filtrationsgeschwindigkeit) bezogen, so daß ihre Verallgemeinerung oder Anwendung auf Anlagen anderer Geometrie nur näherungsweise möglich ist.

Die Änderung der örtlichen Parameter, wie Filtrationsgeschwindigkeit, Druck, Staubbelastung usw., wird in der Literatur ([3], [4], [5], usw.) anhand gewisser Erfahrungen, nur erwähnt.

Strömung im Filterschlauch

Die Gleichmäßigkeit der Staubbelastung an verschiedenen Stellen eines Filterschlauches hat einen spezifisch großen Einfluß auf dessen Lebensdauer. Die spezifische Staubbelastung wird durch den ein Flächenelement durchströmenden Gasvolumenstrom ($\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$) — die sogenannte Filtrationsgeschwindigkeit v_f — und den mitgeführten Staubgehalt bestimmt. Die Lebensdauer eines Filterschlauches ist höher, wenn die örtliche Staubbelastung an jeder Stelle gleich groß ist, d. h. wenn in einer gewissen Zeitspanne auf jedem Flächenelement die gleiche Staubmenge aufgefangen wird. Die auf einer Flächeneinheit in der Zeiteinheit aufgefangene Staubmasse, die Staubbelastung q ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) ist das Produkt aus der Konzentration k (kg/m^3) und der Filtrationsgeschwindigkeit v_f (m/s) des Gases, da diese Geschwindigkeit und der durch die Flächeneinheit des Gewebes strömende Volumenstrom gleich sind. Wird k als Kenngröße des Gases betrachtet, kann dieser Wert vor dem Filter als konstant angenommen werden, hingegen ist v_f meistens eine Funktion des Ortes, da v_f dem Druckunterschied Δp zwischen den beiden Seiten des Filtergewebes proportional ist. Dieser Druckunterschied kann höchstens bei ebenen Filtern als konstant angenommen werden. In zylindrischen Gewebesschläuchen ändert sich der Volumenstrom den Schlauch entlang. Herrscht im Schlauch Unterdruck, so nimmt der Volumenstrom (und damit auch die Strömungsgeschwindigkeit im Schlauch) in Strömungsrichtung zu (Abb. 1.); herrscht hingegen im Schlauch Überdruck, nehmen der Volumenstrom und die Geschwindigkeit in Strömungsrichtung ab (Bild 1 B). Daraus folgt, daß der Druck im Schlauch nicht konstant ist. Da die

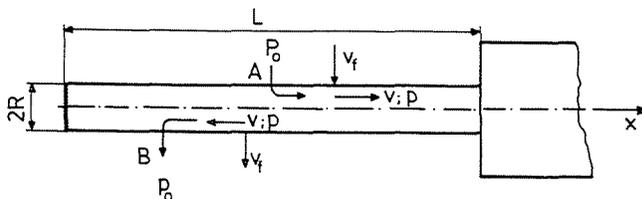


Abb. 1. Bezeichnungen zur Behandlung der Filterschläuche

Filtrationsgeschwindigkeit v_f an gegebener Stelle x dem Druckunterschied proportional ist, ändert sich v_f den Schlauch entlang, weshalb zu erwarten ist, daß sich die Staubbelastung auch ändert.

Betrachtet man den Druck-, und Geschwindigkeitsverlauf bei Unterdruck bzw. Überdruck, so sieht man, daß diese sich nicht nur quantitativ ändern, sondern auch in ihrem Verlauf verschieden sind.

Nachstehend wird ein einzelner Gewebeschlauch theoretisch und experimentell behandelt. Es wird gezeigt, daß Geschwindigkeits- und Druckverteilung den Schlauch entlang berechnet werden können, wenn an ebenen Gewebeproben gemessene Werte bekannt sind. Aus diesen Verteilungen kann auch auf die örtliche Staubbelastung geschlossen werden.

Die Änderung des Widerstandes eines ebenen Gewebes durch Staubbelastung

Der Strömungswiderstand eines ebenen Gewebes kann bei verschiedenen Staubbelastungen auch in folgender Weise bestimmt werden.

Unter praktischen Bedingungen darf die Strömung durch das Gewebe und durch die vorhandene Staubschicht als laminar betrachtet werden. Auch durch Ähnlichkeitsbetrachtungen läßt sich beweisen, daß der Druckunterschied zwischen den beiden Seiten des Gewebes

$$\Delta p = K_0 \cdot \mu \cdot v_f \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

ist. Dabei bedeuten: $K_0 \left(\frac{1}{m} \right)$ einen Kennwert des Stoffes; $\mu \left(\frac{\text{kg}}{\text{ms}} \right)$ die dynamische Viskosität des Gases. Wenn μ unveränderlich ist, erhält man nach [10]

$$\Delta p = \frac{K_0 \mu}{\rho} \rho v_f = K \rho v_f \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

Hierin enthält der Faktor $K \left(\frac{m}{s} \right)$ die Eigenschaften des Gewebes und des

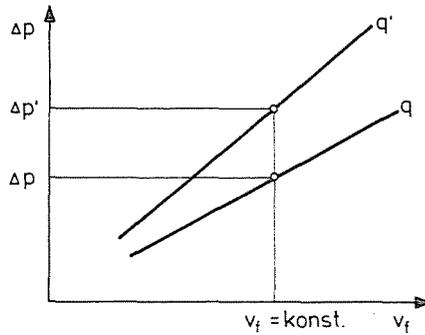


Abb. 2. Beziehung zwischen dem Druckverlust und der Filtrationsgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Staubbelastungen

Mediums. Er wird als Widerstandsbeiwert bezeichnet. Da meistens $\mu = \text{konst.}$, wird im folgenden Gleichung (2) verwendet.

