

## Dissertation

# **Einfluss von Ladung und Faserquerschnittsform auf das Filtrationsverhalten abreinigbarer Polyimid- Nadelfilze**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktors der technischen Wissenschaften / der Naturwissenschaften  
unter Leitung von

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wilhelm Höflinger  
Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Techn. Biowissenschaften  
Forschungsbereich Mechanische Verfahrenstechnik und Luftreinhaltetechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Dipl.-Ing. Heimo Rud

Matr. Nr. 9626482

Stadtgraben 4/4

3390 Melk



Melk, im November 2008

## **Kurzfassung**

Das Betriebsverhalten von Abreinigungsfiltermedien hinsichtlich der sich entwickelnden Reingasstaubkonzentration, des Staubeinlagerungsverhaltens und des sich infolge einstellenden Restdruckverlustes wird durch eine Vielzahl von Einflussgrößen bestimmt. Zu den Einflussgrößen zählen u. a. die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Staubes und des Trägergases, die Eigenschaften des Filtermediums, der apparative Aufbau des Filters sowie die Art der Abreinigung. In vorliegender Forschungsarbeit wurde der Einfluss des Ladungszustandes des eingesetzten Fasermaterials sowie die Faserquerschnittsgeometrie auf das Betriebsverhalten von Polyimid- Nadelfilzen untersucht.

Es konnte gezeigt werden, dass elektrostatische Ladungen des Fasermaterials sich hauptsächlich auf die Partikelabscheidung, jedoch kaum auf die Staubeinlagerung und die Restdruckverlustentwicklung auswirken. Der geringe Einfluss auf Staubeinlagerung und Restdruckverlustentwicklung konnte auf eine rasche Kompensation bzw. Abschirmung von elektrostatischen Faserladungen in der Staubeinlagerungsschicht, die verbesserte Partikelabscheidung auf eine elektrostatisch unterstützte Tiefenfiltration im Inneren der Filtermedien zurückgeführt werden.

Mittels einer weiterentwickelten bildoptischen Strukturanalysemethode konnte gezeigt werden, dass das Abscheide- und Regenerationsverhalten von textilen Abreinigungsfiltermedien von der Struktur oberflächennaher Faserschichten mitbestimmt wird. So konnte bei gegebenen Prüfbedingungen die Staubeinlagerung von verschiedenen Filtermedien mit Hilfe eines sogenannten Porenvolumenäquivalents, der Staubdurchtritt mit Hilfe einer reduzierten Oberflächenporosität beschrieben werden.

Polyimid- Fasermaterial weist herstellungsbedingt mehrfach gelappte (multilobale) Faserquerschnittsformen auf. Es konnte gezeigt werden, dass sich bei der Umströmung von Polyimid- Fasern mit multilobalen Querschnitten im Vergleich zu konventionellen Fasern mit kreisrunden Querschnitten größere Bereiche sehr niedriger Strömungsgeschwindigkeit ausbilden. Der in diese Strömungstozonen während der Filtration eingelagerte Staub wirkt sich aufgrund der dort herrschenden geringen Strömungsgeschwindigkeiten nur schwach auf den Restdruckverlust aus.

Aus dem Vergleich der Partikelabscheidung von Filtermedien bestehend aus Fasern mit multilobalen Faserquerschnittsformen mit Filtermedien bestehend aus Fasern kreisrunden Querschnitts konnte eine Verstärkung der Trägheitsabscheidung bei den Filtermedien bestehend aus Fasern mit multilobalen Querschnittsformen nachgewiesen werden. Dieses Verhalten kann mit einem Hineinschießen der Partikel in die Strömungstotzonen um multilobal geformte Faserquerschnitte erklärt werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass durch den Einsatz von leicht geladenen, multilobal geformten Polyimid- Fasermaterial das Betriebsverhalten von Abreinigungsfiltermedien hinsichtlich der sich entwickelnden Reingasstaubkonzentration, des Staubeinlagerungsverhaltens und des sich infolge einstellenden Restdruckverlustes positiv beeinflusst werden kann.

Herrn Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wilhelm Höflinger danke ich für die Zuweisung des interessanten Themas und für die vielen fruchtbaren Diskussionen, die mir geholfen haben diese Arbeit durchzuführen.

Herrn Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerd Mauschitz und Herrn Dipl.-Ing. Peter Grundnig danke ich für die zahlreichen Ratschläge und fachlichen Anregungen, aber vor allem für die Diskussionsbereitschaft.

Ich möchte mich bei Herrn Dipl.-Ing. Josef Schuberth, Herrn Dipl.-Ing. Harald Schablitzky sowie Frau Tina Hofmayer für die Mitarbeit im Rahmen von Vertiefungs- sowie Diplomarbeiten zum Forschungsprojekt bedanken.

Der Firma Inspec Fibres GmbH will ich für die Finanzierung des Forschungsprojektes „Untersuchung des Restdruckverlustverhaltens von P84<sup>®</sup>-Nadelfizen“ danken. Im Speziellen will ich mich auf Seiten des Projektpartners bei Herrn Dr. Herbert Griesser, Herrn Dipl.-Ing. Günter Gasparin sowie Herrn Dipl.-Ing. Georg Rathwallner für die gute Zusammenarbeit, wodurch die Arbeit erst möglich geworden ist, bedanken.

Besonderen Dank schulde ich meiner Frau Dipl.-Ing. Leyla Yücel Rud sowie meiner Familie für ihre Unterstützung und ihren Glauben an mich während meines Studiums.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Problemstellung der Forschungsarbeit.....	5
3	Grundlagen zur Staubabscheidung mit Hilfe von Abreinigungsfiltermedien .....	8
3.1	Staubabscheidung an der Einzelfaser.....	8
3.2	Betriebsverhalten von Abreinigungsfiltermedien .....	13
4	Herstellung und Charakterisierung von Abreinigungsfiltermedien .....	16
4.1	Aufbau und Herstellung von Nadelfilzen .....	16
4.2	Konventionelle Charakterisierungsparameter zur Beschreibung von Abreinigungsfiltermedien .....	21
4.3	Aktueller Stand zur Charakterisierung der Struktur und des Ladungszustandes von Oberflächenfiltermedien.....	27
5	Weiterentwicklung der Methode zur Erfassung der Oberflächenstruktur von Abreinigungsfiltermedien mittels Bildanalyse .....	30
5.1	Parameter zur Beschreibung der oberflächennahen Porenstruktur .....	31
5.2	Einfluss der Oberflächenstruktur eines Filtermediums auf das Staubeinlagerungsverhalten und die Reingasstaubkonzentration.....	42
5.3	Vorgaben für die Fertigung der benötigten Filtermedien .....	42
5.4	Bestimmung der Strukturparameter .....	44
5.5	Einfluss der Oberflächenstruktur eines Filtermediums auf Staubeinlagerungsverhalten und Reingasstaubkonzentration .....	47
6	Einfluss elektrostatischer Ladungen auf das Filtrationsverhalten von Abreinigungsfiltermedien .....	57
6.1	Elektrostatische Unterstützung der Partikelabscheidung an der Einzelfaser .....	57
6.2	Bestimmung des Ladungszustandes von Abreinigungsfiltermedien .....	58
6.3	Veränderung des Ladungszustandes von Nadelfilzen mittels negativer Koronaentladung .....	65
6.4	Einfluss eines erhöhten Ladungszustandes auf das Betriebsverhalten von Abreinigungsfiltermedien.....	72

7	Einfluss multilobaler Faserquerschnittsformen auf die Struktur und das Filtrationsverhalten von Abreinigungsfiltermedien .....	76
7.1	Entstehung multilobaler Faserquerschnittsformen .....	76
7.2	Einfluss der Faserquerschnittsform auf den Aufbau eines Nadelfilzes.....	78
7.3	Strömungsfeld um multilobale Einzelfasern im Vergleich zum Strömungsfeld um Fasern mit Kreisquerschnitt .....	86
7.4	Strömungssituation in einem Nadelfilz .....	103
7.5	Tiefenfiltrationsversuche .....	110
8	Diskussion der durchgeführten Arbeiten und Ausblick für weiterführende Untersuchungen .....	118
	Zusammenfassung .....	124
	Tabellenverzeichnis .....	127
	Abbildungsverzeichnis .....	128
	Literaturverzeichnis .....	132

### 1 Einleitung

Abreinigungsfilter zählen aufgrund der erzielbaren hohen Abscheidegrade neben den Elektroentstaubern zu den großtechnisch am häufigst eingesetzten Entstaubern. Sie dienen allgemein zur Abscheidung von Partikeln aus Gasen bei hohen Staubgehalten in der Größenordnung von einigen  $\text{g/m}^3$ . Die Staubabscheidung erfolgt hauptsächlich an der Filtermitteloberfläche. Die abgeschiedenen Partikel verstopfen zunächst die oberflächennahen Faserschichten, wodurch sich die eigentliche, hochwirksame Filtrationsschicht ausbildet. Während der Staubeinlagerung und während des Kuchenwachstums steigt der Durchströmungswiderstand des zunehmend mit Staub beladenen Filtermediums. Bei konstantem Volumenstrom steigt mit Erhöhung des Durchströmungswiderstandes auch der Druckabfall über das Filterelement. Wird hingegen die Filtration bei konstantem Druckabfall betrieben, reduziert sich entsprechend der Volumenstrom. Dies macht ein periodisches Abreinigen der Filtermittel unumgänglich, um den gebildeten Staubkuchen zu entfernen und damit den Durchströmungswiderstand des Filtermittels zu reduzieren. Das mit Staubpartikeln beladene Filtermedium wird entweder im „online“ Betrieb durch einen Druckluftstoß entgegen der Durchströmungsrichtung oder „offline“ durch Rückspülen und/oder Rütteln regeneriert. Das Filtermedium wird meist in Form von Schläuchen oder Taschen eingesetzt. Man spricht von Schlauch- bzw. Taschenfiltern. Der sich ausbildende Staubkuchen stellt die hochwirksame Filterschicht dar, wodurch Gesamtabscheidegrade von über 99,9% erzielt werden können. Als textile Filtermedien können u.a. Gewebe, Nadelfilze oder Vliese eingesetzt werden. Die in der Oberflächenfiltration eingesetzten Filtermedien ähneln in ihrer Struktur oft Tiefenfiltern, weisen jedoch einen erheblich höheren Faservolumenanteil gegenüber Tiefenfiltern auf.

Aufgrund ihrer guten Abscheideeigenschaften, ihrer Einsatzsicherheit auch bei explosiven Gas- Staub- Mischungen sowie ihren langen Standzeiten im Vergleich zu rein speichernden Filtermedien sind Abreinigungsfilter weit verbreitet und werden in vielen Bereichen der Industriegasentstaubung erfolgreich eingesetzt (z.B. in der Zementindustrie, Kalkindustrie, Kohlenindustrie, ...).

Es gibt derzeit kein allgemeingültiges Berechnungsmodell, welches eine zuverlässige Auslegung von Filteranlagen im Voraus zulässt. Daher werden Abreinigungsfilter weitgehend auf Basis von Erfahrung und Empirie ausgelegt. Die Schwierigkeiten der

Berechnung des Filtrationsverhaltens von Abreinigungsfiltern liegen in ihrer instationären Betriebsweise vor allem jedoch in der großen Zahl von Einflussgrößen. Zu den Einflussgrößen zählen u. a. die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Staubes und des Trägergases, die Eigenschaften des Filtermediums, der apparative Aufbau des Filters sowie die Art der Abreinigung. Unter den Eigenschaften des Filtermediums, welche das Filtrations- bzw. Abreinigungsverhalten nachhaltig bestimmen können, sind u.a. der elektrostatische Ladungszustand und die Querschnittsform des eingesetzten Fasermaterials zu nennen. Ihr funktionelles Zusammenwirken ist mitentscheidend für das Betriebsverhalten von Abreinigungsfiltermedien.

### **2 Problemstellung der Forschungsarbeit**

Für die Abscheidung von Feinstaubpartikeln aus Gasen besitzen filternde Abscheider wegen ihres breiten Spektrums unterschiedlicher Anwendungsmöglichkeiten und ihres guten Abscheidevermögens große Bedeutung. Unter den filternden Abscheidern dienen Abreinigungsfilter zur Entstaubung von Gasen mit hohen Rohgasstaubkonzentrationen. Trotz ihres hohen Entwicklungsstandes ist die Auslegung von Abreinigungsfiltern auch heute noch problembehaftet. Schwierigkeiten bei der Modellrechnung zur Partikelabscheidung bereiten vor allen die große Anzahl von Einflussgrößen. Exemplarisch seien als Parameter die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Staubes und des Trägergases, der apparative Aufbau des Filters, die Betriebsweise der Filtermittelregeneration sowie die Eigenschaften des Filtermediums genannt.

Während die Eigenschaften des Staubes und des Trägergases sowie der apparative Aufbau und die Abreinigungstechnik von der jeweiligen Filteranlage vorgegebene Größen sind, kann durch Verbesserung und Weiterentwicklung der eingesetzten Filtermedien das Betriebsverhalten von Abreinigungsfiltern in vielen Fällen verbessert werden.

Die vorliegende Forschungsarbeit wird mit der Absicht in Angriff genommen den Einfluss des Ladungszustandes des eingesetzten Fasermaterials sowie der Faserquerschnittsgeometrie auf das Betriebsverhalten von Abreinigungsfiltermedien zu untersuchen.

Bislang wurde der Einfluss elektrostatischer Faserladungen auf das Abscheideverhalten von Tiefenfiltermedien durch mehrere Autoren eingehend untersucht. Bei Abreinigungsfiltermedien konnte durch Schmidt [1] gezeigt werden, dass durch den Einfluss externer elektrostatischer Felder die Partikelabscheidung, sowie die Restdruckverlustentwicklung über das Filtermedium positiv beeinflusst werden kann. Es stellt sich die Frage ob und wie Ladungen des Fasermaterials bei Abreinigungsfiltermedien einen Einfluss auf Staubabscheidung und Restdruckverlustentwicklung nehmen können.

Um diese Frage zu klären, sollen im Rahmen von Ladungsexperimenten textile Abreinigungsfiltermedien elektrostatisch aufgeladen, die Faserladung messtechnisch

bestimmt und die Auswirkungen der Faseraufladung auf das Abscheide- bzw. Regenerationsverhalten hinsichtlich der nach der Regeneration eingelagerten Reststaubmasse, des Restdruckverlustes und der mittleren Reingasstaubkonzentration beurteilt werden.

Das Abscheide- und Regenerationsverhalten von textilen Abreinigungsfiltermedien wird von der Struktur oberflächennaher Faserschichten mitbestimmt, wobei den Poren als interne Staubsammelräume und den porenbegrenzenden Fasern als Staubpartikelkollektorenflächen besondere Bedeutung zukommt.

So konnte Koschutnig [2] mit Hilfe einer bildoptischen Analyseverfahren den Einfluss der Oberflächenbehandlung auf das Staubeinlagerungsverhalten von textilen Filtermedien für die industrielle Feinstaubabscheidung beschreiben. Dabei zeigten unverdichtete Nadelfilze eine vermehrte Staubeinlagerung verbunden mit einem raschen Anwachsen des Restdruckverlustes im Vergleich zu kalandrierten Filtermedien.

Im Detail soll der Einfluss der Faserquerschnittsform auf die strukturelle Ausformung des oberflächennahen Porensystems von Abreinigungsfiltermedien und infolge das Durchströmungsverhalten und die Partikeleinlagerung untersucht werden, um neue Erkenntnisse über die mechanistischen Zusammenhänge, die zu Verstopfungsvorgängen in Abreinigungsfiltermedien führen können, zu gewinnen.

Dazu ist es zunächst notwendig neue Strukturparameter zu definieren mit deren Hilfe eine Beschreibung der oberflächennahen Filtermittelstrukturen möglich wird.

Die Bestimmung der neu definierten Strukturparameter macht eine Weiterentwicklung der von Koschutnig [2] beschriebenen bildoptischen Strukturanalyse notwendig.

Ferner soll durch Strömungssimulation die Umströmung unterschiedlicher Faserquerschnittsformen visualisiert werden um detailliertere Informationen zur Partikeleinlagerung zu erhalten.

Diese Simulationsergebnisse sind durch Filtermitteltests am Normfilterprüfstand, durch Bestimmung der Filtrationsparameter Reststaubmasse, Restdruckverlust und mittlere Reingasstaubkonzentration zu verifizieren.

Die Erkenntnisse aus der Strukturanalyse unbestaubter Filtermedien, aus den Filtermittelprüfungen sowie aus den Strömungssimulationen sollen zusammengeführt einen tieferen Einblick in das Abscheide- und Regenerationsverhalten von textilen Abreinigungsfiltermedien geben.

### 3 Grundlagen zur Staubabscheidung mit Hilfe von Abreinigungsfiltermedien

Im Kapitel *Grundlagen zur Staubabscheidung mit Hilfe von Abreinigungsfiltermedien* soll ein Überblick über die wirksamen Abscheidemechanismen in einem Abreinigungsfilter sowie an dessen Oberfläche gegeben werden. Die Staubabscheidung in einem unbestaubten Filtermedium kann mit den Abscheidemechanismen eines Tiefenfiltermediums verglichen werden. Dazu sollen die Abscheidemechanismen an der Einzelfaser diskutiert werden. Nach einer Verstopfungsphase verlagert sich die Staubabscheidung bei Abreinigungsfiltermedien an die Oberfläche des Filtermediums, wo die Abscheidemechanismen der Oberflächenfiltration vorherrschend sind. Dazu sollen die Verstopfungsphase und die Kuchenfiltration behandelt werden.

