

# Simulierung des Verstopfungsvorganges in Faserfiltern

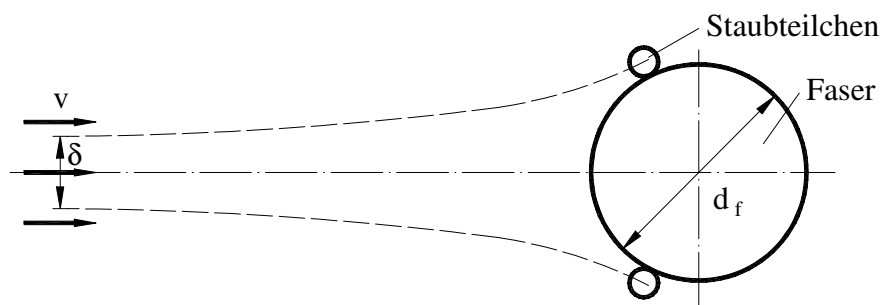
Tamás Lajos

## 1 Zielsetzung

Faserfilter spielen eine wichtige Rolle bei der Abscheidung in Gasen befindlicher fester Staubpartikel oder Tropfen. Das weite Spektrum ihrer Anwendung in technologischen Prozessen und im Umweltschutz ist ihrem Abscheidevermögen und ihrer Betriebssicherheit zu verdanken. Die porösen Faserschichten werden als Gewebe oder als Vlies hergestellt. Eine nachteilige Eigenschaft der Faserfilter, die Zeitabhängigkeit des Filtrationsvorganges, erschwert den Entwurf und Betrieb von Filteranlagen. Die Partikeln werden nämlich durch die Fasern – bei Speicherfiltern in dem inneren Teil, bei Abreinigungsfiltern hauptsächlich auf der Oberfläche der Filterschicht – abgeschieden, wobei die abgelagerten Staubpartikeln sowohl das Abscheideverhalten als auch die Strömungsverhältnisse und dadurch den Druckverlust verändern. Dieser Vorgang führt bei zu hoher Partikelbeladung zur Verstopfung des Filters. Ziel der hier vorgestellten Forschungen ist es, einen Beitrag zur Modellierung der Abscheidungs Vorgänge und zum Entwurf der Filterschichten zu liefern.

## 2 Die Partikelabscheidung auf Einzelfasern

Wenn das staubhaltige Gas durch die Faserschicht strömt, verschieben sich die Staubteilchen relativ zur Luft, berühren die Faseroberfläche und werden dort als Folge von Haftkräften festgehalten. Diese Relativbewegung (Transport) der Staubteilchen wird durch Trägheit der Partikeln, durch Schwerkraft, Diffusion und elektrostatische Kraft hervorgerufen. Nur ein Teil der die Faseroberfläche erreichenden Partikeln wird dort festgehalten. Besonders die grösseren Partikeln können bei höherer Filtrationsgeschwindigkeit abprallen oder die schon abgelagerten Staubteilchen wegschlagen.



**Bild 1:** Aufprallen von Staubteilchen auf Einzelfaser

Die Wirksamkeit der Transportmechanismen wird durch den Auftreffgrad ( $\eta$ ) und die Haftung durch den Haftanteil ( $h$ ) gekennzeichnet. Beide Größen werden auf die Einzelfaser bezogen:  $\eta = \delta/d_f$ , wobei  $\delta$  [m] die Breite der Schicht weit vor dem Einzelfaser darstellt, aus der die Partikeln auf die Faser vom Durchmesser  $d_f$  [m] aufprallen (Bild 1).

Der Haftanteil wird als Quotient aus der Anzahl von anhaftenden und aufprallenden Partikeln definiert. Der Einzelfaser-Abscheidegrad  $\phi$  kann als Produkt des Auftreffgrades und des Haftanteiles ausgedrückt werden:  $\phi = \eta h$ .

Während für die Beschreibung von Transportmechanismen ausreichende Berechnungsunterlagen vorliegen (E. Schweers und F. Löffler (1994)), ist der theoretische und praktische Hintergrund der Bestimmung des Haftanteils viel weniger ausgearbeitet. Trotzdem kann der Einzelfaser-Abscheidegrad  $\phi$  in Kenntnis der Parameter des Gases, der Strömung, der Filterschicht und der Staubteilchen mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden. Der Abscheidegrad der Faserschicht kann aus Einzelfaser-Abscheidegrad berechnet werden (F. Löffler (1988)).