Wenn die Staubbelastung bei $v_f = \text{konst.}$ von q auf q' um Betrag $\Delta q = q' - q$ ändert (Abb. 2), so ändert der Druckunterschied Δp zu $\Delta p'$. Der auf Δp bezogene Wert der Änderung $\Delta p' - \Delta p$ ist folglich nach Gleichung (2)

$$\frac{\Delta p' - \Delta p}{\Delta p} = \frac{K' - K}{K} = \frac{\Delta K}{K}$$

(K' bedeutet den Wert von K bei der Belastung q' .) Es sei vorausgesetzt, daß das Verhältnis $\Delta K/K$ — das von v_f unabhängig ist — der Änderung Δq proportional ist und durch eine Funktion $f(q \dots)$ ausgedrückt werden kann, die auch die Eigenschaften des Staubes (z. B.: die Art der Ablagerung auf dem Gewebe, seine Eigenschaften als Schüttgut usw.) enthält. So kann annähernd geschrieben werden:

$$\frac{\Delta K}{K} \approx f(q \dots) \Delta q$$

Nach Grenzübergang und einfacher Integration erhält man:

$$\ln \frac{K}{K_r} = \int f(q \dots) dq$$

Wo K_r den Widerstandsbeiwert des reinen Gewebes bedeutet. Das auf der rechten Seite dieser Gleichung stehende Integral kann direkt nicht berechnet werden, doch nehmen wir an, daß es zu einer Funktion führt, die mit $F(aq)$ bezeichnet, und wo a so aus der Bedingung bestimmt wird, daß die Funktion F dimensionlos sei. Eine weitere Voraussetzung sei, daß F für ein gewisses Gewebe und einen gewissen Staub der messbaren Staubbelastung q eindeutig zugeordnet werden kann.

So kann auch $\ln K/K_r$ als Funktion von q dargestellt werden. Es ist zweckmäßig, für diese experimentelle Kurve $F(aq)$ eine Näherungsfunktion — z. B. eine Potenzfunktion — zu bestimmen.

Den Druckunterschied an einem ebenen Gewebe, bei einer Staubbela-
stung q bestimmt die folgende Gleichung:

$$\Delta p = K \rho v_f = K_r \cdot \exp F(aq) \cdot \rho \cdot v_f \quad [\text{Pa}] \quad (3)$$

Literaturangaben sagen, daß Δp mit zunehmender Belastung q bei $v_f = \text{konst.}$ steiler ist, als bei zunehmender Geschwindigkeit v_f bei $q = \text{konst.}$ [1], [2], [9]. Gleichung (3) beweist und begründet die Richtigkeit dieser Aussagen.

Es wurde zuvor vorausgesetzt, daß sich auch nach Ablagerung des Staubes Δp im gleichen Verhältnis ändert wie v_f , ferner, daß das Verhältnis $\Delta p/v_f$ von v_f unabhängig ist.

Voraussetzungen zur Behandlung des Filterschlauches

Zur strömungstechnischen Berechnung wird folgendes vorausgesetzt:

- Der Filterschlauch wird als Kreiszyylinder betrachtet, dessen Radius R (m) und Länge L (m) ist.
- Das auf den Staub wirkende Kraftfeld wird nicht beachtet.
- Das mit Staub beladene Medium wird für inkompressibel und die Strömung den Schlauch entlang für reibungslos betrachtet. Die letztere Voraussetzung ist dadurch begründet, daß auf der inneren Oberfläche des Schlauches praktisch keine Reibungsschicht entsteht. Bei Unterdruck wird die Grenzschicht beschleunigt, bei Überdruck entsteht „Grenzschichtabsaugung“.
- Die auf die Längsachse des Schlauches senkrechte Geschwindigkeitskomponente im Schlauchinneren wird vernachlässigt, da die Wirkung der Filtrationsgeschwindigkeit nur auf die unmittelbare Nähe des Gewebes beschränkt ist. Abgesehen von dem verhältnismäßig kurzen, geschlossenen Ende des Schlauches, ist die Filtrationsgeschwindigkeit v_f gegenüber der Geschwindigkeit v , mit der das Medium dem Schlauch entlang strömt, sehr klein. Die Größenordnung des Verhältnisses v_f/v kann durch Anwendung der Kontinuitätsgleichung für $R/2L$ geschätzt werden. Demnach kann die Strömungsrichtung als parallel zur Schlauchachse betrachtet werden und so kann auch der statische Druck in einem Querschnitt des Schlauches als konstant angenommen werden, das auch die Messungen bewiesen haben.
- Außerhalb des Schlauches, in einer entsprechenden Entfernung von diesem, ist der Druck p_0 [Pa] konstant und das Medium strömt nicht.

Die Berechnung eines Unterdruck-Filterschlauches

Druckverlauf und Geschwindigkeitsverlauf den Schlauch entlang werden durch Anwendung der Kontinuitätsgleichung und des Impulssatzes berechnet.

Die Durchschnittsgeschwindigkeit an der Stelle x sei v_x (Abb. 3). Diese wird durch die folgende Gleichung bestimmt:

$$v_x = \frac{1}{R^2 \pi} \int_0^R v(x, r) 2r \pi dr. \quad (4)$$

Der Schlauch sei bei $x=0$ geschlossen. Betrachtet man das Schlauchelement der Länge Δx , so führt die Kontinuitätsgleichung zu:

$$(v_{x+\Delta x} - v_x) R^2 \pi = v_{f,x} 2R \pi \Delta x;$$

nach Grenzübergang ist

$$v_{f,x} = \frac{R}{2} \cdot \frac{dv}{dx} \quad (5)$$

Die für den ganzen Schlauch berechnete durchschnittliche Filtrationsgeschwindigkeit erhält man durch Dividieren des filtrierten Volumenstroms $V(\text{m}^3/\text{s})$ mit der Gesamtfläche A des Schlauches:

$$\bar{v}_f = \frac{V}{A} = \frac{v_L R^2 \pi}{2R \pi L} = v_L \frac{R}{2L} \text{ (m/s)}.$$

Verwendet man den Impulssatz auf das in Abb. 3 angegebene Volumenelement, so erhält man

$$\left[\int_0^R \rho v^2(x, r) 2\pi r dr \right]_{x+\Delta x} - \left[\int_0^R \rho v^2(x, r) 2\pi r dr \right]_x = \\ = (p_x - p_{x+\Delta x}) R^2 \pi.$$