#### 3.1 Staubabscheidung an der Einzelfaser

Zur Beschreibung der einzeln wirksamen Abscheidemechanismen im Inneren eines Filtermediums wird eine unbestaubte Einzelfaser betrachtet.

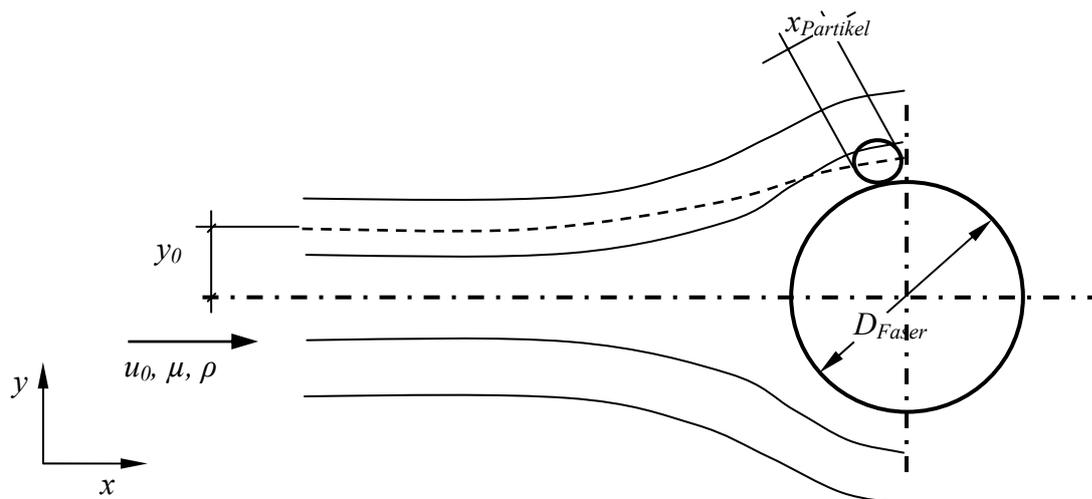


Abbildung 3-1: Modell der senkrecht angeströmten zylindrischen Einzelfaser, nach [3]

### Symbolik

$y_0$	<i>Koordinate der Grenzpartikelbahn [<math>\mu\text{m}</math>]</i>
$u_0$	<i>Geschwindigkeit der ungestörten Anströmung [<math>\text{m/s}</math>]</i>
$\mu$	<i>dynamische Gaszähigkeit [<math>\text{Pa s}</math>]</i>
$\rho$	<i>Gasdichte [<math>\text{kg/m}^3</math>]</i>
$x, y$	<i>Koordinaten [<math>\mu\text{m}</math>]</i>
$x_{\text{Partikel}}$	<i>Partikeldurchmesser [<math>\mu\text{m}</math>]</i>
$D_{\text{Faser}}$	<i>Faserdurchmesser [<math>\mu\text{m}</math>]</i>

In Abbildung 3-1 ist eine zylindrische Einzelfaser, die von einem partikelbeladenen Trägergasstrom angeströmt wird, dargestellt. Dabei kann für niedrige Reynoldszahlen eine Potentialströmung als Näherung für das Strömungsfeld im Bereich der Faser angenommen werden. Feine Staubpartikel werden den Stromlinien der Strömung folgen und können durch verschiedene Transportmechanismen, wie z.B. Trägheit, elektrostatische Wechselwirkungskräfte sowie Braunsche Molekularbewegung, zur Faser hin abgelenkt werden. Damit sich ein Staubpartikel abscheidet, muss das Partikel zur Faseroberfläche transportiert werden und dort durch Haftkräfte festgehalten werden. Die Grenzpartikelbahn stellt jene Partikelbahn dar, innerhalb derer alle Partikel einer bestimmten Partikelgröße  $x_{\text{Partikel}}$  mit der Faseroberfläche in Berührung kommen.

In der Realität können Teilchen, die außerhalb dieser Grenzpartikelbahn liegen, gleichfalls mit der Faseroberfläche kontaktieren bzw. Teilchen innerhalb der Grenzpartikelbahn ohne Berührung die Faser passieren. Dies ist auf stochastisch auftretende Transportmechanismen wie z.B. dem Einfluss der Braunschen Molekularbewegung sowie auf elektrostatische Wechselwirkungen von Partikeln untereinander zurückzuführen.

### **Einzelfaserabscheidegrad $\varphi$**

Bezieht man nun die Grenzkoordinate  $y_0$  auf den Faserradius erhält man den Auftreffgrad  $\eta$ .

$$\eta = \frac{2y_0}{D_F} \quad (3-1)$$

$\eta$	<i>Auftreffgrad [-]</i>
$y_0$	<i>Koordinate der Grenzpartikelbahn [<math>\mu\text{m}</math>]</i>
$D_F$	<i>Faserdurchmesser [<math>\mu\text{m}</math>]</i>

Der Haftanteil  $h$  gibt jenen Anteil der Partikel, die zur Faseroberfläche gelangen und dort haften bleiben, im Vergleich zu allen an die Faser gelangenden Partikeln an. Der Abscheidegrad  $\varphi$  einer Einzelfaser ergibt sich aus der Multiplikation des Auftreffgrades  $\eta$  mit dem Haftanteil  $h$ .

$$\varphi = \eta * h \quad (3-2)$$

$\varphi$	<i>Einzelfaserabscheidegrad [-]</i>
$\eta$	<i>Auftreffgrad [-]</i>
$h$	<i>Anteil der auftreffenden Partikel die auf der Faser haften bleiben [-]</i>

Bleiben alle mit der Faseroberfläche kontaktierenden Partikel haften, ist der Einzelfaserabscheidegrad gleich dem Auftreffgrad. Der Einzelfaserabscheidegrad kann auch als „Wirkungsgrad“ der Faserprojektionsfläche angesehen werden.

### **Staubabscheidemechanismen an der Einzelfaser**

Unter Staubabscheidemechanismen versteht man die verschiedenen Transportmechanismen durch die Partikel (quer zu den Stromlinien) zur Faseroberfläche gelangen können [3, 4, 5, 6].

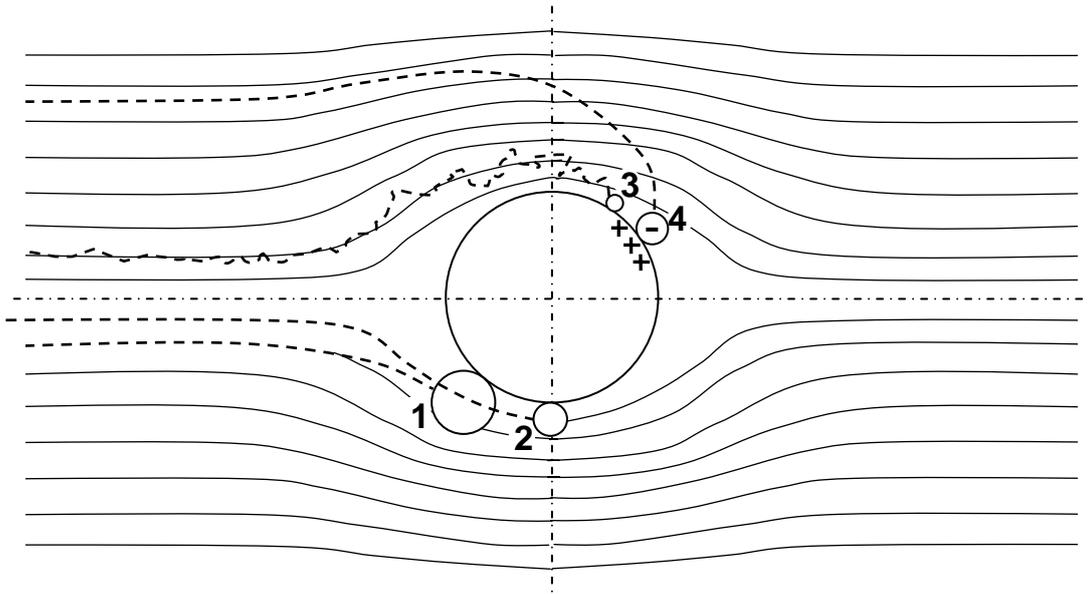


Abbildung 3-2: Darstellung der Abscheidemechanismen im Filtermittellinneren;  
1 Trägheitseffekt, 2 Sperreffekt, 3 Diffusionseffekt, 4 elektrostatischer Effekt

Es wird zwischen diffusiven Transport durch Brownsche Molekularbewegung, einem Transport durch Feldkräfte (elektrostatische Kräfte, Schwerkraft) und einem durch Trägheitskräfte bedingten Transport unterschieden. Würden die Staubpartikel nur den Stromlinien folgen, so könnten nur Teilchen deren Stromlinien nah genug an einer Faser vorbeiführen durch die räumliche Ausdehnung mit den Fasern in Berührung kommen (siehe Sperreffekt).

### **Trägheitseffekt**

Der Trägheitseffekt ist auf die kinetische Energie der Staubpartikel zurückzuführen. Aufgrund ihrer Trägheit können größere Teilchen den Stromlinien nicht exakt folgen und kollidieren infolgedessen mit den Filtermittelfasern. Auf der Faseroberfläche selbst müssen die Staubteilchen durch Haftkräfte festgehalten werden.

### **Sperreffekt**

Kleinere Teilchen können aufgrund ihrer relativ geringen Trägheitskräfte den Stromlinien folgen. Verläuft eine Stromlinie in einem geringen Abstand zur Faser-

oberfläche können Partikel allein durch ihre räumliche Ausdehnung mit den Fasern in Berührung kommen und durch Haftkräfte festgehalten werden.

Der Sperreffekt kann weiters als Randbedingung für die Partikelabscheidung gesehen werden. Erst wenn Partikel durch verschiedene Transporteffekte so nah an eine Faser gebracht werden, dass es zu einer Berührung kommt, kann es auch zu einer Partikelabscheidung kommen. Reichen die Transporteffekte nicht aus, so ist der Sperreffekt als Randbedingung nicht erfüllt und das Partikel passiert die Faser.

### **Molekular diffusiver Effekt**

Bei sehr feinen Teilchen (unter 1  $\mu\text{m}$ ) spielen Stöße, die Gasmoleküle von allen Seiten auf das Partikel ausüben, eine Rolle. Durch die kleine Partikeloberfläche heben sich die Gasmolekülstöße einander nicht mehr gegenseitig auf. Es kommt zu einer regellosen Zitterbewegung, der so genannten *Brownschen Molekularbewegung*. Aufgrund dieser stochastischen Eigenbewegung können die Staubpartikel mit Faseroberflächen in Berührung kommen.

### **Elektrodiffusiver Effekt**

Elektrostatische Wechselwirkungskräfte zwischen Staubteilchen und Fasern können die Abscheidung von Staubteilchen positiv beeinflussen. Die größten attraktiven Wechselwirkungskräfte treten zwischen Staubteilchen und Fasern, die Ladungen unterschiedlichen Vorzeichens zeigen, auf. Der elektrostatische Effekt wird zum Beispiel in speziell geladenen Tiefenfiltermedien (Electrets) genutzt [7, 8, 9, 10], um eine effiziente Partikelabscheidung im Bereich des Abscheideminimums gewährleisten zu können, wo aufgrund der Partikelgröße der Trägheitseffekt nicht mehr im ausreichenden Maß wirkt, jedoch der molekular diffusive Effekt noch nicht ausreicht.

### 3.2 Betriebsverhalten von Abreinigungsfiltermedien

Die Staubabscheidung mit Abreinigungsfiltermedien kann in zwei Filtrationsphasen, in die Verstopfungsphase und in die Kuchenfiltrationsphase, eingeteilt werden (siehe Abbildung 3-3).

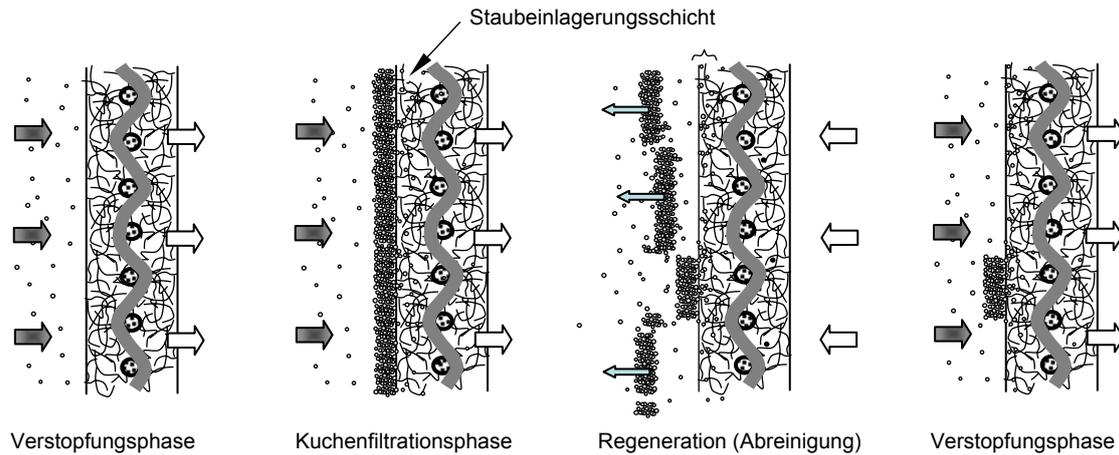


Abbildung 3-3: verschiedene Phasen der Filtration bei Abreinigungsfiltermedien

In der Verstopfungsphase erfolgt die Partikelabscheidung hauptsächlich im Inneren des Filtermediums durch Tiefenfiltration. Es bildet sich eine Staubeinlagerungsschicht im Filtermedium aus. Der Bereich der Verstopfungsphase ist mit einem progressiven Anstieg des Druckverlustes über das Filtermedium gekennzeichnet (siehe Abbildung 3-4).

Im Übergang zwischen der Verstopfungsphase zur Kuchenfiltrationsphase erfolgt ein Herauswachsen des Staubkuchens aus dem Filtermedium. Die Kuchenfiltrationsphase ist durch einen linearen Anstieg des Druckverlustes (bei konstanter Filterflächenbelastung) über das Filtermittel gekennzeichnet. Die Partikelabscheidung erfolgt nun hauptsächlich an der Oberfläche des gebildeten Staubkuchens. Infolge der Partikeleinlagerung verbessert sich die Abscheideeffizienz des Filtermediums, die Staubkonzentration im Reingas sinkt. Gleichmaßen steigt der Druckverlust über das Filtermedium an.

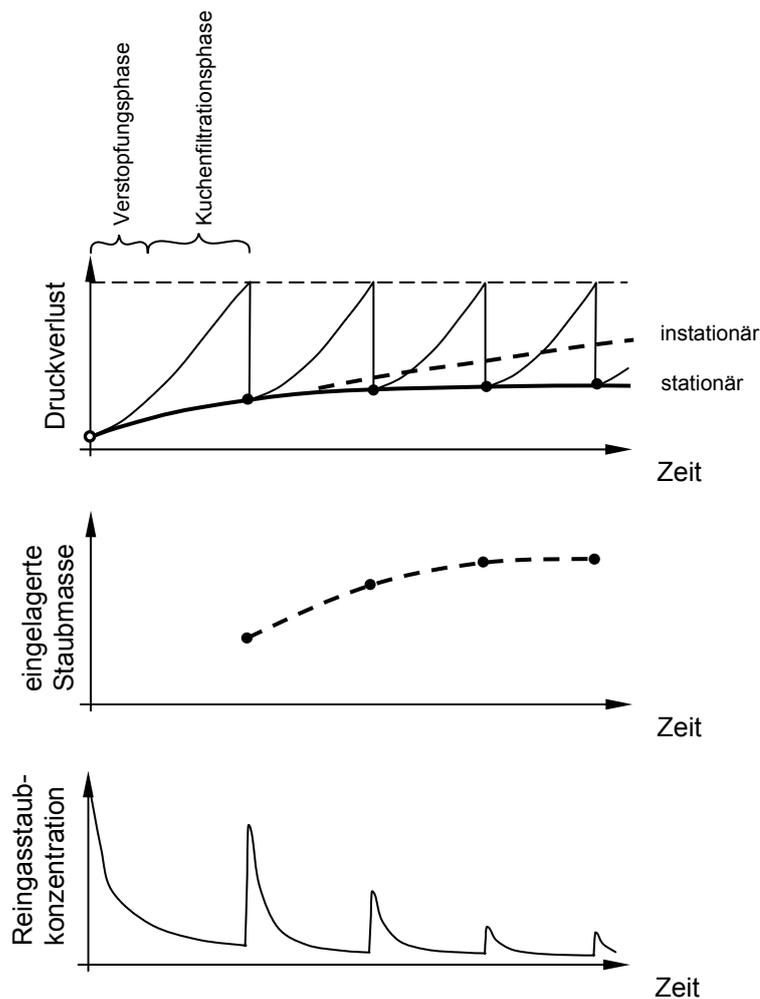


Abbildung 3-4: Betriebsverhalten eines Abreinigungsfiltermediums (schematisch)

### Regeneration bestaubter Abreinigungsfiltermedien

Der Anstieg des Druckverlustes macht eine Regeneration des Filtermediums nötig. Bei der Regeneration des Filtermediums wird der gebildete Staubkuchen entfernt sowie in der Tiefe des Filtermediums eingelagerte Partikel teilweise ausgeblasen. Dabei wird zwischen einer Offline- und einer Online- Abreinigung unterschieden. Für eine Offline- Abreinigung muss die Rohgaszufuhr während der Abreinigung unterbrochen werden. Die Filterelemente werden dann entweder mechanisch durch Rütteln oder Vibration, pneumatisch mittels Rückspülen oder durch Spülluft aus verfahrenbaren Düsen abgereinigt. Bei der Online- Abreinigung wird der gebildete Staubkuchen mit Hilfe eines Druckluftimpulses, der entgegengesetzt der

Filtrationsrichtung von der Reingasseite aus ins Filtermedium eingeleitet wird, entfernt [11].