### 3 Strömung in Filterschichten

Technische Faserfilter sind poröse Schichten, deren Eigenschaften sich infolge der Herstellungstechnologie räumlich ändern. Während der Filtration wird die Inhomogenität auch durch die abgelagerten Partikeln beeinflusst. Die Strömung durch die Filterschicht der Dicke  $s$  [m] wird durch den Druckunterschied (Druckverlust des Filters)  $\Delta p$  [Pa] hervorgerufen. Nach S. Kuwabara (1959) kann  $\Delta p$  bei homogener Verteilung der Fasern mit dem Ausdruck

$$\Delta p = F^* \mu v L \quad (1)$$

bestimmt werden, wobei  $\mu$  [kg/m/s] die dynamische Viskosität,  $v$  [m/s] die Filtrationsgeschwindigkeit und  $L$  [m/m<sup>2</sup>] die Gesamtlänge der Fasern je m<sup>2</sup> Filterschicht bedeuten:

$$L = \frac{4 \alpha s}{d_f^2 \pi} \quad (2)$$

In Gl. (2) stellt  $\alpha$  die Packungsdichte, d.h. den Quotient aus Faservolumen und aus Filterschichtvolumen, dar.  $F^*$  kann wie folgt bestimmt werden:

$$F^* = \frac{4\pi}{Ku}, \quad (3)$$

mit  $Ku = -0.5 \ln \alpha - 0.75 + \alpha - 0.25\alpha^2$ .

Wenn die Verteilung der Fasern in der Filterschicht inhomogen ist oder sich der Durchmesser der Fasern verändert, kann die Strömung mit Hilfe der Verallgemeinerung des Darcyschen Filtergesetzes

$$\underline{v} = -C \operatorname{grad} p \quad (4)$$

beschrieben werden. In Gl. (4) stellt  $C$  [ $\text{m}^2/\text{Pa}/\text{s}$ ] die örtliche Durchlässigkeit der Faserschicht dar, die mit den Gleichungen (1) – (4) ausgedrückt werden kann:

$$C = \frac{d_f^2 \text{Ku}}{16 \alpha \mu}. \quad (5)$$

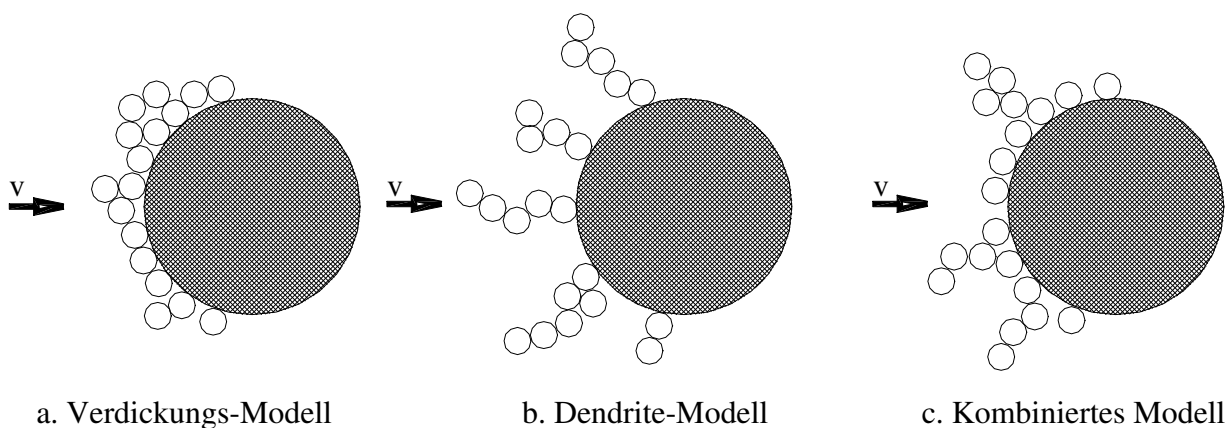
Unter Vernachlässigung des Volumens der Fasern in der Filterschicht lautet die Kontinuitätsgleichung:

$$\text{div } \underline{v} = \text{div}(C \text{ grad } p) = 0. \quad (6)$$

Bei gegebener Durchlässigkeitsverteilung kann das Strömungsfeld in der Filterschicht mit Gl. (6) mit einfachen Randbedingungen für den Druck bestimmt werden. Numerische Berechnungen der 3D-Strömung in Filterschichten, die aus Filter-Elementen von verschiedenen Packungsdichten zufallsbestimmt aufgebaut wurden, haben gezeigt, dass bei konstanter Filtrationsgeschwindigkeit der Druckverlust mit zunehmender Inhomogenität der Packungsdichten abnimmt (T. Lajos (1985)).

#### 4 Ablagerung und Einfluss der abgeschiedenen Staubteilchen

Versuche haben gezeigt, dass sich die Staubteilchen in zwei verschiedenen Weisen auf den Fasern ablagern können: Sie bilden einen "Überzug" auf der Faseroberfläche (d.h. sie vergrößern den Faserdurchmesser  $d_f$ ) oder sie haften aneinander und bilden faserartige Formationen, Dendrite (Bild 2). Diese Staubteilchen vergrößern die Oberfläche, die an der Abscheidung weiterer Staubteilchen teilnimmt, und sie erhöhen als zusätzlicher aerodynamischer Widerstand den Druckverlust. Beide Einflüsse der abgelagerten Staubteilchen hängen von der Art und Weise der Ablagerung ab, zB. wenn die Staubteilchen Dendrite bilden, ist die Zunahme des Druckverlustes viel grösser als bei der Partikelablagerung auf der Faseroberfläche.



**Bild 2:** Ablagerung der Staubteilchen auf Faseroberfläche

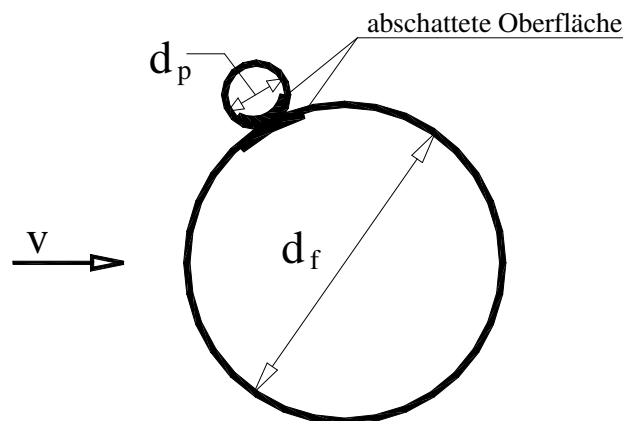
In dem vorgeschlagenen Modell wird der Anteil der abgelagerten Staubteilchen, die faserartige Formationen (Dendrite) bilden ( $b$  [-]), mit der Konzentration der abgelagerten Staubteilchen ( $c_d$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]) in Korrelation gebracht. Aufgrund der Auswertung experimenteller Ergebnisse konnte ein linearer Zusammenhang zwischen der Konzentration der abgelagerten Staubteilchen und dem Anteil der abgelagerten Staubteilchen, die faserartige Formationen (Dendrite) bilden, bestimmt werden:  $b = 0.024 c_d$ .

Die örtliche Durchlässigkeit der Faserschicht wird durch die abgelagerten Partikeln beeinflusst, so dass die für reine Filterschichten gültige Gl.(5) erweitert werden muss, (A. A. El-Hamied (1997)):

$$C = \frac{Ku}{16\mu} \cdot \frac{1}{\frac{\alpha}{d_f^2} + \frac{b c_d}{\rho_p d_p^2}}, \quad (7)$$

wobei  $d_p$  [m] der Partikeldurchmesser ist.

Die Teilnahme der schon abgeschiedenen Staubteilchen an der Abscheidung weiterer Staubteilchen wird als Zunahme der Abscheide-Oberfläche berücksichtigt (T. Lajos (1986)). Bei Berechnung dieser Zunahme wird die gegenseitige "Abschattung" der Teilchen und Fasern berücksichtigt (Bild 3), A. A. El-Hamied, T. Lajos (1997).