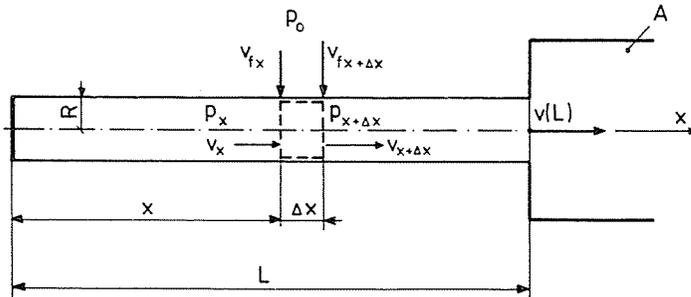


Abb. 3. Bezeichnungen zur strömungstechnischen Behandlung von Filterschläuchen bei Unterdruck

Der Impuls des Mediums, das durch die dx lange Zylinderfläche strömt, hat keine Komponente in Richtung x , da die Strömungsrichtung auf diese Fläche senkrecht ist. Der auf diese Zylinderfläche wirkende Druck liefert auch keine Kraftkomponente in Richtung x .

Das Integral, das die lokale Geschwindigkeit $v(x, r)$ enthält, kann mit Hilfe der Durchschnittsgeschwindigkeit v_x berechnet werden, wenn ein Beiwert β durch folgende Gleichung definiert wird:

$$\beta^2 \rho v_x^2 R^2 \pi = \rho \int_0^R v^2(x, r) 2r \pi dr.$$

Dieser Beiwert — den man Profilbeiwert nennen kann — ist mit der Geschwindigkeitsverteilung im Querschnitt verbunden. Messungen haben bewiesen, daß β^2 sich den Schlauch entlang nur wenig ändert, so kann näherungsweise $\beta^2 \approx \text{konst.}$ angenommen werden. Damit erhält der Impulssatz die Form:

$$\rho(\beta v)_{x+\Delta x}^2 - \rho(\beta v)_x^2 = p_x - p_{x+\Delta x}.$$

Der Unterdruck bei x und bei $x + \Delta x$ kann auf Grunde der Gleichung (2) wie folgt geschrieben werden:

$$\begin{aligned} p_0 - p_{x+\Delta x} &= \rho [K v_f]_{x+\Delta x} \\ p_0 - p_x &= \rho [K v_f]_x. \end{aligned}$$

Setzt man diese in die letzte Gleichung des Impulssatzes ein, erhält man nach Vereinfachung:

$$(\beta v)_{x+\Delta x}^2 - (\beta v)_x^2 = (K v_f)_{x+\Delta x} - (K v_f)_x.$$

Nach dem Grenzübergang $\Delta x \rightarrow 0$ ist

$$\frac{d}{dx} (\beta v)^2 = \frac{d}{dx} (K v_f). \quad (6)$$

Verwendet man noch die Kontinuitätsgleichung (5), und die Voraussetzung, daß K unabhängig von v_f ist, erhält man:

$$\frac{d}{dx} (v^2) = \frac{K R}{\beta^2} \frac{d^2 v}{dx^2}. \quad (7)$$

Die Lösung dieser nichtlinearen Differentialgleichung zweiten Ordnung ist:

$$v_x = B \operatorname{tg} \left[\frac{B}{A} x + C \right] \quad (8)$$

Hier bedeutet $A = \frac{K R}{\beta^2} \frac{R}{2}$, B und C sind Integrationskonstanten.

Die Randbedingungen ergeben:

bei $x=0$ ist $v_0=0$, so ist $C=0$

bei $x=L$ ist $v_L=v_{\max}$, so ist $v_{\max}=B \operatorname{tg} \frac{B}{A} L$.

Daraus kann B — z. B. durch Iteration — berechnet werden. So kann der durchschnittliche Wert der Strömungsgeschwindigkeit im Querschnitt bei x aus der Gleichung

$$v_x = B \operatorname{tg} \frac{B}{A} x. \quad (8a)$$

berechnet werden.

Die örtliche Filtrationsgeschwindigkeit erhält man aus Gleichung (5)

$$|v_f|_x = \frac{R}{2} \frac{dv_x}{dx} = \frac{R}{2} \frac{B^2}{A} \frac{1}{\cos^2\left(\frac{B}{A}x\right)}, \quad (9)$$

oder nach ähnlicher Behandlung aus

$$|v_f|_x = \beta^2 \frac{B^2}{K} \left[1 + \left(\frac{v_x}{B} \right)^2 \right].$$

Der örtliche Unterdruck ist nach Gleichung (2)

$$|\Delta p|_x = p_0 - p_x = \rho K |v_f|_x = \rho B^2 \beta^2 \frac{1}{\cos^2\left(\frac{B}{A}x\right)}. \quad (10)$$

Den Druckunterschied zwischen zwei beliebigen Stellen 1 und 2 im Schlauch erhält man durch Integration nach x der Gleichung (6):

$$p_1 - p_2 = \beta^2 \rho (v_1^2 - v_2^2).$$

Es folgt aus dem Vorangehenden, daß Geschwindigkeits-, und Druckverlauf nicht nur vom Widerstandsbeiwert des Gewebes, sondern auch vom filtrierte Volumenstrom und von der Geometrie des Schlauches beeinflusst werden. Der Energiebedarf, bzw. der benötigte Unterdruck $\overline{\Delta p}$ zur Filtrierung der Volumeneinheit kann wie folgt berechnet werden:

In Abb. 3 strömt das Gas aus dem Schlauch in den Raum A , wo ein Unterdruck $\overline{\Delta p}$ besteht. Ist die Geschwindigkeit in A $v_A \ll v_L$, so ist $\overline{\Delta p} = p_0 - p_A = \Delta p_L$. Das ist auch der Energiebedarf in [W].

Die auf den ganzen Filterschlauch bezogene, durchschnittliche Filtrationsgeschwindigkeit $\overline{v_f}$ ist kleiner als die am Schlauchende v_{fL} . Der benötigte

Unterdruck Δp ist proportional zu v_f , so steht der Energiebedarf eines Filterschlauchs zu dem Bedarf eines ebenen Filters gleicher Filterfläche in einem Verhältnis $v_{fL}/\bar{v}_f > 1$. Der Energiebedarf eines Schlauchfilters ist demnach immer größer als der eines ebenen Filters gleicher Filterfläche.