Im Kapitel *Grundlagen zur Staubabscheidung mit Hilfe von Abreinigungsfiltermedien* wurde ein Überblick über die wirksamen Abscheidemechanismen und über das sich daraus ergebende Betriebsverhalten von Abreinigungsfiltermedien gegeben. Die für Entstaubungsaufgaben eingesetzten Filtermedien werden dabei auf den jeweiligen Anwendungsfall maßgeschneidert. Im folgenden Kapitel *Herstellung und Charakterisierung von Abreinigungsfiltermedien* soll auf die Herstellung von Abreinigungsfiltermedien und die sich daraus ergebenden Strukturen eingegangen werden.

## 4 Herstellung und Charakterisierung von Abreinigungsfiltermedien

In diesem Kapitel soll auf die verschiedenen Herstellverfahren von Abreinigungsfiltermedien eingegangen werden. Man unterscheidet zwischen Geweben und verfestigten Filtermedien wie Nadelfilze und Vliese. Dabei können sich Filtermedien in ihren Strukturen sowie in ihrem Ladungszustand je nach Herstellungstechnik unterscheiden. Neben den allgemein gebräuchlichen Charakterisierungsparametern für Abreinigungsfiltermedien sollen Methoden zur Analyse der Oberflächenstrukturen sowie zur Bestimmung des Ladungszustandes des eingesetzten Fasermaterials erläutert werden.

### 4.1 Aufbau und Herstellung von Nadelfilzen

Nadelfilze zählen aufgrund ihrer guten Filtrationseigenschaften hinsichtlich Abscheidegrad, Restdruckverlustentwicklung sowie Abreinigbarkeit zu den bevorzugt in Abreinigungsfiltern eingesetzten Filtermedien. In Abbildung 4-1 ist schematisch der Aufbau eines Nadelfilzes dargestellt.

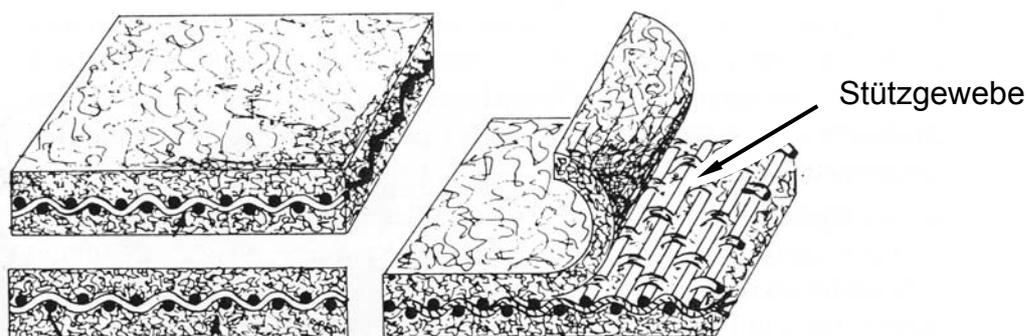


Abbildung 4-1: schematischer Aufbau eines Nadelfilzes, aus [3]

Auf einer Gewebereinlage (Stützgewebe), die dem Filtermittel Formstabilität sowie Festigkeit verleiht, befinden sich meist beidseitig Schichten aus Fasern in Wirrlage.

Die Erzeugung der einzelnen Schichten, ihre Verbindung untereinander sowie die Nachbehandlung und Ausrüstung der erzeugten Filtermedien stellt das Know-how

eines Filtermittelherstellers dar. Die für die Produktion von Nadelfilzen notwendigen Arbeitsschritte sollen nachfolgend beschrieben werden.

Ausgangspunkt der Nadelfilzherstellung sind Fasern die zumeist in Ballenform vom Faserproduzenten bezogen werden. Die Fasern sind auf eine bestimmte Länge geschnitten und müssen in einem ersten Schritt vereinzelt werden. Dazu wird der Ballen geöffnet und in Faserflocken aufgelöst und diese pneumatisch in eine Mischkammer transportiert (siehe Abbildung 4-2). Die Mischkammer dient dabei dem Ausgleich von Qualitätsunterschieden der eingesetzten Fasern. Über einen Kastenspeiser werden die Faserflocken kontinuierlich dem eigentlichen Faservereinzler dem sogenannten „Wolf“ zugeführt. Mittels Reißwalzen werden die Faserbündel aufgelöst bzw. aufgelockert.

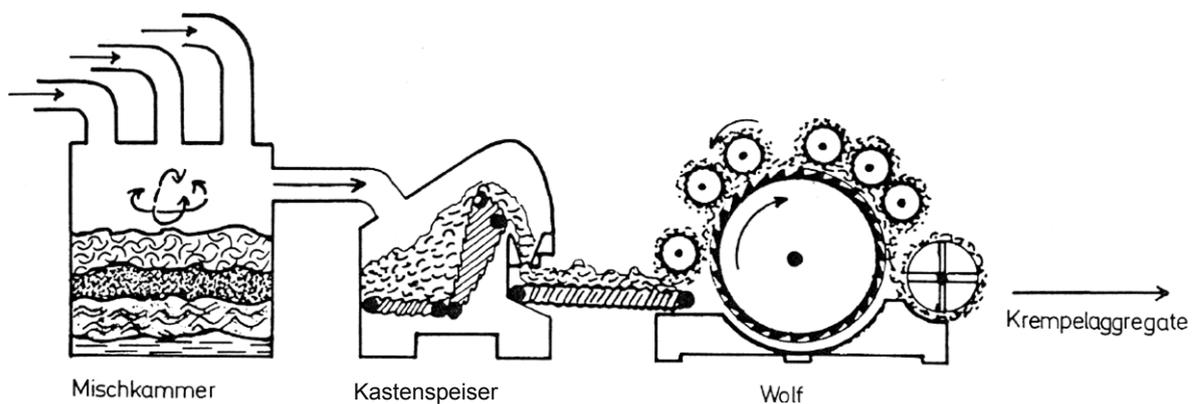


Abbildung 4-2: Mischen und Faservereinzlung in der Wolferei, aus [11]

Das aufgelockerte Fasermaterial wird den Krempelaggregaten zugeführt (siehe Abbildung 4-3).

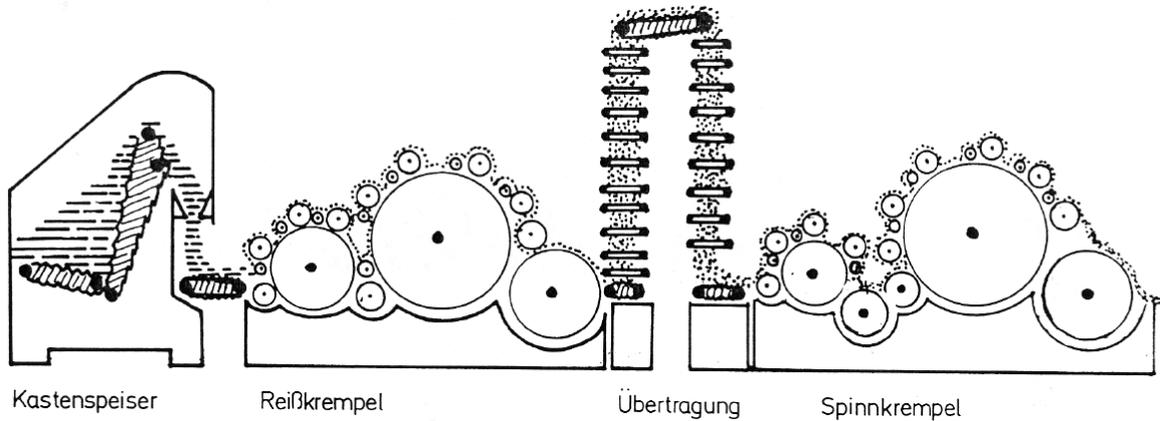


Abbildung 4-3: Krepelaggregate, aus [11]

In den Krepelaggregaten wird durch den Kardierprozess ein dünner Flor aus parallelisierten Fasern erzeugt. Am Umfang der Haupttrommel dem Tambour eines Krepelaggregats befinden sich Arbeiter-Wender Walzenpaare die dazu dienen in einem Kämmvorgang den Faserflor auszurichten und in seinem Flächengewicht zu vergleichmäßigen (Abbildung 4-4).

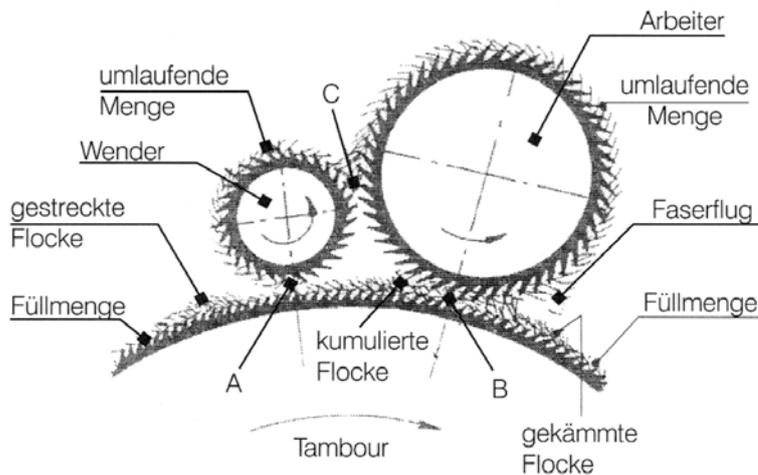


Abbildung 4-4: Haupttrommel mit Arbeiter-Wender Walzenpaar, aus [12]

Der Kardiervorgang zwischen Haupt- und Arbeitswalze wird über eine Differenz in der Umlaufgeschwindigkeit der Walzen erreicht. Mit Hilfe eines Kreuzlegers werden mehrere Faserflore übereinandergetafelt, es bildet sich ein Vlies aus (siehe Abbildung 4-5).

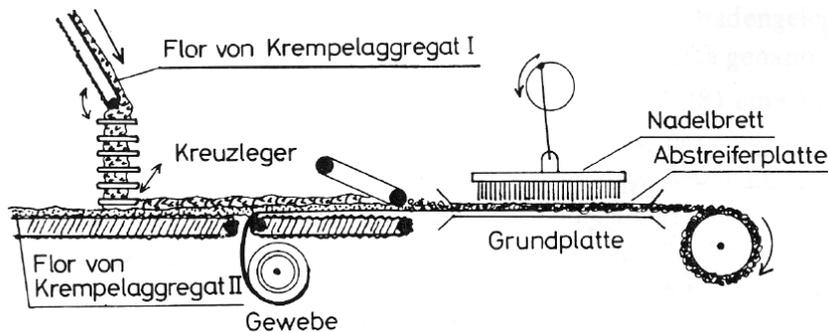


Abbildung 4-5: Tafeln von Faserflören und Vernadeln des Vlieses, aus [11]

Für den Nadelfilz werden meist mehrere Vliese zusammen mit einer in der Mitte liegenden Gewebeeinlage mit Hilfe einer Nadelmaschine verbunden und verdichtet. Dazu werden Nadeln, die in einem Nadelbalken verankert sind (Nadelbrett), in das Vlies eingestochen (siehe Abbildung 4-6).



Abbildung 4-6: Nadeln mit mitgenommenen Fasern beim Durchstechen der Grundplatte einer Nadelmaschine, aus [11]

Die Nadeln besitzen Widerhaken (Barbs) die in oder entgegen der Einstichrichtung orientiert sein können. Beim Einstechen der Nadeln werden Fasern durch Barbs, die in Einstichrichtung orientiert sind, mitgenommen. Beim Herausziehen der Nadeln werden Fasern von der Unterseite durch die entgegengesetzt orientierten Barbs mitgenommen. Durch mehrmaliges Einstechen der Nadeln erfolgt eine Verbindung der einzelnen Faserschichten sowie eine Umorientierung der Fasern. Über Form und Feinheit der eingesetzten Nadeln, die Einstichtiefe sowie über die Stichzahl pro Flächeneinheit lässt sich die gewünschte Verdichtung des Nadelfilzes erreichen.

Nach der Vernadelung werden Nadelfilze meist thermofixiert, um ein späteres Schrumpfen (Einspringen) der Filterschläuche während des Betriebes zu verhindern. Dazu werden die Nadelfilze mit Heißluft durchströmt. Durch die erhöhten Temperaturen können faserinterne Spannungen, die noch aus dem Spinnprozess stammen, abgebaut werden. Abstehende Fasern werden durch Sengen anströmseitig entfernt. Dabei wird ein Flambalken über die Filtermittelloberfläche geführt, wobei abstehende Fasern angesengt werden. Dies verbessert die Abreinigbarkeit des Nadelfilzes im Betrieb. Um eine zusätzliche Verdichtung der Oberfläche sowie eine glattere Oberflächenstruktur des Nadelfilzes (zumindest rohgasseitig) zu erreichen, werden die Filtermedien mit beheizten Walzen kalandriert. Unter dem Einfluss von Druck und Temperatur erfolgt ein Einebnen der Filtermittelloberfläche.

Eine weitere Möglichkeit der Verdichtung eines Vlieses zu einem Filz stellt die Wasserstrahltechnik dar. Dazu wird der zu verdichtende Vliesstoff mittels Hochdruckdüsen mit Wasserstrahlen beaufschlagt (siehe Abbildung 4-7).

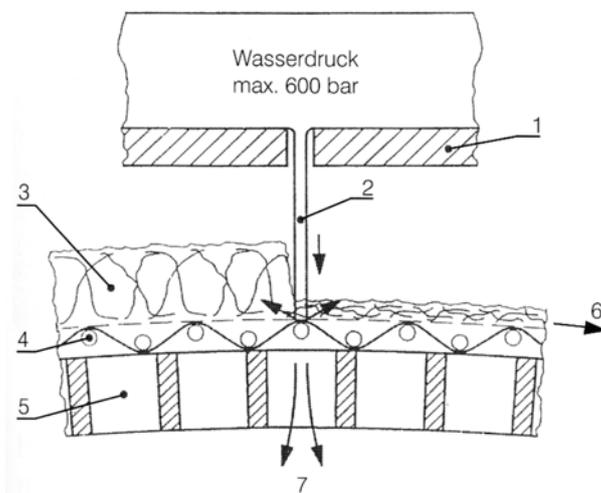


Abbildung 4-7: Wasserstrahltechnik (schematische Darstellung), aus [12]

1 Wasserbalken mit Hochdruckdüsen, 2 Wasserstrahl, 3 unverfestigtes Vlies, 4 Stützsieb, 5 Trommel, 6 verdichteter Vliesstoff, 7 Wasserablauf

Fasern werden von den Wasserstrahlen erfasst und durch den sich bildenden Filz gezogen. Trifft ein Wasserstrahl nach Durchtritt des Filzes auf das Stützsieb der Wasserstrahlmaschine, so kann dieser reflektiert werden und neuerlich den Filz in Gegenrichtung durchdringen und dabei wiederum Fasern mitnehmen. Weiters erfolgt

eine Verwirbelung der Fasern, welche die Filzbildung unterstützt. Da der so entstehende Filz an der mit Wasserstrahlen beaufschlagten Oberseite eine größere Verdichtung erfährt, wird diese als Anströmseite des Filtermediums eingesetzt. Zur Entfernung von aus dem Produktionsprozess verbleibenden Fasersträhnen werden nach der Wasserstrahltechnik gefertigte Filtermedien gleichfalls auf der Unterseite (Reingasseite) gesengt.

Je nach Herstellverfahren, eingesetztem Fasermaterial sowie der Nachbehandlung in Form von Kalandrieren, Aufbringen von Coatings und Ausrüstungen, können sich die Strukturen von Abreinigungsfiltermedien deutlich unterscheiden. So werden Filtermedien für den jeweiligen Anwendungsfall maßgeschneidert.

In den folgenden Abschnitten sollen die in VDI Richtlinie 3677 „Filternde Abscheider - Oberflächenfilter“ [13] angeführten Charakterisierungsparameter zur Beschreibung von Abreinigungsfiltermedien kurz zusammengefasst, sowie Methoden zur Erfassung der Struktur und des Ladungszustandes von Abreinigungsfiltermedien vorgestellt werden.