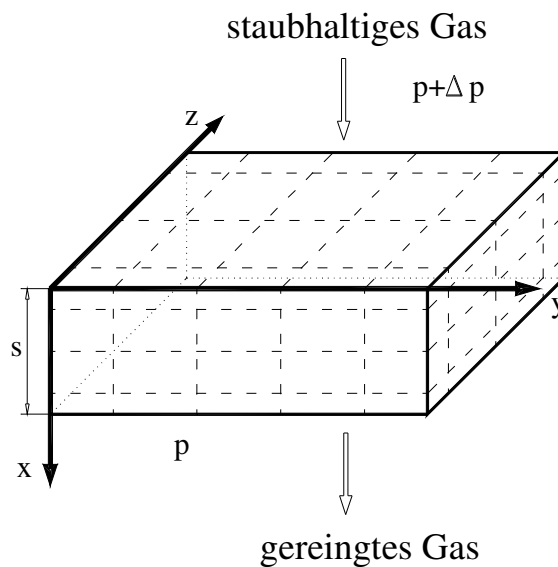


**Bild 3:** Abschattung der Abscheideoberfläche

Wenn ein Staubteilchen abgeschieden wird, beträgt die Gesamtzunahme der Abscheide-Oberfläche nur etwa die Hälfte der Teilchenoberfläche.

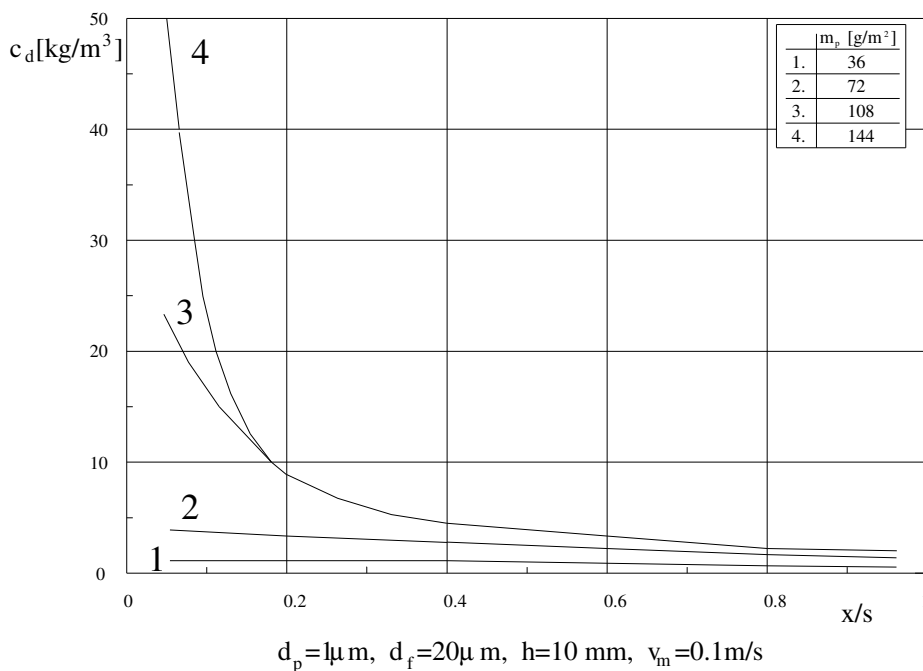
## 5 Die numerische Simulation

Die vorangehenden Überlegungen ermöglichen eine numerische Simulation der Ablagerung der Staubteilchen, d.h. des Verstopfungsvorganges. Eine Modell-Filterschicht wird am Beginn der Berechnung aus Elementen von verschiedenen Faserkenngrößen (Packungsdichte und Durchmesser) aufgebaut (Bild 4).