Berechnung eines Überdruck-Filterschlauches

Folgt man nach Abb. 4 dem gleichen Gedankengang wie im Kapitel 1.3, so führt die Kontinuitätsgleichung wieder zu Gleichung (5). Demnach ist die Filtrationsgeschwindigkeit bei x dem Differentialquotienten dv_x/dx proportional. Verwendet man wieder den Impulssatz auf das in Abb. 4 angegeben Volumenelement mit dem früher eingeführten Profilbeiwert β so erhält man

$$\rho [(\beta v^2)_{x+\Delta x} - (\beta v^2)_x] R^2 \pi - \Delta J = (p_x - p_{x+\Delta x}) R^2 \pi$$

Das Glied ΔJ der linken Seite bedeutet die x -Komponente des Impulses der Masse, die durch die Δx lange Zylinderfläche ausströmt. Die auf diese Fläche senkrechte Komponente der Ausströmgeschwindigkeit ist die Filtrationsgeschwindigkeit $v_{f,x}$ bzw. $v_{f,(x+\Delta x)}$; als die x -Komponente derselben wird — näherungsweise — die durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit bei x bzw. bei $x + \Delta x$ betrachtet. Diese sind: v_x und $v_{x+\Delta x}$. Durch diese Zylinderfläche strömt der Massenstrom:

$$\Delta m = 2\pi R \Delta x \rho v_{f,x},$$

damit ist der Impuls

$$\Delta J = \Delta m \cdot v_x = 2\pi R \Delta x \rho v_{f,x} v_x,$$

Auf das Volumenelement wirkt bei $x + \Delta x$ der Druck

$$p_{x+\Delta x} = p_0 + \Delta p_{x+\Delta x} = p_0 + \rho (K v_f)_{x+\Delta x},$$

bei x

$$p_x = p_0 + \Delta p_x = p_0 + \rho (K v_f)_x.$$

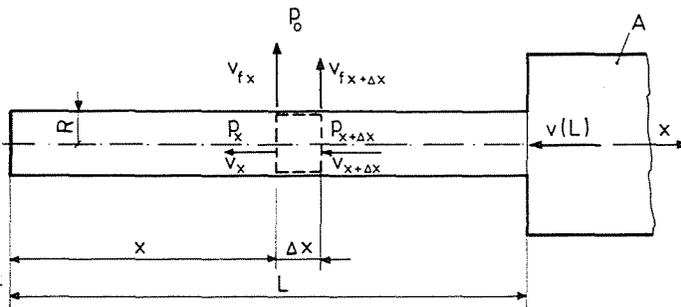


Abb. 4. Bezeichnungen zur strömungstechnischen Behandlung von Filterschläuchen bei Überdruck

Diese in die Ausgangsgleichung eingesetzt, die Vereinfachungen und den Grenzübergang $\Delta x \rightarrow 0$ durchgeführt, erhält man:

$$\frac{d}{dx}(\beta v)^2 - \frac{d}{dx} \frac{v^2}{2} = - \frac{d}{dx}(K v_f) \quad (13)$$

Setz man noch den Ausdruck für v_f aus Gleichung (5) und führt noch folgende Bezeichnungen ein:

$$\beta_{\ddot{U}}^2 = 2\beta^2 - 1 \approx \text{konst.} \quad \text{und} \quad A_{\ddot{U}} = \frac{KR}{2\beta_{\ddot{U}}^2}$$

so ergibt sich

$$v \frac{dv}{dx} = -A_{\ddot{U}} \frac{d^2 v}{dx^2} \quad (14)$$

Die Lösung dieser nichtlinearen Differentialgleichung zweiter Ordnung ist:

$$v_x = B_{\ddot{U}} \cdot \text{th} \frac{B_{\ddot{U}}}{2A_{\ddot{U}}} x + C_{\ddot{U}}.$$

Die Integrationskonstanten bestimmen die Randbedingungen:

$$\text{bei } x=0 \quad \text{ist } v_0=0, \quad \text{so ist } C_{\ddot{U}}=0$$

$$\text{bei } x=L \quad \text{ist } v_L = v_{\max},$$

so ist

$$v_{\max} = B_{\ddot{U}} \cdot \text{th} \frac{B_{\ddot{U}}}{2A_{\ddot{U}}} L.$$

Daraus kann $B_{\ddot{U}}$ mit Hilfe einer numerischen Methode bestimmt werden.

Die Durchschnittsgeschwindigkeit im Querschnitt bei x ist:

$$v_x = B_{\ddot{U}} \text{th} \frac{B_{\ddot{U}}}{2A_{\ddot{U}}} x. \quad (15)$$

Die Filtrationsgeschwindigkeit nach Gleichung (5):

$$v_{fx} = \beta_{\ddot{U}}^2 \frac{B_{\ddot{U}}^2}{2K} \frac{1}{\text{ch}^2 \frac{B_{\ddot{U}}}{2A_{\ddot{U}}} x}, \quad (16)$$

oder nach ähnlicher Umwandlung:

$$v_{fx} = \beta_{\ddot{U}}^2 \frac{B_{\ddot{U}}^2}{2K} \left[1 - \left(\frac{v_x}{B_{\ddot{U}}} \right)^2 \right]. \quad (16a)$$

Der Überdruck ist

$$\Delta p_x = p_x - p_0 = \rho K v_{fx} = \rho \beta_{\ddot{U}}^2 \frac{B_{\ddot{U}}^2}{2} \frac{1}{\text{ch}^2 \frac{B_{\ddot{U}}}{2A_{\ddot{U}}} x}$$

Den Druckunterschied zwischen zwei beliebigen Stellen 1 und 2 im Schlauch erhält man durch Integration nach x der Gleichung (13)

$$p_1 - p_2 = \beta_{\ddot{U}}^2 \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_2^2)$$

Wäre $v = \text{konst.}$ über dem Querschnitt, wären $\beta = 1$ und $\beta_{\ddot{U}} = 1$, so

$$p_x + \frac{\rho}{2} v_x^2 = \text{konst.}$$

Das heißt die Strömung verläuft wie in einem „verlustlosen“ Diffusor.