### **4.2 Konventionelle Charakterisierungsparameter zur Beschreibung von Abreinigungsfiltermedien**

Nach VDI Richtlinie 3677 „Filternde Abscheider - Oberflächenfilter“ [13] werden folgende Parameter zur Charakterisierung von Abreinigungsfiltermedien angegeben:

#### **Faserart des Filterstoffes**

Unter Faserart des Filterstoffes wird das eingesetzte Fasermaterial verstanden. In Tabelle 4-1 sind die wichtigsten Faserwerkstoffe und ihre Kurzzeichen nach DIN 60001 [14] zusammengefasst. Die in Tabelle 4-1 aufgelisteten Faserwerkstoffe sind nach ihrer Temperaturbeständigkeit aufsteigend sortiert. Neben der Temperaturbeständigkeit hängt die Wahl eines Faserwerkstoffes auch je nach Anwendungsfall von der Beständigkeit gegen Chemikalien wie Säuren und Basen sowie seiner Hydrolysebeständigkeit ab.

Allein durch die Angabe des eingesetzten Fasermaterials ist jedoch eine Filtermittelfaser noch nicht hinreichend beschrieben. So können zur näheren

Beschreibung des eingesetzten Fasermaterials neben dem Faserwerkstoff die Faserfeinheit sowie strukturelle Parameter wie Schnittlänge, Faserkräuselung und Faserquerschnittsform angegeben werden.

Die Faserfeinheit wird dabei in Gramm je 1000 Meter Faserlänge angegeben und mit tex bezeichnet.

$$1 \text{ tex} = 1 \text{ g auf } 1000 \text{ m} \quad \text{bzw.} \quad 1 \text{ dtex} = 1 \text{ g auf } 10.000 \text{ m} \quad (4-1)$$

Zur Bestimmung der Kräuselung wird eine Faser mit einer definierten Spannkraft (z.B. nach STFI mit 0,05 mN/tex) gestreckt und die Anzahl der Bögen über die Faserlänge mittels Auszählens bestimmt.

Für eine genaue Beschreibung der chemischen und physikalischen Eigenschaften der eingesetzten Faserwerkstoffe sei auf die einschlägige Literatur verwiesen [11, 12, 15].

Faserart	Handelsname	Kurzzeichen nach DIN 60001
Polyvinylchlorid	Rhovyl <sup>®</sup> ; Thermovyl <sup>®</sup>	PVC
Polyethylen	Norfil <sup>®</sup> ; Daiwabo <sup>®</sup>	PE - HD
Polypropylen	Merkalon <sup>®</sup> ; Heraclon	PP
Aliphatisches Polyamid	Nylon (PA 6.6); Perlon (PA 6)	PA
Polyacrylnitril	Dolanit <sup>®</sup> ; Ricem <sup>®</sup> ;	PAN-Homopolymer
	Dolan <sup>®</sup>	PAN-Copolymer
Polyester	Trevira <sup>®</sup> ; Diolen <sup>®</sup>	PES
Aromatische Polyamid	Nomex <sup>®</sup> ; Teijinconex <sup>®</sup>	m-Aramid
Polyphenylensulfid	Ryton <sup>®</sup> ; Fortron <sup>®</sup> , Procon <sup>®</sup>	PPS
Polyimid	P84 <sup>®</sup>	PI
Polytetrafluorethylen	Teflon <sup>®</sup> ; Toyoflon <sup>®</sup> ; Profilen <sup>®</sup> ; Rastex <sup>®</sup>	PTFE
Glas	Fiberglas; Gevetex <sup>®</sup>	GF
Metall	Bekinox <sup>®</sup>	MTF

Tabelle 4-1: Faserwerkstoffe für Abreinigungsfilter, Auswahl aus [13]

### Dauerbeständigkeit

Die Dauerbeständigkeit in °C ist eine vom Hersteller gewährleistete Temperaturstandfestigkeit bei der auf Dauer die geforderten Spezifikationen des Filtermediums

erhalten bleiben. Dazu zählen mechanische Kenngrößen wie Reißfestigkeit und Reißdehnung sowie die Maßstabilität der Filtermedien, sodass es nicht zu unzulässigen Verformungen (z.B. thermischer Schrumpf) der Filterelemente kommt.

### Spitztemperaturbeständigkeit

Die Spitztemperaturbeständigkeit in °C gibt an, welche Temperatur im Betrieb kurzzeitig maximal erreicht werden darf, ohne die Filtermedien zu schädigen. Ein längerer Betrieb bei dieser Temperatur kann jedoch zu einer unzulässigen Veränderung der Filterelemente sowie zu einer Schädigung des Fasermaterials führen.

### Dicke

Nach DIN EN ISO 9073-2 [16] wird die Dicke eines Filtermediums als Abstand in mm zwischen einer Bezugsplatte auf der der Vliesstoff bzw. das Filtermedium liegt, und einem parallel angeordneten Druckstempel, unter definierten Bedingungen gemessen (Vorgabe der Flächenpressung und Dauer der Krafteinwirkung).

### Flächenmasse

Die Flächenmasse  $m_{\text{Filtermedium}}$  eines Filtermediums gibt den Fasereinsatz in g pro m<sup>2</sup> an. Dabei setzt sich die Flächenmasse eines Filtermediums aus den Flächenmassen des Stützgewebes und der roh- und reingasseitigen Faserauflagen und aus einer etwaigen Ausrüstung zusammen.

$$m_{\text{Filtermedium}} = \sum_{i=1}^n m_i \quad (4-2)$$

$m_{\text{Filtermedium}}$       Flächenmasse [g/m<sup>2</sup>]

$m_i$                       Teilschichtflächenmassen, z.B. Stützgewebe, Faserauflage, Ausrüstung... [g/m<sup>2</sup>]

$n$                               Anzahl der Schichten [-]

Durch thermischem Schrumpfung während der Thermofixierung ergibt sich im Vergleich zum vernadelten Ausgangsfilz ein höheres Flächengewicht für den fertigen Nadelfilz.

### Dichte

Die Dichte eines Filtermediums  $\rho_{\text{Filtermedium}}$  ist der Quotient aus Flächenmasse und Dicke des Filtermediums. Der Faktor 1/1000 ergibt sich aus der Umrechnung der Einheiten von Flächenmasse ( $\text{g/m}^2$  in  $\text{g/cm}^2$ ) und Dicke ( $\text{mm}$  in  $\text{cm}$ ).

$$\rho_{\text{Filtermedium}} = \frac{1}{1000} \frac{m_{\text{Filtermedium}}}{d_{\text{Filtermedium}}} \quad (4-3)$$

$\rho_{\text{Filtermedium}}$  Dichte des Filtermediums [ $\text{g/cm}^3$ ]

$m_{\text{Filtermedium}}$  Flächenmasse [ $\text{g/m}^2$ ]

$d_{\text{Filtermedium}}$  Dicke des Filtermediums [ $\text{mm}$ ]

Die Dichte eines Filtermediums hängt einerseits von der Dichte des eingesetzten Fasermaterials sowie von der Verdichtung des Filtermediums ab und kann somit als Kennwert für die Kompaktheit eines Filtermediums herangezogen werden.

### Porosität

Die Porosität  $\varepsilon$  gibt den Anteil des durchschnittlichen Porenvolumens eines Filtermediums an dessen Gesamtvolumen an. Die Porosität ergibt sich somit aus dem Quotient aus Porenvolumen und Volumen Filtermedium.

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{Poren}}}{V_{\text{Filtermedium}}} = 1 - \frac{V_{\text{Fasermaterial}}}{V_{\text{Filtermedium}}} \quad (4-4)$$

$\varepsilon$  mittlere Porosität des Filtermediums [-]

$V_{\text{Poren}}$  Porenvolumen (je  $\text{m}^2$ ) [ $\text{cm}^3/\text{m}^2$ ]

$V_{\text{Filtermedium}}$  Volumen Filtermedium (je  $\text{m}^2$ ) [ $\text{cm}^3/\text{m}^2$ ]

$V_{\text{Fasermaterial}}$  Volumen Fasermaterial (je  $\text{m}^2$ ) [ $\text{cm}^3/\text{m}^2$ ]

Besteht ein Filtermedium aus Fasern einheitlicher Dichte so kann mit Gleichung (4-4) folgender Zusammenhang zwischen der Dichte eines Filtermediums und seiner mittleren Porosität hergeleitet werden:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{\text{Fasermaterial}}}{V_{\text{Filtermedium}}} = 1 - \frac{\rho_{\text{Filtermedium}}}{\rho_{\text{Fasermaterial}}} \quad (4-5)$$

$\varepsilon$  mittlere Porosität des Filtermediums [-]

$V_{\text{Fasermaterial}}$  Volumen Fasermaterial (je  $m^2$ ) [ $cm^3/m^2$ ]

$V_{\text{Filtermedium}}$  Volumen Filtermedium (je  $m^2$ ) [ $cm^3/m^2$ ]

$\rho_{\text{Filtermedium}}$  Dichte des Filtermediums [ $g/cm^3$ ]

$\rho_{\text{Fasermaterial}}$  Dichte des Fasermaterials [ $g/cm^3$ ]

Für ein Filtermedium aus verschiedenen Fasermaterialien folgt aus Gleichung (4-5) und Gleichung (4-3)

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{1000} \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{d_{\text{Filtermedium}}} \quad (4-6)$$

$\varepsilon$  mittlere Porosität des Filtermediums [-]

$n$  Anzahl der Schichten [-]

$m_i$  Teilflächenmassen, z.B. Stützgewebe, Faserauflage, Ausrüstung... [ $g/m^2$ ]

$\rho_i$  Dichte des jeweiligen Fasermaterials [ $g/cm^3$ ]

$d_{\text{Filtermedium}}$  Dicke des Filtermediums [mm]

### Luftdurchlässigkeit

Die Luftdurchlässigkeit in  $l/(dm^2 \text{ min})$  eines Filtermediums gibt den sich einstellenden Volumenstrom eines unbestaubten Filtermediums bei einer Druckdifferenz von 200 Pa und einer Prüffläche von  $1 \text{ dm}^2$  an. Die Bestimmung der Luftdurchlässigkeit erfolgt nach DIN EN ISO 9237 [17] mittels eigener Luftdurchlässigkeitsprüfgeräte.

## Reißfestigkeit

Die Reißfestigkeit des Filtermediums wird an rechteckigen Proben (5x20 cm) nach DIN 53857 [18] in einem Zugversuch bestimmt. Es wird zwischen der Reißfestigkeit längs und quer zur Stoffbahnrichtung unterschieden. Die auftretenden Kräfte werden in N angegeben und gelten für eine Probenbreite von 5 cm. Zusätzlich zu den auftretenden Kräften wird die durch die Zugbelastung bedingte Dehnung der Probe in Prozent der Ausgangslänge mit aufgezeichnet. Als Ergebnis eines Zugversuches erhält man ein Kraft- Dehnungsdiagramm (siehe Abbildung 4-8).

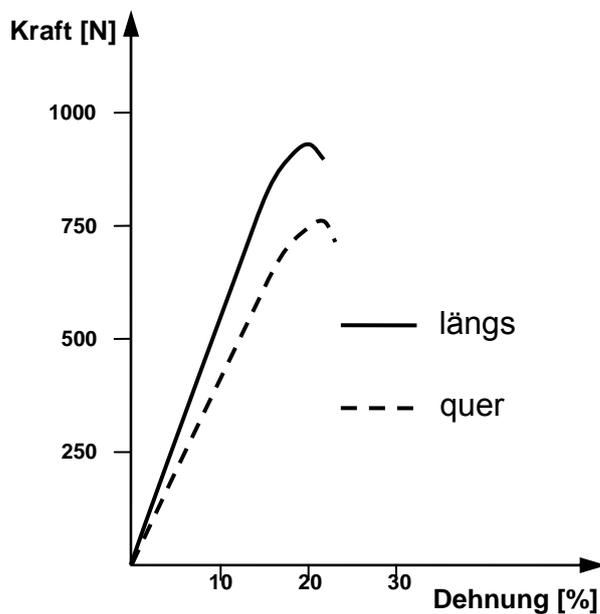


Abbildung 4-8: Kraft-Dehnungsdiagramm eines Zugversuchs nach DIN 53857

## Reißdehnung

Die Reißdehnung gibt die Verlängerung der rechteckigen Probe (5x20 cm) bis zum Bruch beim Zugversuch nach DIN 53857 in Prozent der Ausgangslänge an (siehe auch Abbildung 4-8).

Es zeigt sich, dass keiner der genannten konventionellen Parameter zur Beschreibung einer strukturellen Oberflächenveränderung infolge einer Nachbehandlung herangezogen werden kann. Die oben genannten Kennwerte ergeben vielmehr einen Durchschnittswert für das gesamte Filtermedium und sind so für eine Beurteilung einzelner Bereiche des Filtermediums unzureichend. Auch ist ein Einfluss des Ladungszustandes des Fasermaterials auf das Abscheideverhalten eines Filtermediums zu erwarten und sollte aus diesem Grund mit erfasst werden.

Im Folgenden soll ein Überblick zu Verfahren zur Charakterisierung von Struktur und Ladungszustand von Oberflächenfiltermedien gegeben werden.

### **4.3 Aktueller Stand zur Charakterisierung der Struktur und des Ladungszustandes von Oberflächenfiltermedien**

#### **Verfahren zur Charakterisierung der Struktur von Oberflächenfiltermedien**

Für die Charakterisierung der Struktur von Oberflächenfiltermedien werden mehrere Verfahren vorgeschlagen. So setzte Kaspar [19] einen Computertomographen zur direkten Erfassung der Struktur von Filtermedien ein. Dadurch konnte neben der äußeren Struktur auch der innere Aufbau eines Filtermediums erfasst werden. Einen Nachteil des Verfahrens stellen der hohe apparative Aufwand und die erreichbaren Auflösungen dar. Eine weitere Möglichkeit Informationen über die innere Struktur von Filtermedien zu gewinnen stellt die Einbettung eines Filtermediums in Kunstharz und die Anfertigung von Mikrotomschnitten [20] dar.

Zumeist werden jedoch Filtermedien unter dem Lichtmikroskop und für spezielle Oberflächenanalysen im Rasterelektronenmikroskop untersucht. Koschutnig stellte ein Verfahren zur bildoptischen Bestimmung der Oberflächenporosität vor, sowie eine Messmethode zur Bestimmung der Porentiefen oberflächennaher Poren [2]. Bei diesem Verfahren wird ein Filtermedium in einem Auflichtmikroskop betrachtet. Durch die unterschiedliche Beleuchtung von Oberfläche und von (durch Poren sichtbare) tiefer liegenden Strukturen, erscheinen diese mit unterschiedlichen Helligkeiten. Durch die Helligkeitsunterschiede kann zwischen Oberfläche und Porenfläche unterschieden werden. Ein Nachteil des Verfahrens stellt die hohe

Empfindlichkeit von den Beleuchtungsverhältnissen und der Faserfarbe dar. So können durch eine nachträgliche Oberflächenbehandlung verfärbte Fasern an der Oberfläche fälschlich zur Porenfläche gezählt werden. In Rahmen der gegenständlichen Forschungsarbeit wurde die von Koschutnig vorgestellte Strukturanalysemethode weiterentwickelt. Die verbesserte bildoptische Strukturanalysemethode wird im Kapitel 5 *Weiterentwicklung der Methode zur Erfassung der Oberflächen-struktur von Abreinigungsfiltermedien mittels Bildanalyse* eingegangen. Für einen Vergleich beider Methoden sei auf die Veröffentlichung „*Transmitted-light microscopy – a new method for surface structure analysis of cleanable non-woven dust filter media*“ [21] verwiesen.

Neben der Struktur ist es der Ladungszustand eines Filtermediums der einen wesentlichen Einfluss auf sein Betriebsverhalten nimmt. Dabei können sich elektrostatische Ladungen des Fasermaterials begünstigend auf die sich einstellende Reingasstaubkonzentration auswirken. Andererseits kann durch eine zu starke Anziehung zwischen abgeschiedenen Partikeln und dem Fasermaterial eine Abreinigung erschwert werden. Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über die Möglichkeiten zur Erfassung des Ladungszustandes von Filtermedien gegeben werden.

### **Verfahren zur Bestimmung des Ladungszustandes von Filtermedien**

In [22, 23, 24] wird ein Überblick über die Möglichkeiten zur Ladungsbestimmung von Einzelfasern sowie von ganzen dreidimensionalen Filtermedien gegeben. Eine Einteilung der diversen Messverfahren kann über das verwendete Messprinzip erfolgen. Dabei unterscheidet man zwischen Messung der Nettoladung und Messung der Ladungsdichteverteilung. Die Nettoladung eines Filtermediums oder auch einzelner Fasern kann unter anderem mittels eines Faradayschen Bechers oder über die Kraftwirkung auf Ladungsmengen in einem elektrostatischen Feld [25, 26] bestimmt werden.

Bei der Ladungsdichteverteilungsmessung wird zwischen direkten Messverfahren, bei denen der Messwert einer lokalen Oberflächenladung entspricht, und indirekten

Messverfahren, wobei je nach Messprinzip durch Erfassung anderer Parameter auf eine Ladungsdichteverteilung rückgeschlossen werden kann, unterschieden.

Ladungsdichteverteilungen können direkt mittels kapazitiver Sonden [23, 24] oder indirekt über die Ablenkung bewegter Ladungsträger (Elektronen, geladene Partikel) [25] bestimmt werden. Ferner sind indirekte Verfahren, die auf einer kontrollierten Ladungskompensation [27, 28] beruhen, bekannt.

In der gegenständlichen Forschungsarbeit wurde eine von Baumgartner [25] vorgestellte Messmethode zur Erfassung des Ladungszustandes von Filtermittelfasern gewählt. Eine genaue Beschreibung der Messmethode erfolgt in Kapitel 6.2 *Bestimmung des Ladungszustandes von Abreinigungsfiltermedien*.