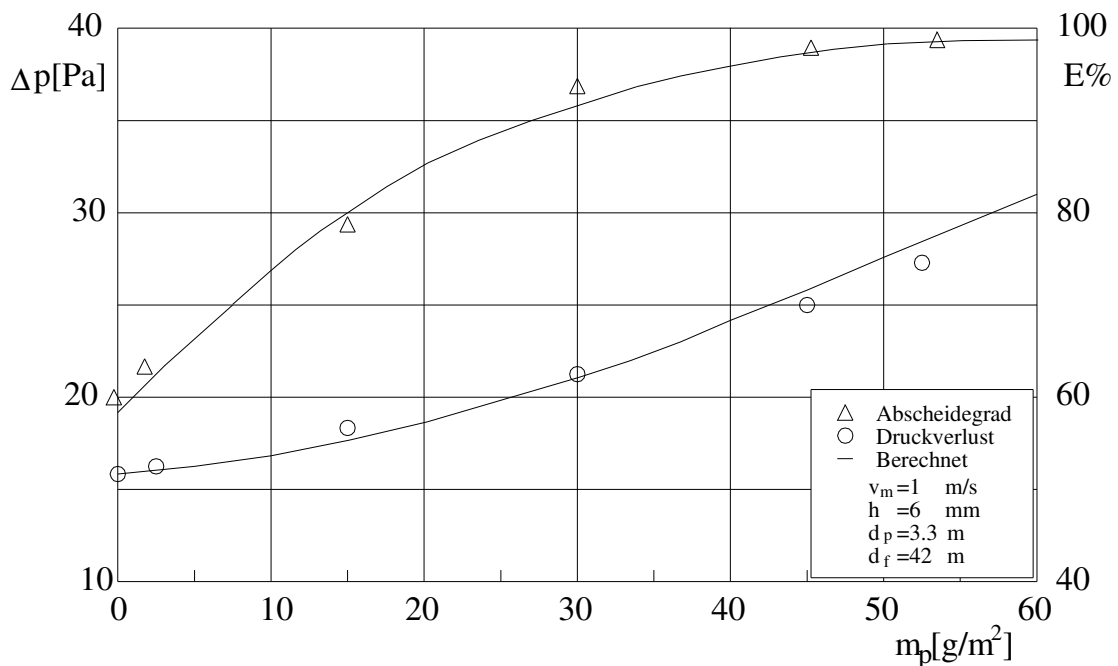
**Bild 4:** Filterschicht-Modell

Die Lösung von Gl. (6) ergibt im allgemeinen ein 3D-Strömungsfeld. Damit sind die Filtrationsgeschwindigkeiten auf der Oberfläche der einzelnen Filterelemente bekannt. Dadurch lassen sich die örtlichen Abscheidegrade und sowohl die Staubablagerung in einzelnen Filterelementen in einem vorgeschriebenen Zeitintervall als auch die Staubkonzentration in dem aus dem gegebenen Filterelement ausströmenden Gas bestimmen. Mit wiederholter Berechnung kann der zeitliche Ablauf des Abscheidvorganges simuliert werden. Bild 5 zeigt die berechnete Verteilung der Konzentration der in einer Filterschicht abgelagerten Staubteilchen bei verschiedenen Belastungen.



**Bild 5:** Berechnete Verteilung der Konzentration der abgeschiedenen Staubteilchen

Der Vergleich der berechneten und gemessenen Zunahme des Abscheidegrades (E) und Druckverlustes ( $\Delta p$ ) als Funktion der Filterbelastung ( $m_p$  [ $\text{g}/\text{m}^2$ ], die mit der Filtrationszeit proportional ist) zeigt ausreichende Übereinstimmung (Bild 6).