Das Vorangehende beweist, daß eine Änderung der Schlauchgeometrie, des Widerstandes des Gewebes oder des filtrierten Volumenstromes eine Änderung des Druck-, und Geschwindigkeitsverlaufes zur Folge hat. Längs eines Unterdruckschlauches verlaufen p , v_x , v_f auf einer anderen Art als bei einem Überdruckschlauch, jedoch nimmt der Druckunterschied am Gewebe in beiden Fällen in Strömungsrichtung zu.

Den auf den Volumenstrom bezogenen Energieaufwand erhält man durch Wiederholung des zuvor beschriebenen Gedankenganges:

$$\overline{\Delta p_{\ddot{U}}} = |p|_{x=0} - p_0 = |\Delta p|_{x=0} \quad [\text{Pa}]; \quad (19)$$

der Energieaufwand ist also so groß, wie der Überdruck am geschlossenen Ende des Schlauches (bei $x=0$).

Die Anwendung des Impulssatzes ist durch Einführung des Profilbeiwertes β^2 wiederholt vereinfacht. Dieser steht mit der Geschwindigkeitsverteilung im Schlauchquerschnitt im Zusammenhang. Dieser wurde durch folgenden Gedankengang bestimmt: integriert man Gleichung (6) von $x=0$ bis zu einem beliebigen Wert x

$$\int_0^x \frac{d}{dx} (\beta v_x)^2 dx = \int_0^x \frac{d}{dx} (K v_f) dx,$$

so erhält man:

$$(\beta v_x)_x^2 - (\beta v_x)_0^2 = (K v_f)_x - (K v_f)_0.$$

Beachtet man noch, daß

bei $x=0$ ist $(v_x)_0 = 0$ und

$$\rho (K v_f)_0 = p_0 - (p)_0 = (\Delta p)_0;$$

ferner daß bei x ist $(v_x)_x$ und

$$\rho(Kv_f)_x = p_0 - (p)_x = (\Delta p)_x,$$

so erhält man für einen Unterdruckschlauch:

$$\beta^2 = \frac{(\Delta p)_x - (\Delta p)_0}{\rho(v_x^2)_x}. \quad (20a)$$

Wiederholt man diesen Gedankengang bezogen auf Gleichung (13) und beachtet man die Definition von $\beta_{\bar{v}}$ so erhält man für den Überdruckschlauch:

$$\beta_{\bar{v}}^2 = \frac{(\Delta p)_x - (\Delta p)_0}{\frac{\rho}{2}(v_x^2)_x}. \quad (20b)$$

Der Druckunterschied zwischen den Stellen bei $x=0$ und x , ferner die Durchschnittsgeschwindigkeit bei x können gemessen werden, so daß Erfahrungswerte für β und $\beta_{\bar{v}}$ erhaltbar sind.

Die in [13] veröffentlichten Meßergebnisse sind:

$$\text{für Unterdruckschläuche } \beta^2 = 1,2$$

$$\text{für Überdruckschläuche } \beta_{\bar{v}}^2 \cong 1.$$

Diese Werte können erfahrungsgemäß als konstant betrachtet werden, wenn die durchschnittliche Filtrationsgeschwindigkeit \bar{v}_f nicht über 0,1 m/s liegt.

Ähnlichkeitsbedingungen für Filterschläuche

Filtrierungsaufgaben können oft nur dann entsprechend zuverlässig bewertet werden, wenn Ergebnisse von Modellversuchen vorliegen. An zwei verschiedenen Filterschläuchen erhaltene Ergebnisse werden nur dann einander ähnlich sein, wenn die Vorgänge in den Beiden mit derselben Differentialgleichung beschrieben werden können, und die Randbedingungen einander gleich sind. In den beiden betrachteten Fällen — Unterdruck bzw. Überdruckschlauch — können die Ähnlichkeitsbedingungen von den Gleichungen (6), bzw. (14) ausgehend hergeleitet werden, weil durch diese die Vorgänge den Voraussetzungen gemäß richtig beschrieben werden. Der Aufbau dieser beiden Gleichungen berechtigt zur Aussage, daß in beiden Fällen die gleichen Bedingungen maßgebend sind. Im folgenden soll deshalb nur Gleichung (6) behandelt werden. Diese wird zuerst in dimensionslose Form umgeschrieben. Dazu scheinen geeignet zu sein: die Länge des Schlauches, L [m]; die Durchschnittsgeschwindigkeit am offenen Ende bei L : $v_{xL} = v_{\max}$ [m/s]; der Widerstandsbeiwert des reinen Gewebes: K_r . So ist die

dimensionslose Form der Gleichung (6):

$$\begin{aligned} & \frac{v_{\max}^2}{L} \frac{d}{d\left(\frac{x}{L}\right)} \left(\beta \frac{v}{v_{\max}} \right)^2 = \\ & = \frac{RK_r v_{\max}}{2L^2} \cdot \frac{d}{d\left(\frac{x}{L}\right)} \cdot \left[\frac{K}{K_r} \frac{d}{d\left(\frac{x}{L}\right)} \left(\frac{v_x}{v_{\max}} \right) \right] \end{aligned}$$

Beide Seiten werden mit v_{\max}^2/L dividiert.

Der Faktor der rechten Seite enthält zugleich eine Bedingung

$$\pi = \frac{K_r}{v_{\max}} \frac{R}{2L}. \quad (21)$$

Ersetzt man v_{\max} durch $\bar{v}_f = v_{\max} \frac{R}{2L}$;

$$\pi = \frac{K_r}{v_f} \left(\frac{R}{2L} \right)^2.$$

Die Eigenschaften des Gases können dadurch berücksichtigt werden, daß laut Gleichung (2) $K_r = \frac{K_{0r}}{\rho} \mu$ eingesetzt wird:

$$\pi = \frac{K_{0r}}{\rho} \mu \frac{1}{\bar{v}_f} \left(\frac{R}{2L} \right)^2 \quad (22)$$

Neben der Bedingung, daß bei dem Modell und in der „Großausführung“ π denselben Wert haben muß, sind auch die Eigenschaften zu berücksichtigen, die den Staub und das Gewebe gemeinsam bestimmen. Daraus folgt, daß im Modell gleicher Staub und Gewebe verwendet werden muß wie in der „Großausführung“.