## **5 Weiterentwicklung der Methode zur Erfassung der Oberflächenstruktur von Abreinigungsfiltermedien mittels Bildanalyse**

Für das Betriebsverhalten eines Abreinigungsfiltermediums bezüglich Staubeinlagerung, Restdruckverlustverhalten und die sich einstellende Reingasstaubkonzentration spielt die Struktur der oberflächennahen Faserschichten eine maßgebliche Rolle. Durch Reduktion der Porengrößen der oberflächennahen Faserschichten wird ein Eindringen von Staub verringert sowie die Ausbildung einer dünnen Staubeinlagerungsschicht begünstigt. Eine dünne Staubeinlagerungsschicht wirkt sich wiederum positiv auf die Restdruckverlustentwicklung aus. Tiefer liegende Faserschichten sowie das Stützgewebe haben die Aufgabe dem Filtermedium die notwendige mechanische Stabilität und Schutz vor Verschleiß zu geben. Diese tiefer liegenden Faserschichten sollten im Gegensatz zu den oberflächennahen Faserschichten weniger stark verdichtet sein um einen unnötig hohen Druckverlust bzw. ein Verstopfen dieser Faserschichten während des Betriebs zu vermeiden. Die sich ergebenden Strukturen der oberflächennahen Faserschichten können durch das eingesetzte Fasermaterial (Mikrofaserauflagen) sowie durch die Nachbehandlung (z.B. Verdichtung durch Kalandrieren) und Ausrüstung (z.B. Coating) des Filtermediums beeinflusst werden. Durch die Verarbeitung und Nachbehandlung bzw. Ausrüstung eines Filtermediums variieren strukturelle Parameter wie z.B. die Porosität über den Filtermittelquerschnitt [20, 29, 30]. Die in der VDI Richtlinie 3677 angeführten konventionellen Charakterisierungsparameter (siehe Kapitel 4.2, Seite 21 ff) beziehen sich jedoch auf das gesamte Filtermedium, wodurch strukturelle Unterschiede in den oberflächennahen Faserschichten eines Filtermediums infolge Verarbeitung, Nachbehandlung bzw. Ausrüstung nicht direkt beurteilt werden können.

In Folge sollen die von Koschutnig eingeführten Strukturparameter Oberflächenporosität und Porentiefe sowie neue Strukturparameter für eine genauere Charakterisierung der Oberflächenstruktur eines Filtermediums definiert, sowie auf die im Rahmen der gegenständlichen Forschungsarbeit weiterentwickelte Methode zur Erfassung der Struktur von Abreinigungsfiltermedien eingegangen werden.

## 5.1 Parameter zur Beschreibung der oberflächennahen Porenstruktur

Unter der oberflächennahen Porenstruktur dem PF- Layer<sup>1</sup> werden die von außen einsehbaren Vertiefungen in der Filtermitteloberfläche verstanden. Zur Beschreibung dieser Porenstrukturen soll das in Abbildung 5-1 schematisch dargestellte Filtermedium betrachtet werden.

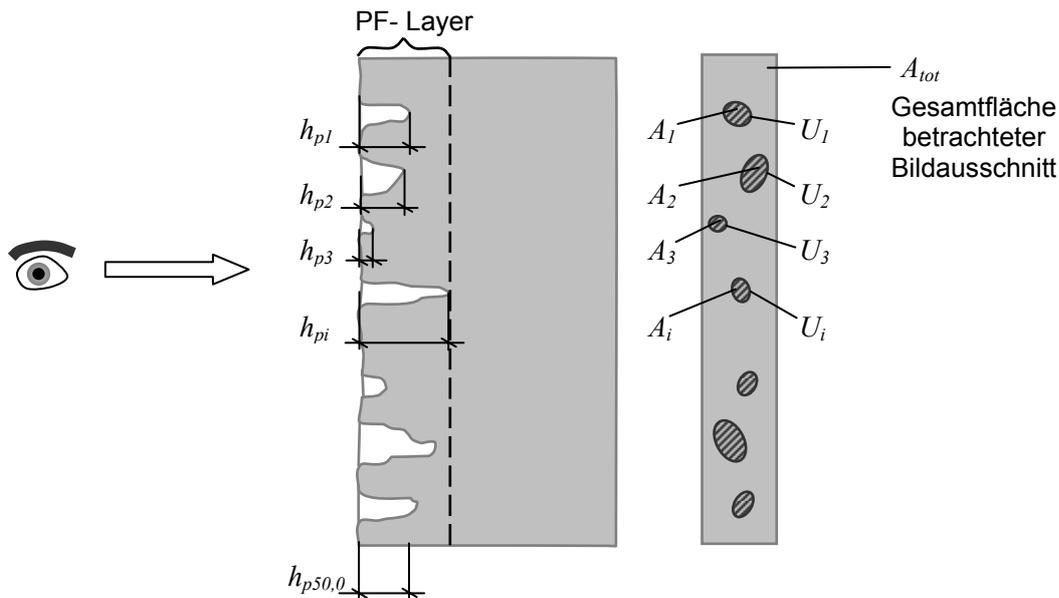


Abbildung 5-1: oberflächennahe Poren in einem Filtermedium

$A_i$	Porenfläche der $i$ -ten Pore [ $\mu\text{m}^2$ ]
$U_i$	Porenumfang der $i$ -ten Pore [ $\mu\text{m}$ ]
$A_{tot}$	Gesamtfläche betrachteter Bildausschnitt [ $\mu\text{m}^2$ ]
$h_{pi}$	Tiefe der $i$ -ten Pore [ $\mu\text{m}$ ]
$h_{p50,0}$	Medianwert der Porentiefenverteilung [ $\mu\text{m}$ ]

Beobachtet man einen abgegrenzten Bereich einer Filtermitteloberfläche so kann innerhalb des ausgewählten Bildausschnitts eine bestimmte Anzahl von Poren  $N_{tot}$  detektiert werden. Jeder dieser Poren kann eine Porenfläche  $A_i$ , ein Porenumfang  $U_i$  sowie eine Porentiefe  $h_{p,i}$  zugeordnet werden.

<sup>1</sup> PF- Layer (engl. partial fibre layer): mittels Lichtmikroskopie einsehbare Ansammlung von Fasern und Poren an der Oberfläche eines Filtermediums

### Porenfläche und Porenumfang

Für eine Bestimmung von Porenfläche und Porenumfang wurde die von Koschutnig [2] vorgestellte Strukturanalysemethode im Rahmen der gegenständlichen Forschungsarbeit wie folgt weiterentwickelt. Die Analysemethode wurde von Auflichtmikroskopie auf Durchlichtmikroskopie umgestellt [21]. Durch den Einsatz von Durchlichtmikroskopie können in Vergleich zur Auflichtmikroskopie, Bilder mit stärkeren Bildhelligkeitsunterschieden erhalten werden. Des Weiteren werden auch Oberflächenfasern, die durch eine Nachbehandlung (z.B. Sengen) ihre Farbe verändert haben, im Gegensatz zur Auflichtmethode nach [2], zur Oberfläche und nicht zur Porenfläche des Filtermediums gezählt.

In Abbildung 5-2 ist der Versuchsaufbau für die Strukturanalyse dargestellt.

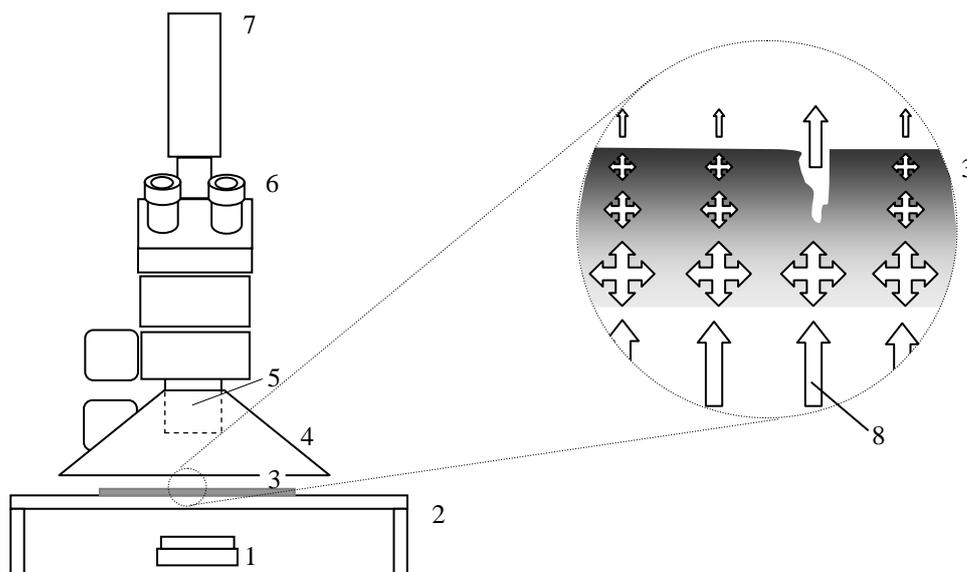


Abbildung 5-2: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Oberflächenporosität mittels Durchlichtmikroskopie; (1) Kaltlichtquelle; (2) optischer Tisch; (3) Filtermittelprobe; (4) Abdeckschild; (5) Objektiv; (6) Okular; (7) CCD Kamera; (8) Lichtintensitätsverringern im durchstrahlten Filtermedium

Der Messaufbau besteht aus einem binokularen Mikroskop (LEICA MZ8) ausgerüstet mit einer Kaltlichtquelle und einer CCD Kamera (SONY XC-003P). Das zu untersuchende Filtermedium ist auf einem optischen Tisch platziert und wird von unten mittels einer Kaltlichtquelle durchleuchtet. Das Licht wird durch Streuung und

Absorption an den Filtermittelfasern abgeschwächt. Die Lichtintensität nimmt, wie in Abbildung 5-2 links dargestellt, über den Querschnitt des Filtermediums ab. Intensitätsunterschiede die auf tiefer liegende Strukturen (z.B. Stützgewebe, höher verdichtete Bereiche tiefer liegender Faserschichten bzw. tiefer liegende Poren) zurückzuführen sind, werden durch die hohe Lichtstreuung beim Durchtritt des Lichts kompensiert. Betrachtet man die Oberfläche des von der Gegenseite beleuchteten Filtermediums, erscheinen oberflächennahe Fasern am dunkelsten. Poren durch die Staub ins Filtermedium eindringen kann, erscheinen im Gegensatz dazu heller.

Um die Oberflächenstruktur einer Probe zu erfassen, werden von zwanzig zufällig ausgewählten Oberflächenbereichen Bilder (jeweils  $2390 \mu\text{m} \times 1860 \mu\text{m}$ ) aufgenommen. Um den Einfluss von Tageslicht zu minimieren ist ein Abdeckschild am Objektiv des Mikroskops montiert. Unter Benützung von Computeralgorithmen werden die Farbbilder in Graustufenbilder umgewandelt (siehe Abbildung 5-3).

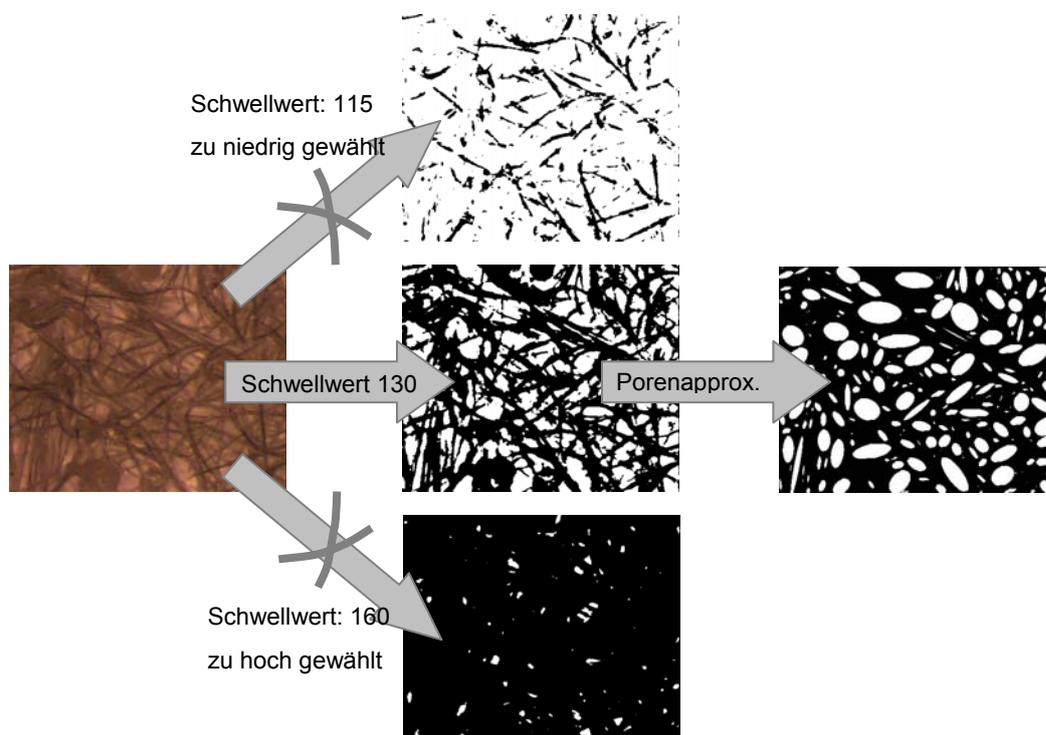


Abbildung 5-3: Umwandlung eines Farbbildes in ein Schwarzweißbild und elliptische Porenapproximation

Durch Festlegen eines Schwellwertes wird das Graustufenbild in Rahmen der Binarisierung in ein Schwarzweißbild umgewandelt. Im binarisierten Durchlichtbild

stellen die schwarzen Bildbereiche die Filtermitteloberfläche, die weißen Bildbereiche die Poren dar. Der richtige Schwellwert wird durch Vergleich des binarisierten Bildes mit dem Ausgangsbild bei gleichzeitiger Variation des Schwellwertes, bis die Fasern der Filtermitteloberfläche im binarisierten Bild richtig dargestellt werden, erhalten. Bei passendem Schwellwert zeigen Ursprungsbild und binarisiertes Bild gut übereinstimmende Oberflächenstrukturen. Diese Vorgehensweise stellt sicher, dass die Porenflächen, welche von oberflächennahen Fasern umrandet sind, korrekt im binarisierten Bild abgebildet werden. Um das Porensystem mathematisch einfacher beschreiben zu können, wird in einem weiteren Bildbearbeitungsschritt jede einzelne vielgestaltige Pore durch eine Ellipse gleicher Fläche angenähert.

### **Oberflächenporosität**

Die Oberflächenporosität  $E_0$  wird nach [2] definiert als Quotient aus der Summe der Einzelporenflächen  $A_{p,tot}$  im betrachteten Bildausschnitt und der Gesamtfläche  $A_{tot}$  des beobachteten Bildausschnitts.

$$E_0 = \frac{A_{p,tot}}{A_{tot}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{tot}} A_i}{A_{tot}} \quad (5-1)$$

$E_0$	<i>Oberflächenporosität [-]</i>
$A_{p,tot}$	<i>Summe der Porenflächen im betrachteten Bildausschnitt [<math>\mu\text{m}^2</math>]</i>
$A_i$	<i>Porenfläche der i-ten Pore [<math>\mu\text{m}^2</math>]</i>
$A_{tot}$	<i>Gesamtfläche betrachteter Bildausschnitt [<math>\mu\text{m}^2</math>]</i>
$N_{tot}$	<i>Anzahl der Poren im betrachteten Bildausschnitt [-]</i>

Da der Wert der Oberflächenporosität nur aus Daten der detektierten oberflächlich situierten Poren berechnet wird, sollte sich der Erfolg einer Oberflächenbehandlung besser in der Oberflächenporosität widerspiegeln als im Vergleich zur nach Gleichung (4-6) berechneten *mittleren* Porosität des Filtermediums.

## Hydraulischer Porendurchmesser

In der Realität wird der Poreneingang durch Fasern begrenzt und ist dadurch unregelmäßig geformt. Um dennoch eine Porengröße angeben zu können, wird aus Porenumfang  $U_i$  (Umfang der Vergleichsellipse aus der Bildanalyse) und Poreneingangsquerschnitt  $A_i$  für jede Pore ein hydraulischer Porendurchmesser  $d_{h,i}$  berechnet. Der hydraulische Porendurchmesser ist in Anlehnung an die Strömungslehre [31] wie folgt definiert:

$$d_{h,i} = \frac{4A_i}{U_i} \quad (5-2)$$

$d_{h,i}$                     *hydraulischer Porendurchmesser der i-ten Pore [ $\mu\text{m}$ ]*

$A_i$                       *Porenfläche der i-ten Pore [ $\mu\text{m}^2$ ]*

$U_i$                       *Porenumfang der i-ten Pore [ $\mu\text{m}$ ]*

Somit ist es möglich jeder Pore einen eindeutigen Durchmesser zuzuordnen. Setzt man in Gleichung (5-2) zur Kontrolle die Fläche und den Umfang eines Kreisquerschnittes ein, erhält man den Durchmesser des Kreises als Ergebnis.

$$d_{h,Kreis} = \frac{4A_{Kreis}}{U_{Kreis}} = \frac{4d_{Kreis}^2 \frac{\pi}{4}}{d_{Kreis} \pi} = d_{Kreis} \quad (5-3)$$

$d_{h,Kreis}$                     *hydraulischer Durchmesser Kreis [ $\mu\text{m}$ ]*

$A_{Kreis}$                       *Fläche Kreis [ $\mu\text{m}^2$ ]*

$U_{Kreis}$                       *Umfang Kreis [ $\mu\text{m}$ ]*

$d_{Kreis}$                       *Durchmesser Kreis [ $\mu\text{m}$ ]*

Der hydraulische Porendurchmesser ist demnach ein mathematisch einfach handhabbarer Vergleichsdurchmesser der die Form der Pore mitberücksichtigt.