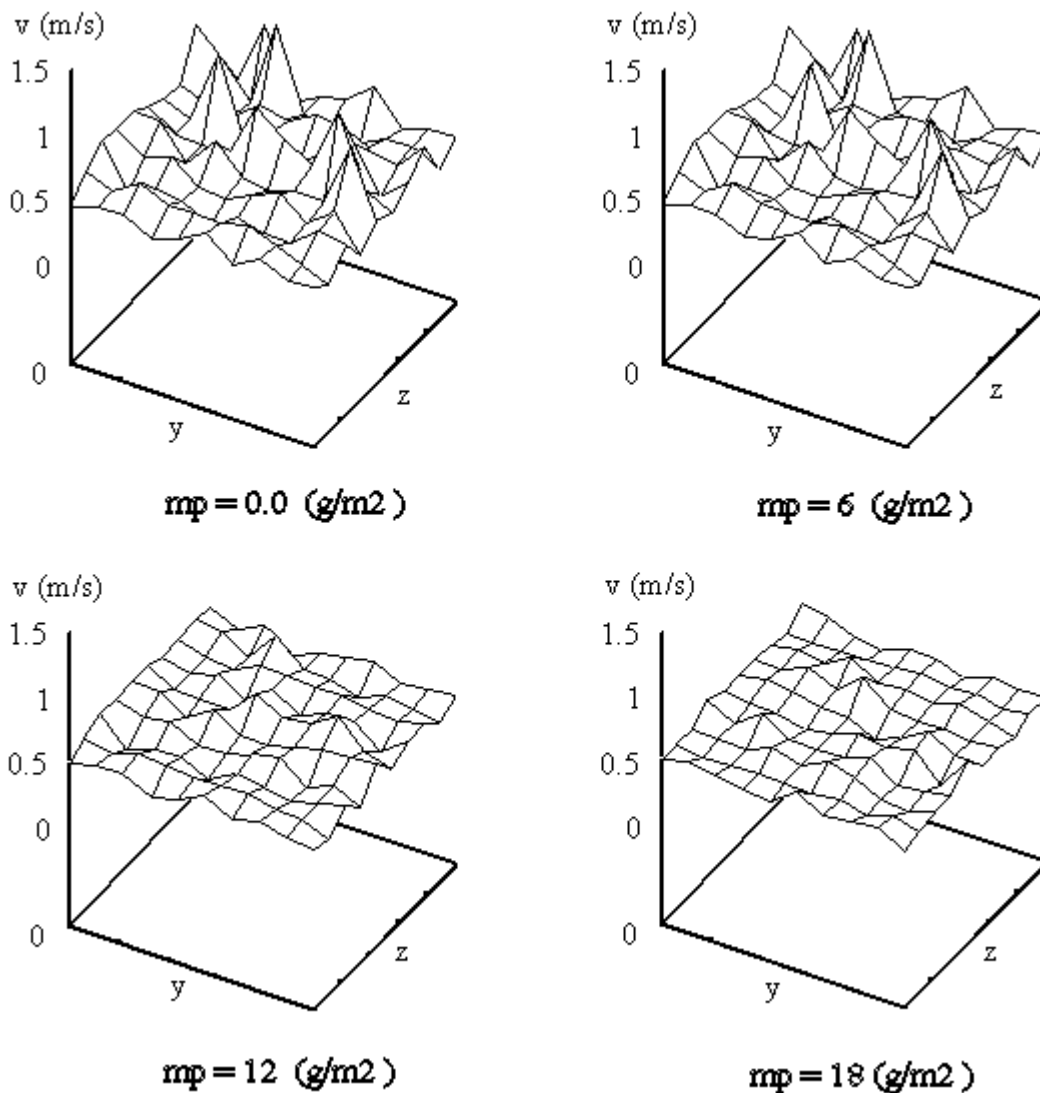
**Bild 6:** Vergleich der gemessenen und berechneten Verlauf des Druckverlustes und Abscheidegrades

Die numerische Simulation ermöglicht die Modellierung des Verstopfungsvorganges und die Bestimmung des Einflusses verschiedener Faktoren (z.B. Packungsdichte-Verteilung des reinen Filters) auf die Filtrationsparameter.

## 6 Das Entstehen von Staubkuchen

Die Lebensdauer einer Filterschicht kann in zwei Phasen unterschieden werden. In der ersten Phase erfolgt die Abscheidung in der ganzen Filterschicht, die als Tiefen- oder Speicherfilter funktioniert. Die grösste Intensität der Staubablagerung wurde sowohl mit Messungen als auch mit Berechnungen auf der Rohgas-Seite der Filterschicht beobachtet (Bild 5). Die an den in der Nähe der Oberfläche der Filterschicht befindlichen Fasern abgeschiedenen Staubteilchen werden graduell eine zusammenhängende Staubschicht (Staubkuchen) bilden, die in der zweiten Phase die Aufgabe der Abscheidung übernimmt (Oberflächenfiltration). Diese Staubschicht verursacht eine Gleichmässigung der Geschwindigkeitsverteilung auf Rohgasseite der Filterschicht. Bild 7 zeigt die berechnete Geschwindigkeitsverteilungen in Eintrittsquerschnitt bei verschiedenen Belastungen einer inhomogenen Filterschicht.