Die rechte Seite der Gleichung (22) in zwei Faktoren getrennt, erhält man für den ersten einen der Reynolds-Zahl ähnlichen Ausdruck.

$$\text{Re}_f = \frac{\bar{v}_f \rho}{K_{0r} \mu},$$

während der andere zur Geometrie des Schlauches (R/L) zuordenbar ist.

Die iterative Berechnung von B und $B_{\ddot{u}}$ kann man vermeiden bzw. erleichtern, wenn man die dimensionlose Zahl: π in die Gleichungen (8), bzw. (15) einführt, und die Randbedingung, daß bei $x=L$ $v_{xL} = v_{\max}$ ist, beachtet.

π aus diesen Gleichungen ausgedrückt, erhält man für den Unterdruckschlauch:

$$\pi = \frac{\beta^2 \frac{B}{v_{\max}}}{\operatorname{arth} \frac{v_{\max}}{B}}$$

und für den Überdruckschlauch:

$$\pi = \frac{\beta_{\ddot{U}}^2 \frac{B_{\ddot{U}}}{v_{\max}}}{2 \operatorname{arth} \frac{v_{\max}}{B_{\ddot{U}}}} \quad \text{bzw.} \quad B_{\ddot{U}}/v_{\max} = f(\pi)$$

Die Funktion $B/v_{\max} = f(\pi)$ ist in Abb. 5 dargestellt. Wenn $\pi > 8$ kann $B/v_{\max} \cong \sqrt{\pi}$ bzw. $B_{\ddot{U}}/v_{\max} \cong \sqrt{2\pi}$ als befriedigende Annäherung angenommen werden. In der Praxis ist aber der Wert von π meistens kleiner als 3.

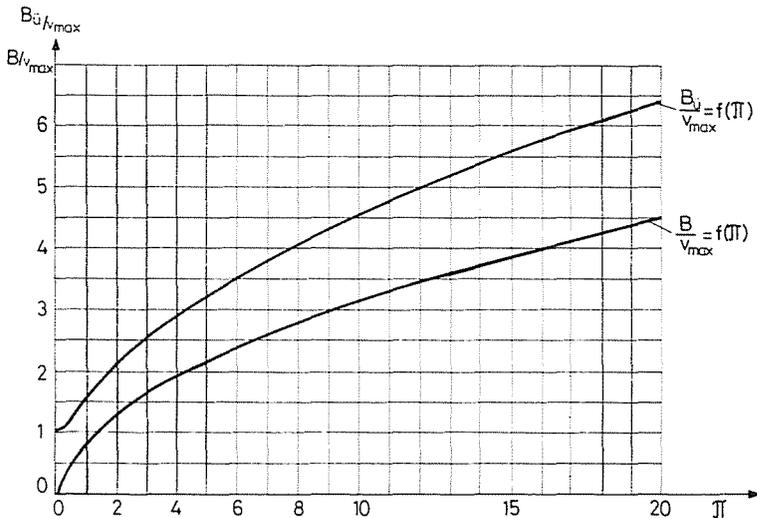


Abb. 5. Der Verlauf der Funktionen $B_{\ddot{U}}/v_{\max} = f(\pi)$ und $B/v_{\max} = f(\pi)$

Meßergebnisse an Filterschläuchen

Die theoretischen Ergebnisse wurden auf einer Meßanlage überprüft. Das Schema dieser Anlage ist in Abb. 6 dargestellt. Die Maße der geprüften Filterschläuche waren: Länge $L = 2,2$ m; Durchmesser $2R = 125$ mm; bei den Unterdruckschläuchen hat ein Stützkorb (K) die zylindrische Form gesichert.

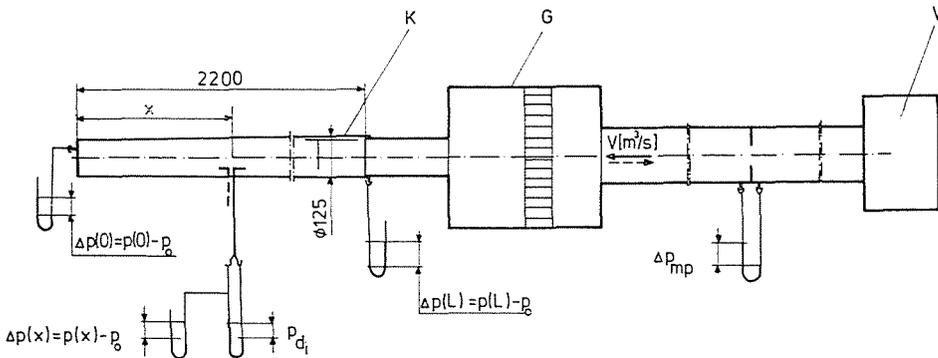


Abb. 6. Schema der Meßanlage

Ein Ende des Schlauches wurde geschlossen. An die Sperrscheibe eine Druckausführung ($\Delta p_0 = p_{x=0} - p_0$) gesetzt. (Abweichung des Drucks im Inneren von dem Äußeren) Das offene Ende des Schlauches wurde an ein Rohr befestigt, das gleichen Durchmesser besitzt wie der Schlauch.

An der Befestigungsstelle wurde der Druck — bei $x=L$ — p_L , bzw. dessen Abweichung vom Druck der Umgebung $\Delta p_L = p_L - p_0$ gemessen.