## Porenflächendichteverteilung

Mit Hilfe der berechneten Werte für  $d_{h,i}$  lässt sich die Aufteilung der Porenfläche auf die verschiedenen Porengrößen in Form einer Porenflächendichteverteilung  $q_2(d_{h,i})$  darstellen (siehe Abbildung 5-4).

$$q_2(d_{h,i}) = \frac{\Delta A_i(d_{h,i})}{A_{tot} \cdot \Delta d_{h,i}} \quad (5-4)$$

$q_2(d_{h,i})$	Porenflächendichteverteilung [ $\mu\text{m}^{-1}$ ]
$\Delta A_i(d_{h,i})$	Summe der Porenflächen mit hydraulischen Durchmessern im Bereich von $\Delta d_{h,i}$ [ $\mu\text{m}^2$ ]
$A_{tot}$	Gesamtfläche betrachteter Bildausschnitt [ $\mu\text{m}^2$ ]
$\Delta d_{h,i}$	Intervallbreite [ $\mu\text{m}$ ]

Abbildung 5-4 zeigt die Porenflächendichteverteilung eines Filtermediums.

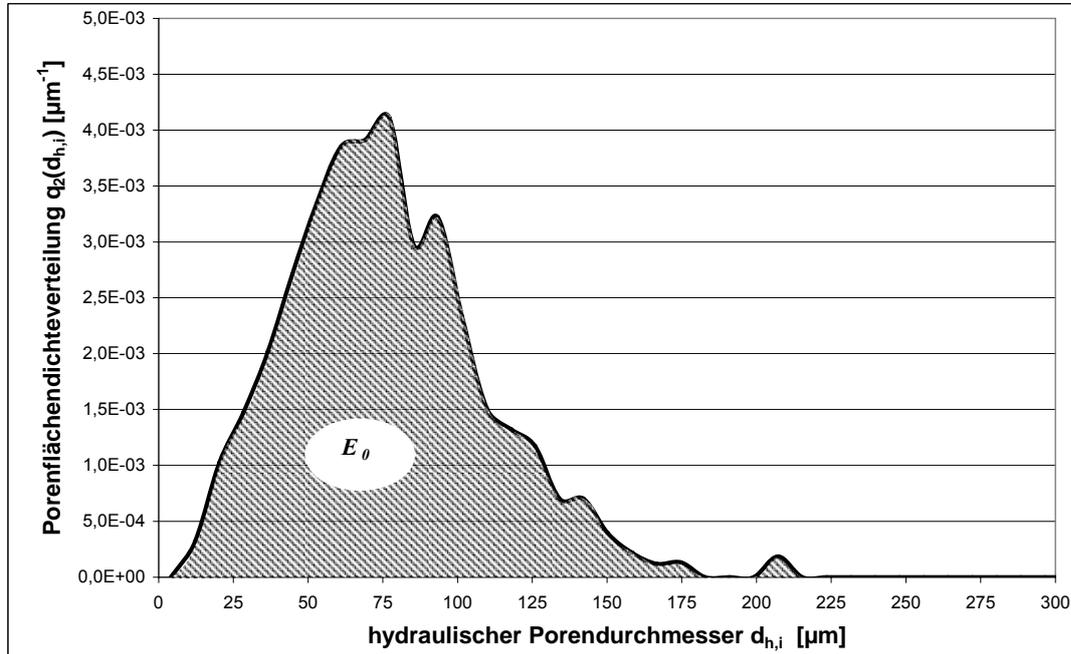


Abbildung 5-4: Porenflächendichteverteilung eines Filtermediums

Anhand der Porenflächendichteverteilung kann die Qualität des Verdichtungsprozesses sowie die Effektivität der Nachbehandlung eines Filtermediums beurteilt werden. Durch Nachbehandlungen, die eine Verdichtung der oberflächennahen

Faserschichten bewirken (z.B. Kalandrieren), kommt es zu einer Verschiebung des Kurvenzugs hin zu kleineren hydraulischen Durchmessern. Dabei besitzen gleichmäßig vernadelte Filtermedien eine schmalere Porenflächenverteilung in Vergleich zu schlecht vernadelten Filtermedien die mitunter durch verbleibende Nadeleinstichlöcher einen deutlich bimodalen Verlauf der Porenflächendichteverteilung besitzen können.

Die Fläche unterhalb des Kurvenzuges in Abbildung 5-4 entspricht der Oberflächenporosität des betrachteten Oberflächenbereichs. Es kann somit folgender Zusammenhang zwischen Oberflächenporosität  $E_0$  und Porenflächendichteverteilung  $q_2(d_{h,i})$  angegeben werden:

$$E_0 = \sum_0^{d_{h,i \max}} q_2(d_{h,i}) \cdot \Delta d_{h,i} \quad (5-5)$$

$E_0$	<i>Oberflächenporosität [-]</i>
$d_{h,i \max}$	<i>maximal auftretender hydraulischer Porendurchmesser [<math>\mu\text{m}</math>]</i>
$q_2(d_{h,i})$	<i>Porenflächendichteverteilung [<math>\mu\text{m}^{-1}</math>]</i>
$\Delta d_{h,i}$	<i>Intervallbreite [<math>\mu\text{m}</math>]</i>

Aus der Porenflächendichteverteilung ist demnach direkt ersichtlich wie sich die Oberflächenporosität eines Filtermediums auf die verschiedenen Porengrößen aufteilt.

### **Mittlerer hydraulischer Porendurchmesser**

Des Weiteren kann für das gesamte Porensystem im Beobachtungsausschnitt ein mittlerer hydraulischer Porendurchmesser  $d_h$  (nächste Seite) in Analogie zu Gleichung (5-2) definiert werden.

$$d_h = \frac{4A_{p,tot}}{U_{p,tot}} = \frac{4 \sum_{i=1}^{N_{tot}} A_i}{\sum_{i=1}^{N_{tot}} U_i} \quad (5-6)$$

$d_h$	<i>mittlerer hydraulischer Porendurchmesser [<math>\mu\text{m}</math>]</i>
$A_{p,tot}$	<i>Summe der Porenflächen im betrachteten Bildausschnitt [<math>\mu\text{m}^2</math>]</i>
$U_{p,tot}$	<i>Summe Porenumfänge im betrachteten Bildausschnitt [<math>\mu\text{m}</math>]</i>
$N_{tot}$	<i>Anzahl der Poren im betrachteten Bildausschnitt [-]</i>
$A_i$	<i>Porenfläche der i-ten Pore [<math>\mu\text{m}^2</math>]</i>
$U_i$	<i>Porenumfang der i-ten Pore [<math>\mu\text{m}</math>]</i>

Der mittlere hydraulische Porendurchmesser  $d_h$  kann als Maß für die Größe der Poren an der Filtermitteloberfläche verstanden werden. Filtermedien mit einem großen  $d_h$  lassen im Vergleich zu Filtermedien mit kleinen  $d_h$  einen erhöhten Staubdurchtritt, sowie eine erhöhte Staubeinlagerung erwarten. Auf den Zusammenhang zwischen den erfassten Strukturparametern wie Porenflächendichteverteilung, hydraulischer Porendurchmesser und den Betriebsverhalten von Abreinigungsfiltermedien im Bezug auf Staubdurchtritt und Staubeinlagerung wird ab Kapitel 5.2 *Einfluss der Oberflächenstruktur eines Filtermediums auf das Staubeinlagerungsverhalten und die Reingasstaubkonzentration* (Seite 42ff) näher eingegangen.

### **Porentiefe**

Als Porentiefe wird nach [2] (Abbildung 5-5) der Abstand des von außen sichtbaren Porengrundes zur Oberfläche des Filtermediums definiert. Zur Bestimmung der Porentiefe wird die geringere Tiefenschärfe eines Lichtmikroskops bei hohen Vergrößerungen ausgenutzt. Das zu untersuchende Filtermedium wird auf dem Objektisch eines Lichtmikroskops platziert. Der Abstand zwischen Objektiv und Objekt lässt sich mittels Feintriebes verstellen. Zuerst stellt man auf die die Pore umrandenden Fasern scharf, bestimmt die Höhe des Objektisches und stellt dann

auf den von Fasern gebildeten Porengrund scharf, wozu der Objektisch wiederum in seiner Höhe verstellt werden muss.

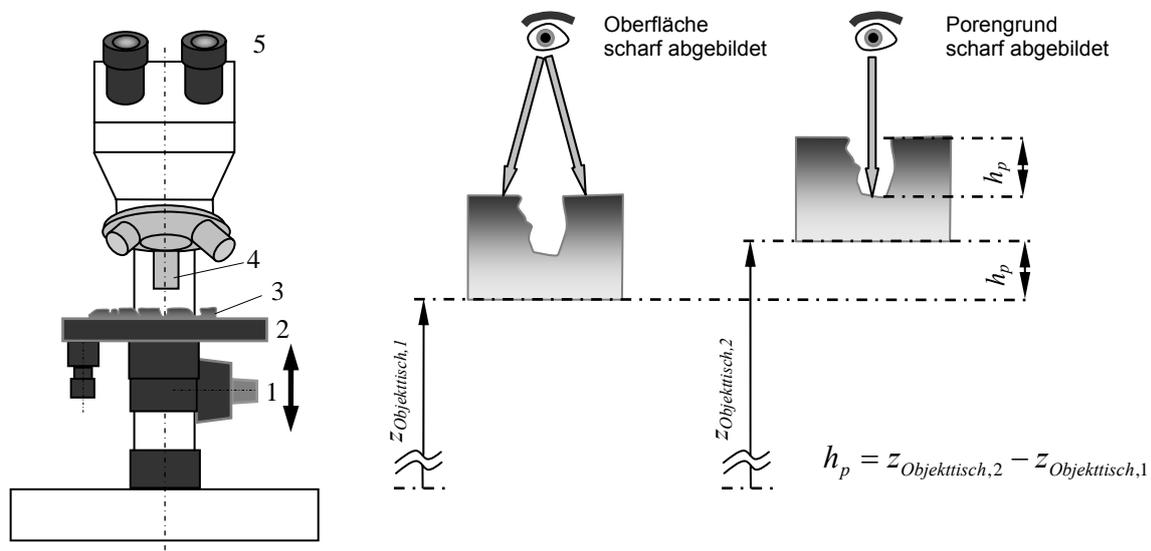


Abbildung 5-5: Bestimmung der Porentiefen; Versuchsaufbau (links); schematische Darstellung der Durchföhrung (rechts); (1) Feintrieb; (2) Objektisch (3) Filtermittelprobe; (4) Objektiv; (5) Okular des Lichtmikroskops

Die Porentiefe ergibt sich dabei als Differenz der Objektischhöhen.

$$h_p = z_{\text{Objektisch},2} - z_{\text{Objektisch},1} \quad (5-7)$$

$h_p$  Porentiefe der vermessenen Pore [ $\mu\text{m}$ ]

$z_{\text{Objektisch},1}$  Objektischhöhe bei der der Poreneingang scharf abgebildet wird [ $\mu\text{m}$ ]

$z_{\text{Objektisch},2}$  Objektischhöhe bei der der Porengrund scharf abgebildet wird [ $\mu\text{m}$ ]

Bei der Porentiefenbestimmung werden je Filtermedium hundert Poren vermessen. Um zu gewährleisten, dass jede Pore die gleiche Wahrscheinlichkeit hat ausgewählt zu werden, wird das zu untersuchende Filtermedium am Objektisch des Mikroskops zufällig in beliebige Richtungen verschoben und jeweils die dem Mittelpunkt des betrachteten Bereichs am nächsten liegende Pore vermessen. Durch diese Vorgehensweise soll eine subjektive Poreauswahl (z.B. Bevorzugung größerer Poren) sowie systematische Fehler (z.B. könnte ein fixer Verschiebeabstand ein

Vielfaches der Maschenweite des Stützgewebes oder des Nadelabstandes der Nadelmaschine sein und so eine repräsentative Porenauswahl beeinträchtigen) verhindert werden.

### Porentiefenanzahlsummenverteilung

Aus den Porentiefen der Einzelporen kann eine Porentiefenanzahlsummenverteilung  $Q_0(h_p)$  für den betrachteten Ausschnitt berechnet werden.

$$Q_0(h_p) = \frac{\sum_{h=0}^{h=h_p} N(h)}{N_{tot}} \quad (5-8)$$

$Q_0(h_p)$	Porentiefenanzahlsummenverteilung [-]
$h_p$	Porentiefe [ $\mu\text{m}$ ]
$h$	Tiefe (Laufvariable) [ $\mu\text{m}$ ]
$N(h)$	Anzahl der Poren mit der Tiefe $h$ [-]
$N_{tot}$	Gesamtzahl der Poren im Ausschnitt [-]

Abbildung 5-6 zeigt exemplarisch ein schematisches Beispiel einer Porentiefenanzahlsummenverteilung.

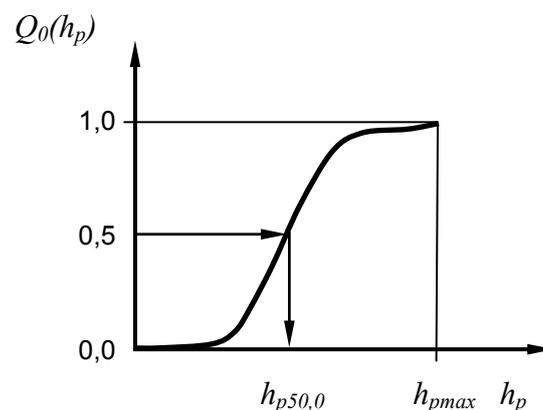


Abbildung 5-6: Porentiefenanzahlsummenverteilung (schematisch) eines Nadelfilze

### Medianwert der Porentiefenanzahlsummenverteilung

Der Medianwert  $h_{p50,0}$  der Porentiefenanzahlsummenverteilung ergibt sich zu  
(siehe Abbildung 5-6)

$$h_{p50,0} = h_p(Q_0(h_p) = 0,5) \quad (5-9)$$

$h_{p50,0}$                       Medianwert der Porentiefenanzahlsummenverteilung [ $\mu\text{m}$ ]

### Porenvolumenäquivalent

Als Kennwert für das Porenvolumen in den oberflächennahen Faserschichten eines Abreinigungsfiltermediums soll nach [2] ein Porenvolumenäquivalent  $H$  als Produkt aus Oberflächenporosität  $E_0$  und dem Medianwert der Porentiefenanzahlsummenverteilung  $h_{p50,0}$  definiert werden.

$$H = E_0 \cdot h_{p50,0} \quad (5-10)$$

$H$                       Porenvolumenäquivalent [ $\mu\text{m}$ ]

$E_0$                       Oberflächenporosität [-]

$h_{p50,0}$                       Medianwert der Porentiefenanzahlsummenverteilung [ $\mu\text{m}$ ]

Das Porenvolumenäquivalent kann als ein auf die Anströmfläche bezogenes, einsehbares Porenvolumen eines Abreinigungsfiltermediums verstanden werden.

Im folgenden Abschnitt sollen die Strukturen der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Filtermittel analysiert werden. Dabei wird auf die Auswahl geeigneter Filtermedien zur Untersuchung des Einflusses von Ladung und Faserform auf das Betriebsverhalten von Abreinigungsfiltermedien eingegangen. Ferner sollen die Unterschiede in den Oberflächenstrukturen, infolge des Herstellverfahrens bzw. infolge des eingesetzten Fasermaterials, mittels der weiterentwickelten bildoptischen Strukturanalyse aufgezeigt werden. In Filtermitteltests in Anlehnung an VDI 3926, soll schließlich die Auswirkungen der Oberflächenstruktur eines Filtermediums auf das Staubeinlagerungsverhalten und auf die Reingasstaubkonzentration untersucht werden.

## **5.2 Einfluss der Oberflächenstruktur eines Filtermediums auf das Staubeinlagerungsverhalten und die Reingasstaubkonzentration**

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen erfolgten an speziell für diesen Zweck angefertigten Nadelfilzen. Zuerst wird auf Überlegungen zur Filtermittelauswahl eingegangen um Vorgaben für die gewünschten Nadelfilze zu erhalten. Mittels der weiterentwickelten Bildanalysemethode sollen die Strukturen der untersuchten Nadelfilze erfasst werden. Die Ergebnisse der Strukturanalyse sollen mit den Resultaten aus Bestäubungsversuchen (100 Zyklen) der für die Untersuchung zu Verfügung stehenden Filtermedien verglichen werden.