Da die Packungsdichte des Staubkuchens viel grösser als die der Filterschicht ist, nimmt der Druckverlust schnell zu. Die Oberflächenfiltration ermöglicht die Regenerierung der Filterschicht durch Entfernung des Staubkuchens z.B. durch Rütteln oder Druckstossreinigung.



**Bild 7:** Berechnete Geschwindigkeitsverteilungen in Eintrittsquerschnitt einer Filterschicht

Der Aufbau von Staubkuchen wurde von mehreren Autoren untersucht und simuliert (E. Schmidt und F. Löffler (1993)) wobei der Ausbildungsmechanismus der zusammenhängenden Staubschicht auf der Rohgasseite der Filterschicht nicht untersucht wurde. Durch die Koppelung der Speicherfilter-Simulation mit der Berechnung des Staubkuchen-Aufbaues wird die Vorausberechnung des ganzen Verstopfungsvorgangs ermöglicht. Dazu braucht man aber die Kenntnis über das Entstehen der zusammenhängenden Staubschicht. Einige experimentelle Untersuchungen (H. J. Rembor and G. Kasper (1999)) weisen darauf hin, dass u.U. die seitliche Ausbreitung der abgeschiedenen Staubteilchen viel kleiner ist als der mittlere Abstand zwischen den Fasern. Deshalb, wenn die Fasern regelmässig verteilt sind, erfolgt das Entstehen der Staubschicht nur bei sehr hoher Konzentration der abgeschiedenen Staubteilchen.

Das Entstehen des Staubkuchens bei niedrigerer Staubbelastung kann mit der Inhomogenität der Faserverteilung erklärt werden. Bei inhomogener Faserverteilung werden zuerst die Abstände zwischen den nächstliegenden Fasern durch Dendriten überbrückt. Die Staubteilchen, die sich auf die so entstandenen dickeren Formationen ablagern, können

grössere Faserabstände überbrücken. An der Entwicklung der numerischen Simulation dieses Vorganges wird gearbeitet.

Die Forschung wurde von OTKA gefördert (T023755). Der Autor bedankt sich für die Unterstützung.

## **Literaturverzeichnis**

**A. A. El-Hamied** (1997)

Investigation of the Dust Separation Process in Fibrous Filters. Thesis, Technical University of Budapest

**A. A. El-Hamied, T. Lajos** (1997)

Investigation of loaded fibrous filter. Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng. 41 1. 3-20.

**S. Kuwabara** (1959)

The Forces Experienced by Randomly Distributed Parallel Circular Cylinders or Spheres in Viscous Flow at Small Reynolds Numbers. J. Phys. Soc. Japan, Vol. 4. pp. 527-532.

**T. Lajos** (1985)

The Effect of Inhomogeneity on the Flow in Fibrous Filters. Staub, Reinhaltung der Luft, Band 45, pp. 19-22.

**T. Lajos** (1986)

A Model for Calculation of Clogging Process in Filter Mats. 1<sup>st</sup> World Congress Particle Technology, Nürnberg, pp. 175-188.

**F. Löffler** (1988)

Staubabscheiden. Thieme Verlag Stuttgart, New York

**H. J. Rembor and G. Kasper** (1999)

Transient Filtration Behaviour of Fibrous Filters: Deposited Particulate Structures Studied with a Confocal Laser Scanning Microscope. Proc. of the 1999 Fall Topical Conf. Minneapolis pp. 39-46.

**E. Schmidt und F. Löffler** (1993)

Verification of Dust Cake Compression by Means of Structure Analysis and the Effect of Filtration Performance. 6<sup>th</sup> World Filtration Congress, Nagoya, Japan, pp. 54-59.

**E. Schweers und F. Löffler** (1994)

Realistic Modelling of the Behaviour of Fibrous Filters through Consideration of Filter Structure. Powder Technology Vol. 80, pp. 191-206.