Dieses Rohr ist an eine Gleichrichterstrecke (G) mit 700 mm Durchmesser angeschlossen. Der Gleichrichter ist durch ein so langes Rohr mit einem Ventilator (V) verbunden, daß es die zuverlässige Messung des Volumenstromes mit Hilfe einer Meßblende ermögliche. Der Ventilator wird mit dem Saugstutzen — für einen Unterdruckschlauch — oder mit dem Druckstutzen — für einen Überdruckschlauch — an die Meßstrecke angeschlossen. Der Volumenstrom wird durch Drosselung geregelt. Die Schläuche wurden aus reinem „BETH-POLYESTER“ Gewebe mit der spezifischen Masse 550 (g/m^2) hergestellt. Der Widerstand des Gewebes wurde nach Gleichung (1) bestimmt. Dieser Wert wurde auch für die Berechnung des Geschwindigkeits- und des Druckverlaufes verwendet. Die Durchschnittsgeschwindigkeit v_x im Querschnitt bei x wurde mit dem Prandtl-Rohr nach dem sog. Zehnpunkte-Verfahren gemessen bzw. berechnet. Der statische Druckunterschied zum Außendruck in den Meßpunkten eines Querschnittes war im ganzen Querschnitt gleich; die beobachteten Abweichungen überschritten nicht die Meßgenauigkeit. In den Abb. 7 und 8 sind die berechneten und gemessenen Ergebnisse dargestellt. Die voll ausgezogenen Linien bezeichnen berechnete, die einzelnen Punkte gemessene Werte. Die Luftdichte betrug $\rho = 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Abb. 7 zeigt den Verlauf der Durchschnittsgeschwindigkeit $v_x = f(x)$ und des Druckunterschiedes $\Delta p_x = f(x)$ für den Unterdruckschlauch in verschiedenen Betriebszuständen, Abb. 8 die Daten für den Überdruckschlauch.

Der Verlauf der Filtrationsgeschwindigkeit $v_{f,x} = f(x)$ kann mit Hilfe folgender Gleichung berechnet werden:

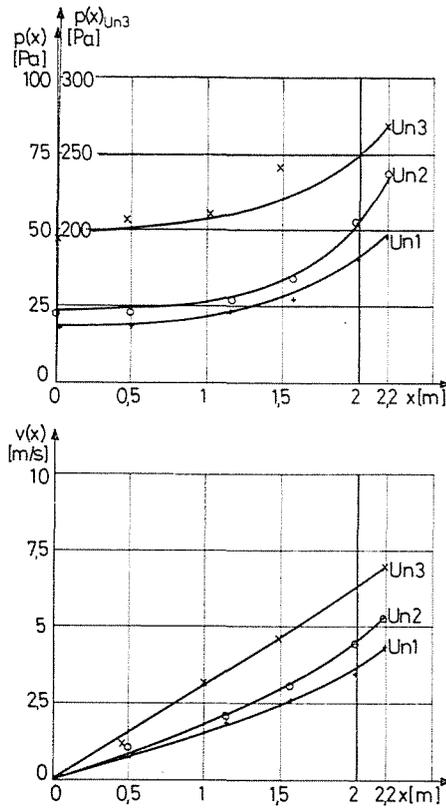


Abb. 7. Meßergebnisse am Filterschlauch bei Unterdruck

$$v_{fx} = \frac{\Delta p_x}{\rho K} \quad [\text{m/s}]$$

Näheres über die Betriebszustände ist in der Tabelle zusammengefaßt:

Betriebsart Abb.	Unterdruck 7			Überdruck 8		
	Un1	Un2	Un3	Üb1	Üb2	Üb3
Zeichen der Messung						
Filtrierter Volumenstrom \dot{V} [m^3/h]	189	233	309	210	374	410
Durchschnittliche Filtrationsgeschwindigkeit \bar{v}_f [m/s]	0,06	0,075	0,11	0,067	0,12	0,13
Durchschnittliche Staubbelastung q [kg/m^3]	0	0	0,9	0	0	0,2
Widerstandsbeiwert K [m/s]	400	400	1650	400	400	490
Ähnlichkeitszahl β [-]	1,33	1,06	3,35	1,19	0,67	0,75
Faktor B [m/s] (Gleichungen (8) und (15))	3,9	4,23	11,65	7,87	11,16	12,6

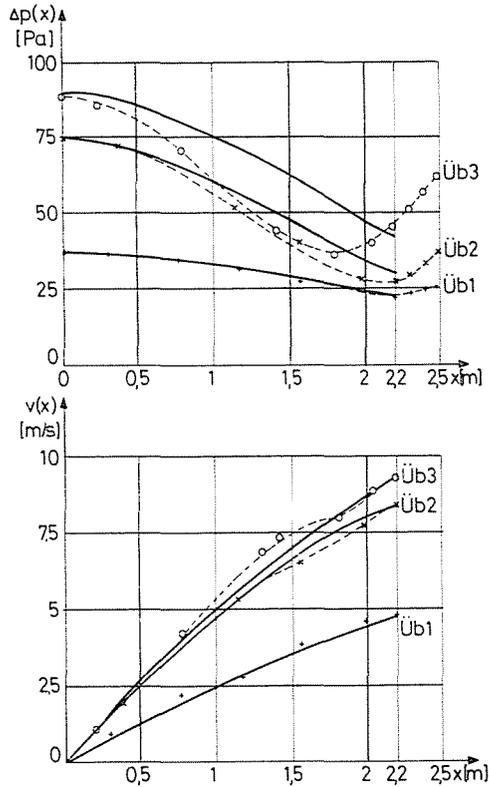


Abb. 8. Meßergebnisse am Filterschlauch bei Überdruck

Die Meßergebnisse bestätigen die Theorie bei dem Unterdruckschlauch, jedoch beim Überdruck gibt es beträchtliche Unterschiede.

Wenn bei Unterdruck der Volumenstrom \dot{V} wächst, nimmt auch die Änderung des Druckunterschiedes Δp den Schlauch entlang zu, folglich auch der Unterschied der Geschwindigkeit v_f zwischen den beiden Enden. Bei höherem Widerstand des Gewebes ist der Druckverlauf gleichmäßiger als bei geringerem, wie das auch zu erwarten war.

Wenn bei Überdruck \bar{v}_f von dem in der Praxis üblichen Wert 0,06 [m/s] nicht beträchtlich abweicht, (Üb1) bestätigen die Versuchswerte die Theorie. Die Kurven Üb2 und Üb3 wurden bei $\bar{v}_f \approx 0,06$ m/s enthalten. Der Unterschied zwischen Theorie und Erfahrung ist in der Nähe der Einströmung in den Schlauch am größten. Der Druckabfall im Rohr vor dem Schlauch übergeht stetig in den Druckanstieg im Schlauch. Die Übergangsstrecke ist um so länger je größer \dot{V} ist.