## **5.3 Vorgaben für die Fertigung der benötigten Filtermedien**

Polyimid Fasermaterial weist herstellungsbedingt unregelmäßig gelappte Faserquerschnittsformen auf (siehe Kapitel 7.1 *Entstehung multilobaler Faserquerschnittsformen*; Seite 76). An den bereitzustellenden Filtermedien sollen Untersuchungen zum Einfluss dieser Faserformen und eines möglicherweise anders-artigen Ladungszustandes auf das Filtrationsverhalten bezüglich Staubeinlagerung, Restdruckverlustentwicklung und der sich einstellenden Reingasstaubkonzentration durchgeführt werden. Als Referenzfaserwerkstoff soll Polyphenylensulfid (PPS) gleicher Faserfeinheit (gleichen Titers) sowie kreisrunder Faserquerschnittsform Verwendung finden. Da Polyimid mit  $1,41 \text{ g/cm}^3$  eine annähernd gleiche Dichte wie Polyphenylensulfid ( $1,34 \text{ g/cm}^3$ ) aufweist, ergeben sich bei gleichem Fasertiter annähernd gleich große Querschnittsflächen.

Die für die Untersuchungen benötigten Nadelfilze sollen auf möglichst gleiche Spezifikationen gefertigt werden (gleiches Flächengewicht, gleiche Verarbeitung bzw. gleiche Luftdurchlässigkeit). Um den Einfluss einer Nachbehandlung auf die Untersuchungsergebnisse gering zu halten, sollen die Nadelfilze nur gesengt und nicht weiter behandelt werden. Zusätzlich sollen zwei Nadelfilze möglichst locker mit entsprechend hoher Luftdurchlässigkeit und mit unbehandelter Oberfläche zur Verfügung gestellt werden.

In Tabelle 5-1 findet sich eine Auflistung der für die Untersuchungen gefertigten Filtermedien.

Bez.	Fasermaterial	Finish	Flächengewicht [g/m <sup>2</sup> ]	Luftdurchlässigkeit [l/(dm <sup>2</sup> ·min) bei 200 Pa]	Dicke [mm]
FM1	wassergestrahlt PI/GF	beidseitig gesengt	490	115	2,4
FM2	wassergestrahlt PPS/GF	beidseitig gesengt	490	130	1,7
FM3	vernadelt PI/PI	anströmseitig gesengt	531	129	2,6
FM4	vernadelt PPS/PPS	anströmseitig gesengt	528	130,5	1,7
FM5	vernadelt PES/PES	anströmseitig gesengt	535	129	1,7
FM6	vernadelt PI/PI	unbehandelt	501	156	2,8
FM7	vernadelt PPS/PPS	unbehandelt	508	162	1,9

Tabelle 5-1: untersuchte Filtermedien

Es handelt sich um drei Paare (FM1&FM2; FM3&FM4; FM6&FM7) von jeweils einen Filtermedium bestehend aus multilobalen Polyimid-Fasern und einem Vergleichsnadelfilz bestehend aus Polyphenylensulfid-Fasern mit kreisrundem Querschnitt. Zusätzlich wurde ein Standard Polyester-Nadelfilz (FM5) bestehend aus Fasern mit Kreisquerschnitt und mit zu Filtermittelpaar (FM3&FM4) passenden Kennwerten ausgewählt. Die drei Filtermittelpaare unterscheiden sich in ihren Herstellungsverfahren, in ihren Luftdurchlässigkeitsbereichen sowie in ihrer Nachbehandlung.

FM1 und FM2 sind wasserstrahlverfestigte Filtermedien, die durch den Herstellungsprozess eine kompakte Struktur aufweisen sowie beidseitig gesengt sind. Herstellungsbedingt besitzen FM1 und FM2 ein Glasfasergewebe als Stützgewebe.

FM3, FM4 und FM5 sind relativ dicht vernadelte Nadelfilze mit gesengten Rohgasseiten. Vorgabe für die Herstellung von FM3, FM4 und FM5 war die

Einhaltung gleicher Flächenmassen sowie gleicher Luftdurchlässigkeiten. Es zeigte sich, dass unter den gewählten Vorgaben gleiches Flächengewicht und gleiche Luftdurchlässigkeit Filtermedien aus multilobalen Polyimid- Fasermaterial (FM3) um ca. 50% dicker als Filtermedien aus Fasern kreisrunden Querschnitts (FM4 und FM5) sind. Auf die Gründe weswegen bei der Verarbeitung von multilobalen Fasermaterial dickere Filtermedien entstehen, wird in Kapitel 7.2 *Einfluss der Faserquerschnittsform auf den Aufbau eines Nadelfilzes* (Seite 78 ff) eingegangen.

FM6 und FM7 sind relativ schwach verdichtete Filtermedien ohne Oberflächenbehandlung. Aus diesem Grund weisen FM6 und FM7 bei einem erhöhten Wert für die Luftdurchlässigkeit auch die größten Dicken auf. Vergleicht man die Dicken von FM6 und FM7 miteinander ergibt sich wieder ein um ca. 50% höherer Wert für den Nadelfilz aus multilobalen Fasermaterial.

#### 5.4 Bestimmung der Strukturparameter

In Tabelle 5-2 sind die bildanalytisch gewonnenen Strukturparameter der untersuchten Filtermedien aus Tabelle 5-1 zusammengefasst.

Bez.	Filtermedium	Oberflächenporosität $E_0$ [-]	mediane Porentiefe $h_{p50,0}$ [ $\mu\text{m}$ ]	Porenvolumen- äquivalent $H = E_0 \cdot h_{p50,0}$ [ $\mu\text{m}$ ]	mittlerer hydr. Durchmesser $d_h$ [ $\mu\text{m}$ ]
FM1	PI/GF	0,21	271	57	40
FM2	PPS/GF	0,20	224	45	43
FM3	PI/PI	0,31	376	117	57
FM4	PPS/PPS	0,22	229	50	45
FM5	PES/PES	0,37	376	139	61
FM6	PI/PI	0,46	870	400	79
FM7	PPS/PPS	0,43	487	209	70

Tabelle 5-2: Strukturparameter der untersuchten Filtermedien (Tabelle 5-1, Seite 43)

Je nach Herstellungsverfahren und Verdichtung ergeben sich unterschiedliche Werte für Oberflächenporosität und Porentiefen. Eine übersichtliche Möglichkeit der

Darstellung der Strukturparameter stellt die von Koschutnig [2, 32, 33] beschriebene Vergleichspore dar. Man versteht darunter eine gemeinsame Darstellung der Porentiefenanzahlsummenverteilung und der Oberflächenporosität in einem Diagramm. Die Fläche der Vergleichspore kann dabei als das nach Gleichung (5-10) bestimmte Porenvolumenäquivalent interpretiert werden.

In Abbildung 5-7 sind die ermittelten Modellporen für die untersuchten Filtermedien dargestellt. Mit Hilfe der Modellporen lassen sich gut die Unterschiede in den Porentiefen und den Oberflächenporositäten der analysierten Filtermedien veranschaulichen. Die wasserstrahlverfestigten Filtermedien FM1 und FM2 weisen die kleinsten Modellporen und somit auch die kleinsten Werte für Oberflächenporosität, Porentiefe sowie Porenvolumenäquivalent auf. Modellporen mittlerer Größe ergeben sich bei den relativ dicht vernadelten Filtermedien FM3, FM4 und FM5. Die größten Modellporen wurden für die auf hohe Luftdurchlässigkeiten gefertigten, unbehandelten Filtermedien FM6 und FM7 gefunden.

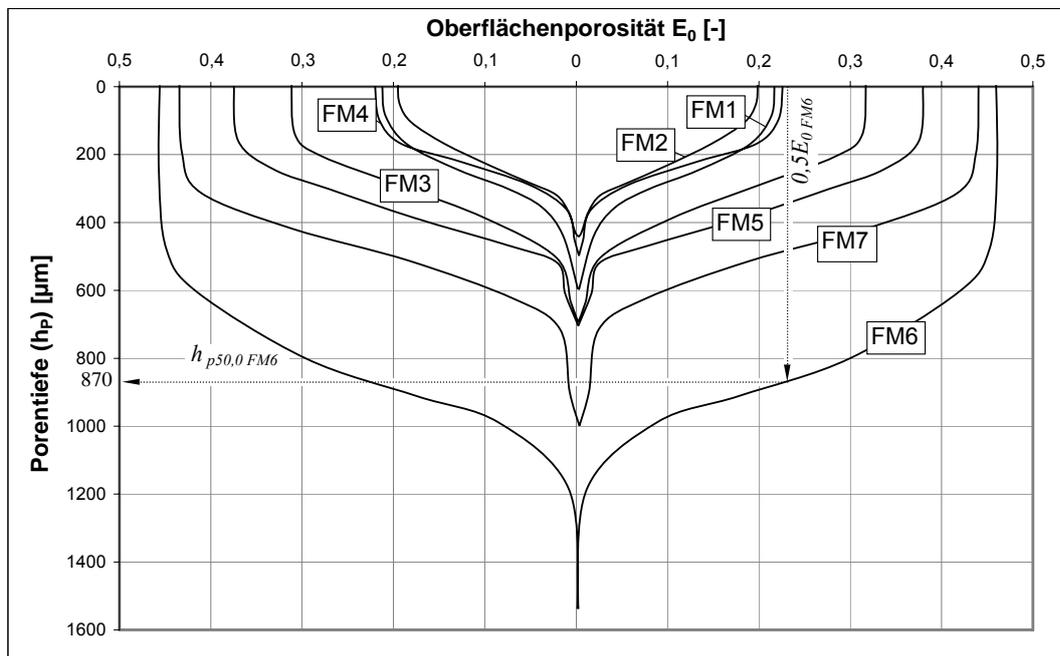


Abbildung 5-7: Modellporen der analysierten Filtermedien FM1 bis FM7

Bei den zwei Filtermedienpaaren, die auf gleiche Luftdurchlässigkeit gefertigt wurden (FM3 (multilobal) und FM4 (rund) bzw. FM6 (multilobal) und FM7 (rund)), zeigt sich, dass jeweils das Medium gefertigt aus multilobalen Fasermaterial eine größere Modellpore aufweist im Vergleich zum Medium aus Fasern kreisrunden Querschnitts.

Da Nadelfilze aus multilobalen Fasermaterial bei gleicher Luftdurchlässigkeit um ca. 50 % dicker als die Vergleichsnadelfilze aus Fasern kreisrunden Querschnitts sind, müssen diese, um trotz der größeren Dicken gleiche Luftdurchlässigkeiten aufzuweisen, größere Filtermittelporen besitzen. Für die wasserstrahlverfestigten Filtermedien (FM1 (multilobal) und FM2 (rund)) sind die Unterschiede in den Modellporen geringer, da hier bei der Fertigung für das Filtermedium aus multilobalen Fasermaterial eine geringere Luftdurchlässigkeit erhalten wurde, jedoch weist FM1 (multilobal) trotz geringerer Luftdurchlässigkeit noch immer eine leicht größere Modellpore im Vergleich zu FM2 (rund) auf. Auf die Gründe für diese Unterschiede soll in Kapitel 7 *Einfluss multilobaler Faserquerschnittsformen auf die Struktur und das Filtrationsverhalten von Abreinigungsfiltermedien* (Seite 76 ff) im Detail eingegangen werden.

Des Weiteren wurden für die untersuchten Filtermedien die Porenflächendichteverteilungen  $q_2(d_{h,i})$  nach Gleichung (5-4) (Seite 36) bestimmt.

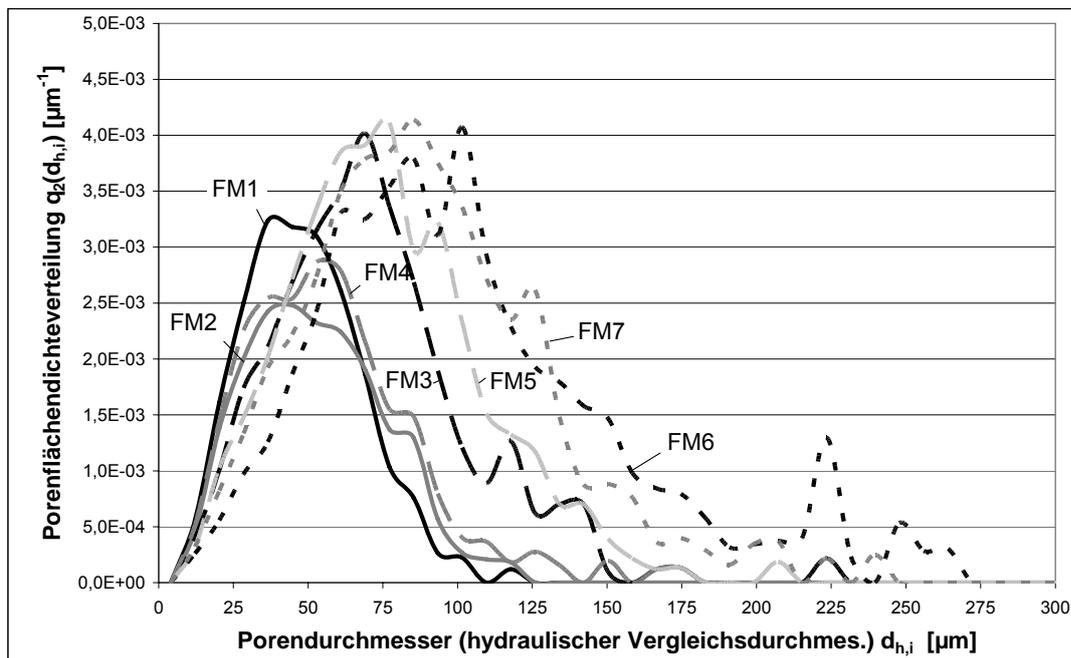


Abbildung 5-8: Porenflächendichteverteilungen  $q_2(d_{h,i})$  der untersuchten Filtermedien FM1 bis FM7

Je nach Verarbeitung weisen die untersuchten Filtermedien nicht nur unterschiedliche Oberflächenporositäten auf, sondern verfügen auch über verschiedene Porengrößen. Die stark verdichteten, wassergestrahlten Filtermedien FM1 (multilobal) und

FM2 (rund) weisen Poren mit kleinen Porendurchmessern auf. Im Gegensatz dazu, sind bei den relativ schwach verdichteten unbehandelten Filtermedien FM6 (multilobal) und FM7 (rund) auch Poren mit größeren Durchmessern zu finden.

Die dicht vernadelten Filtermedien FM3 (multilobal), FM4 (rund) und FM5 (rund) liegen mit ihren Porendurchmessern zwischen den wasserstrahlverfestigten und den unbehandelten Filtermedien.

### 5.5 Einfluss der Oberflächenstruktur eines Filtermediums auf Staubeinlagerungsverhalten und Reingasstaubkonzentration

Über Filtermitteltests in Anlehnung an VDI 3926 [34] soll nun überprüft werden, ob mit den bildanalytisch gewonnenen Charakterisierungsparametern die Staubeinlagerung und die Reingasstaubkonzentration für die verschiedenen Filtermedien abgeschätzt werden kann. In Abbildung 5-9 ist der verwendete Filtermittelprüfstand schematisch dargestellt.

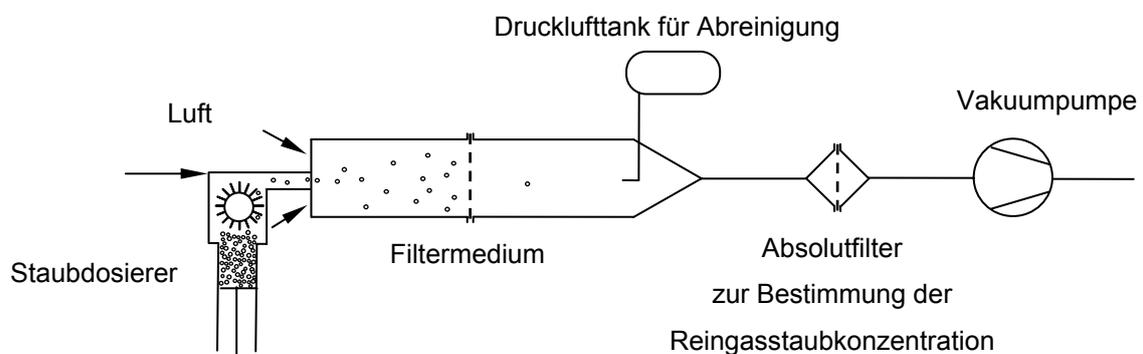


Abbildung 5-9: Filtermittelprüfstand nach VDI 3926 (Typ 2)

Der Rohgasstrom wird durch einen horizontalen Rohgaskanal gesaugt. Der Teststaub wird mit Hilfe eines Bürstendosierers dem Rohgasstrom zugegeben. Nach einer Mischzone passiert das Rohgas den Filtermittelprüfling. Der kreisrunde Filtermittelprüfling ( $176 \text{ cm}^2$ ) ist flach in einer Halterung eingespannt. Durch Staubabscheidung bildet sich ein Staubkuchen an der Oberfläche des Filtermediums aus. Während des Versuchs wird der Druckverlust über das Filtermedium

kontinuierlich aufgezeichnet. Nach Erreichen eines vorgegebenen maximalen Druckverlustes wird der gebildete Filterkuchen mittels Druckstoßabreinigung entfernt. Unmittelbar nach der Druckstoßabreinigung folgt der nächste Filtrationszyklus. In Tabelle 5-3 (Spalte 2) sind die nach VDI 3926 Typ 2 für Standardfiltermittelprüfungen vorgesehenen Prüfparameter aufgelistet.

Um eine erhöhte Staubeinlagerung, verbunden mit einem vermehrten Staubdurchtritt, zu erhalten, wurde die in Tabelle 5-3 Spalte 3 angeführten Prüfparameter gewählt.