Die Versuchsergebnisse beweisen, daß beim Überdruckschlauch Größe und Art der Zuströmung die Wirksamkeit des Schlauches nachteilig, im Gegensatz zum Unterdruckschlauch beeinflussen.

Zusammenfassung

Zur Reinigung von Staub enthaltenden Gasen werden häufig Schlauchfilter verwendet. Richtige Bewertung deren Betriebseigenschaften benötigen vielseitige Untersuchungen. Vorliegende Arbeit behandelt den Filterschlauch, den wichtigsten Teil dieser Reinigungsanlagen. Die strömungstechnischen Eigenschaften dieser Schläuche werden theoretisch und experimentell untersucht. Es wurden Gleichungen zur Berechnung des Verlaufes der Geschwindigkeit und des Druckes längs des Schlauches für beide Betriebsfälle — Unterdruck oder Überdruck — entwickelt. Die örtliche Filtrationsgeschwindigkeit v_f kann von dem auf die gesamte Schlauchfläche bezogenen durchschnittlichen Wert \bar{v}_f beträchtlich abweichen. Daraus folgt, daß die örtliche Staubbelastung auch unterschiedlich ist. Die theoretischen Betrachtungen beruhen auf dem Widerstand des ebenen Gewebes, wobei auch der Staubbelag beachtet wird.

Ähnlichkeitsbetrachtungen führten zu einer dimensionlosen Kennzahl π , die als Ähnlichkeitskriterium die folgenden Größen enthält: den Widerstandsbeiwert des Gewebes K , der auch die Eigenschaften des Gases berücksichtigt; die Länge L und den Durchmesser D des Schlauches, ferner die Geschwindigkeit \bar{v}_f :

$$\pi = \frac{K}{v_f} \left(\frac{D}{4L} \right)^2.$$

Diese Kennzahl ermöglicht die Berechnung der strömungstechnischen Eigenschaften oder die Dimensionierung des Schlauches und die Vergleichung von Meßergebnissen.

Im in der Praxis üblichen Geschwindigkeitsbereich $\bar{v}_f \approx 250 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ haben die Meßergebnisse die theoretischen Annahmen bestätigt.

Bezeichnungen

A	die Mantelfläche des Filterschlauches: $2R\pi L$
	Nenner in Gl. (8): $\frac{KR}{2\beta^2}$
a	Faktor in Gl. 3
B	Integrationskonstante
C	Integrationskonstante
D	Durchmesser des Filterschlauches
ΔJ	x-Komponente des Impulses
K	Widerstandsbeiwert des Gewebes, wenn durch dieses ein Medium strömt mit Eigenschaften ρ und μ .
K_0	Widerstandsbeiwert des Gewebes, wenn durch dieses ein beliebiges Medium strömt
K_r	Widerstandsbeiwert des reinen Gewebes
K'	Widerstandsbeiwert des Gewebes bei Staubbelastung q'
ΔK	Änderung von K , $K' - K$, wenn q sich zu q' ändert
L	Länge des Filterschlauches

Δm	Massenstrom durch eine Zylinderfläche
p	Druck im Filterschlauch
p_0	Druck in der Umgebung des Schlauches in größerer Entfernung.
Δp	Druckunterschied an den beiden Seiten des Gewebes
q	Staubbelastung des Gewebes
R	Halbmesser des Filterschlauches $D/2$
r	auf die Achse x senkrechte Polarkoordinate
V	Volumenstrom des filtrierten Mediums
v	Strömungsgeschwindigkeit im Filterschlauch
v_f	Filtrationsgeschwindigkeit
v_f	Auf die gesamte Fläche des Schlauches bezogener durchschnittlicher Wert von v_f
v_x	Auf den Querschnitt bei x bezogener durchschnittlicher Wert von v
v_{\max}	Größte durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit im Schlauch
x	Koordinate den Filterschlauch entlang

Literatur

1. DORMAN, R. G.: Dust Control and Air Cleaning Oxford Pergamon Press, 1974.
2. CLYDE, ORR: Filtration (Principles and Practices) New York and Basel, Marcel Dekker Inc. 1977.
3. KOHN, C.: Staubabscheidung durch Gewebefilter, Tonind. Ztg. 89. (1965)
4. INGEL, W.—HAHNHEISER, H.—LOTZE, J.: Vorausberechnung des Reingasstaubgehaltes für einen Mehrkammer-Gewebeabscheider, Luft- und Kältetechnik 2, 59 (1973)
5. ROBINSON, J. W.—HARRINGTON, R. E.—SPAITE, P. W.: A new Method for analysis of multicompartmented fabric filtration, Atm. Environment, Pergamon Press. 1, 499 (1967)
6. LÖFFLER, F.: Abscheidegrad und Druckverlust von Filterstoffen verschiedener Struktur bei unterschiedlichen Bedingungen, Staub 30, 518 (1972)
7. SOLBACH, W.: Ableitung eines Berechnungsverfahrens für Mehrkammer-Gewebefilter aufgrund von Versuchsergebnissen, Staub 29, 24 (1969)
8. WINTER, K.: Zur Kinetik der Entstaubung mit Mehrkammerfiltern, Staub 37, 390 (1977)
9. KOHN, H.: Theorie und Praxis der Staubabscheidung durch Gewebefilter, Staub 21, 437 (1961)
10. LAJOS T.—PRESZLER L.—MARSCHALL J.: Kamrákra osztott tömlős szövetszűrők méretezésének néhány kérdése, Épületgépészet 23, 275 (1974)
11. BLAHÓ M.—PRESZLER L.: Levegőszűrők ellenállása Épületgépészet 3, 1 (1954)
12. GRUBER J.—BLAHÓ M.: Folyadékok dinamikája, Budapest, Tankönyvkiadó 1971.
13. MARSCHALL J.: Szövettömlős szűrőelemek áramlástani vizsgálata, Doktorarbeit 1980.

Dr. László PRESZLER, H-1026 Budapest, Guyon köz 7.

Dr. József MARSCHALL, H-1111 Budapest, Egri József u. 23.