Kenngroße	VDI 3926 (Typ 2)	verwendete Prüfparameter
Filterflächenbelastung [ $\text{m}^3/(\text{m}^2 \text{ min})$ ]	3,0	3,0
Rohgasstaubkonzentration [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]	5,0	5,0
Anzahl der Filtrationszyklen [-]	10	100
Druckverlust vor der Abreinigung [mbar]	12,00	10,00
Abreinigungstankdruck [bar]	2,5	4,0
Ventilöffnungszeit [ms]	50	150
Teststaub [-]	TiO <sub>2</sub> „Kronos 2160“	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> „Pural NF“
Korngrößenverteilung Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> „Pural NF“ (lt. Herstellerangaben)	91,1% < 25 $\mu\text{m}$ ; 98,2% < 45 $\mu\text{m}$ ; 100% < 90 $\mu\text{m}$	

Tabelle 5-3: Prüfparameter für die Filtermitteltests in Anlehnung an VDI 3926 Typ 2 [34]

Eine Filtermittelprüfung beinhaltet 100 Filtrations- / Abreinigungszyklen. Nach dem Versuch wurde die Reststaubmasse mittels Differenzwägung bestimmt. Hinter den Filterprüfling ist ein Absolutfilter situiert, welcher zur Sammlung des Staubes im Reingas dient. Bezieht man die am Absolutfilter gesammelte Staubmasse auf den abgesaugten Volumenstrom kann eine mittlere Reingasstaubkonzentration berechnet werden.

Als Messparameter sollen nun die nach 100 Filtrationszyklen im Filtermedium verbliebene Reststaubmasse und die über 100 Filtrationszyklen gemittelte Reingasstaubkonzentration mit den bildoptisch ermittelten Strukturparametern der Filtermedien in Korrelation gesetzt werden.

### Zusammenhang zwischen Reststaubmasse und Porenvolumenäquivalent

Zunächst soll versucht werden die Staubaufnahme mit dem anströmseitig zur Verfügung stehenden Porenvolumen in Zusammenhang zu bringen. Als Bewertungsgröße wird das, nach Gleichung 4-15 definierte, Porenvolumenäquivalent herangezogen. Das Porenvolumenäquivalent stellt das von außen einsehbare Porenvolumen einer Filtermitteloberfläche dar. Es ist zu erwarten, dass sich bei offeneren Strukturen (mit einem entsprechend großen Porenvolumenäquivalent) auch größere Mengen an Staub einlagern.

In Abbildung 5-10 ist die nach den Filtermittelprüfungen verbliebene Reststaubmasse über dem Porenvolumenäquivalent aufgetragen.

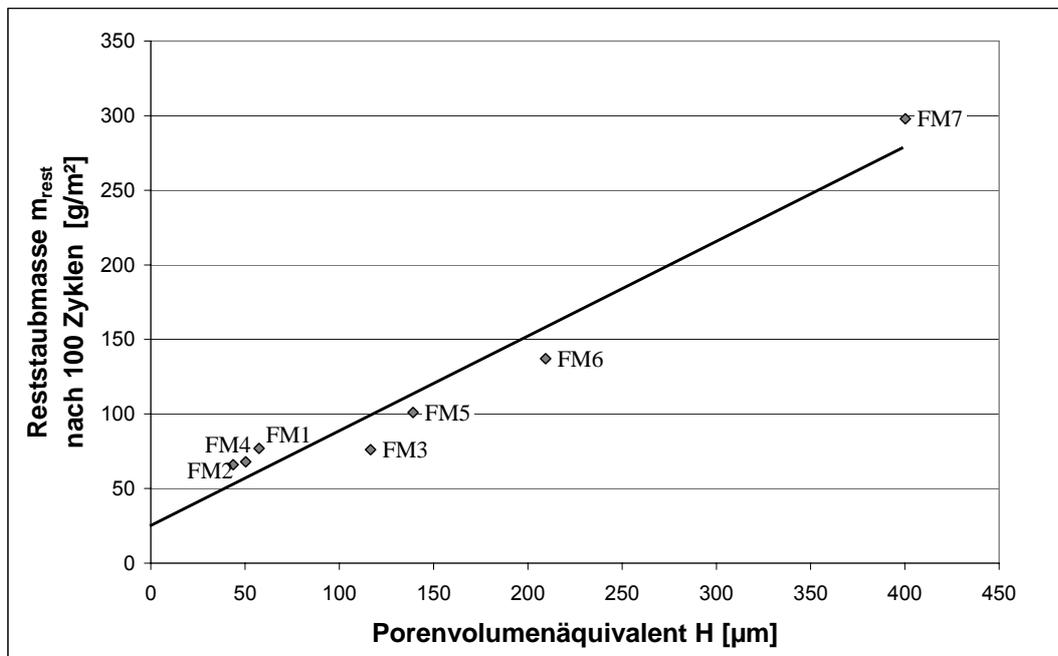


Abbildung 5-10: Zusammenhang zwischen Reststaubmasse und Porenvolumenäquivalent für die untersuchten Filtermedien FM1 bis FM7

Je nach Struktur der Filtermedien lagern diese während des Versuchs unterschiedliche Mengen an Staub ein. Es zeigt sich ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Reststaubmasse und Porenvolumenäquivalent. Dabei lagern Filtermedien mit kleinerem Porenvolumenäquivalent auch proportional kleinere Reststaubmassen ein.

Als Reststaubmasse wird die nach Versuchsende im und am Filtermedium verbleibende Staubmasse definiert. Die Reststaubmasse setzt sich demnach aus einem Staubanteil der sich im Filtermedium einlagert und einem Staubanteil der an der rohgasseitigen Oberfläche des Filtermediums vornehmlich durch Adhäsionskräfte haften bleibt, zusammen.

Für die Reststaubmasse  $m_{rest}$  und das Porenvolumenäquivalent  $H$  kann somit folgende lineare Beziehung aufgestellt werden:

$$m_{rest} = m_{rest,ein} + m_{rest,an} = k_{acc} \cdot H + m_{rest,an} \quad (5-11)$$

$m_{rest}$	Reststaubmasse [g/m <sup>2</sup> ]
$m_{rest,an}$	nach Abreinigung an der Filtermitteloberfläche anhaftende Staubmasse [g/m <sup>2</sup> ]
$m_{rest,ein}$	nach Abreinigung im Filtermedium verbleibende Staubmasse [g/m <sup>2</sup> ]
$k_{acc}$	Speicherfaktor zur Beschreibung der Staubeinlagerung [g/(m <sup>2</sup> μm)]
$H$	Porenvolumenäquivalent [μm]

Der Speicherfaktor  $k_{acc}$  gibt die Staubaufnahme je einsehbares Porenvolumen an. Mit  $m_{rest,an}$  wird die an der Filtermitteloberfläche haftenbleibende Staubmenge berücksichtigt. Die zu erwartende Reststaubmasse von verschiedenen Filtermedien kann durch das Porenvolumenäquivalent  $H$  und durch zwei Konstanten ( $m_{rest,an}$  und  $k_{acc}$ ), abgeschätzt werden.

Es gelten folgende Zusammenhänge

$$m_{rest,an} = f(\text{Prüfbedingungen}) \quad (5-12)$$

$$k_{acc} = f(\text{Prüfbedingungen}) \quad (5-13)$$

$$H = f(\text{Filtermittelstruktur}) \quad (5-14)$$

$m_{rest,an}$	nach Abreinigung an der Filtermitteloberfläche anhaftende Staubmasse [g/m <sup>2</sup> ]
$k_{acc}$	Speicherfaktor zur Beschreibung der Staubeinlagerung [g/(m <sup>2</sup> μm)]
$H$	Porenvolumenäquivalent [μm]

Es kann somit die Staubeinlagerung auf das Porenvolumenäquivalent  $H$ , welches die Struktur des Filtermediums beschreibt, und zwei Konstanten, welche die Prüfbedingungen widerspiegeln, zurückgeführt werden.

Eine weitere wichtige Betriebsgröße eines Abreinigungsfilters stellt der Staubdurchtritt durch das Filtermedium dar. Grundsätzlich kann zwischen zwei Arten von Staubdurchtritt unterschieden werden. Dem direkten Durchtritt von Staubpartikel die nicht abgeschieden werden und den Durchtritt von bereits abgeschiedenem Staub, der wieder losgelöst wird. Es stellt sich die Frage inwieweit Strukturparameter des Filtermediums auf den Staubdurchtritt Einfluss nehmen. Für beide Fälle dürfte die Porengröße einen Einfluss auf den Staubdurchtritt und infolge auf die sich einstellende Reingasstaubkonzentration zeigen. Es soll untersucht werden, ob eine Beziehung zwischen der mittleren Reingasstaubkonzentration und dem mittleren hydraulischen Porendurchmesser  $d_h$  (Gleichung 5-6, Seite 38) gefunden werden kann. Dazu sollen die bei den Filtertests ermittelten mittleren Reingasstaubkonzentrationen (Mittelwert über 100 Zyklen) der einzelnen Filtermedien über den bildoptisch bestimmten mittleren hydraulischen Porendurchmessern der Filtermedien aufgetragen werden (Abbildung 5-11).

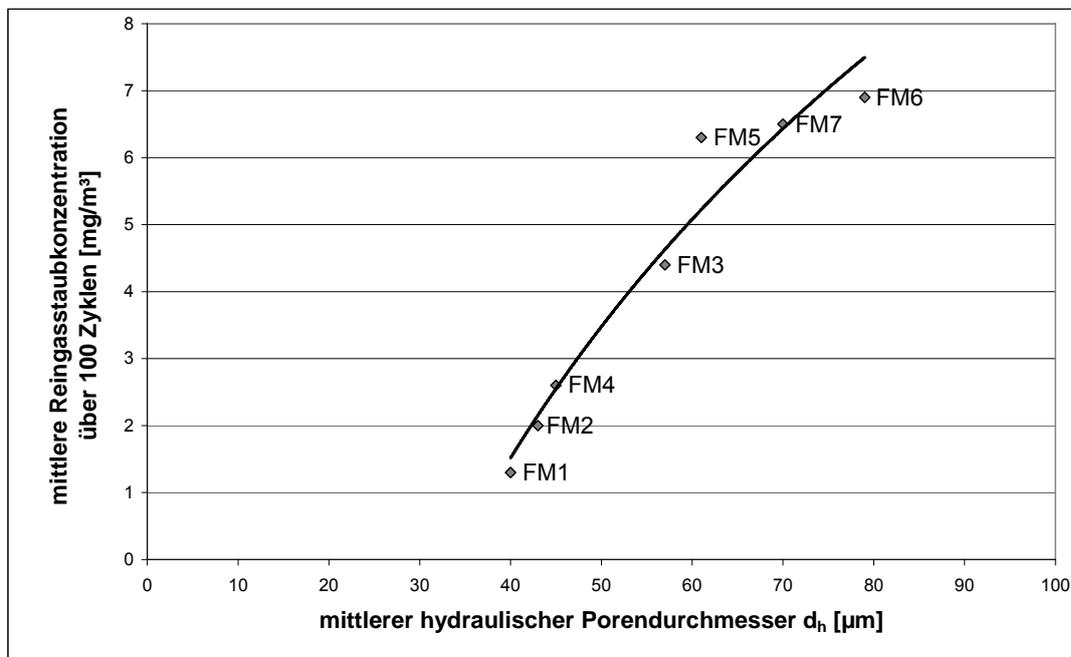


Abbildung 5-11: Zusammenhang zwischen der mittleren Reingasstaubkonzentration über 100 Filtrationszyklen und dem mittleren hydraulischen Porendurchmesser der untersuchten Filtermedium FM1 bis FM7

Unter den gegebenen Versuchsbedingungen zeigt sich eine Abhängigkeit des Staubdurchtritts vom mittleren hydraulischen Durchmesser. Demnach ergibt sich für Filtermedien mit größeren mittleren hydraulischen Porendurchmesser (FM5, FM6 und FM7) auch höhere Reingasstaubkonzentrationen in Vergleich zu den Filtermedien mit kleineren mittleren hydraulischen Porendurchmesser (FM1, FM2 und FM4). Dieses Verhalten kann dadurch erklärt werden, dass bei kleineren Porendurchmessern Staubpartikel um abgeschieden zu werden im Mittel kürzere Wege zu den Fasern hin zu überwinden haben als im Vergleich zu Poren mit größeren Durchmessern. Des Weiteren ist die Staubeinlagerungsschicht bei kleineren Porendurchmessern stabiler und es werden dadurch geringere Mengen an im Inneren des Filtermediums abgeschiedener Staub wieder losgelöst.

Verlängert man den Kurvenzug in Abbildung 5-11 bis zur Abszisse, erhält man einen mittleren hydraulischen Porendurchmesser, unterhalb dessen kein Staubdurchtritt mehr stattfinden sollte. Aus den Versuchsergebnissen kann somit geschlossen werden, dass für den Partikeldurchtritt kleinere Poren eine untergeordnete Rolle spielen. Dies kann mit einer bleibenden Verstopfung der kleineren Poren erklärt werden, die auch nach erfolgter Abreinigung verstopft bleiben.

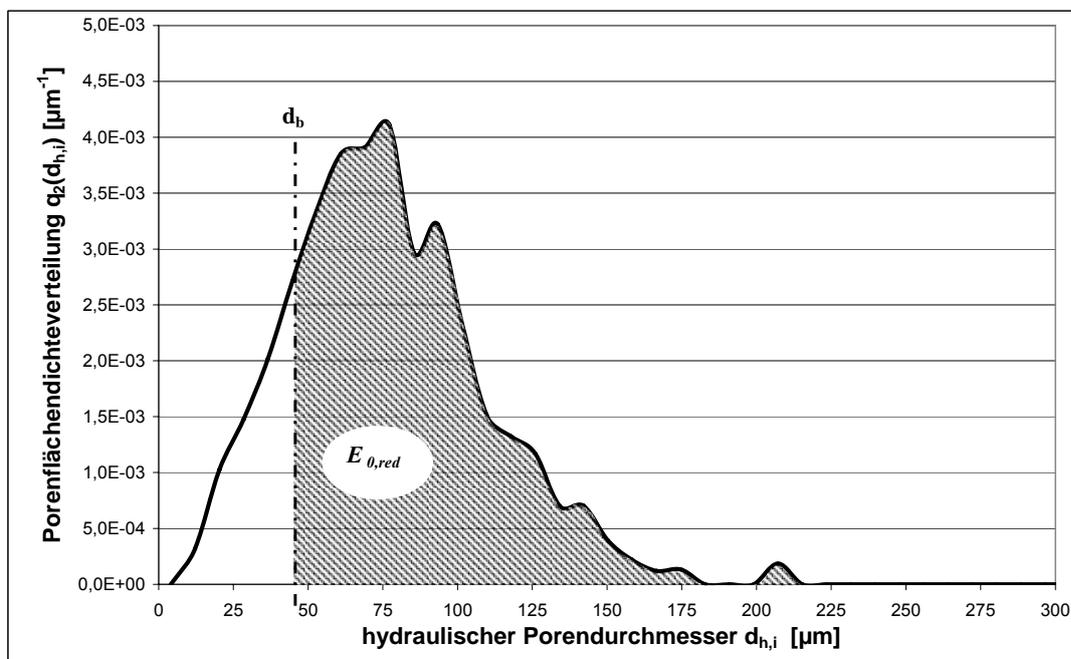


Abbildung 5-12: Bestimmung der reduzierten Oberflächenporosität

Definiert man den Blockadedurchmesser  $d_b$  als jenen Porendurchmesser unter dem kein Partikeldurchtritt mehr stattfindet, kann mit Hilfe der Porenflächendichteverteilungen (siehe Abbildung 5-12) eine um den Beitrag der kleinen Poren reduzierte Oberflächenporosität berechnet werden.

Die reduzierte Oberflächenporosität  $E_{0,red}$  ergibt sich in Analogie zu Gleichung 5-5 (Seite 37) aus dem Zusammenhang von Oberflächenporosität  $E_0$  und Porenflächendichteverteilung  $q_2(d_{h,i})$  wie folgt zu:

$$E_{0,red} = \frac{1}{A_{tot}} \sum_{d_b}^{d_{h,i} \max} \Delta A_i(d_{h,i}) = \sum_{d_b}^{d_{h,i} \max} q_2(d_{h,i}) \cdot \Delta d_{h,i} \quad (5-15)$$

$E_{0,red}$	reduzierte Oberflächenporosität [-]
$A_{tot}$	Gesamtfläche betrachteter Ausschnitt [ $\mu\text{m}^2$ ]
$\Delta A_i(d_{h,i})$	Summe der Porenflächen mit hydraulischen Durchmessern im Bereich von $\Delta d_{h,i}$ [ $\mu\text{m}^2$ ]
$d_{h,i \max}$	maximal auftretender hydraulischer Porendurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]
$\Delta d_{h,i}$	Intervallbreite [ $\mu\text{m}$ ]
$d_b$	Blockadedurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]
$q_2(d_{h,i})$	Porenflächendichteverteilung [ $\mu\text{m}^{-1}$ ]

Die reduzierte Oberflächenporosität kann somit als offene Durchtrittsfläche für den Staub angesehen werden. Poren die kleiner als der Blockadedurchmesser sind, werden für die Bestimmung der reduzierten Oberflächenporosität vernachlässigt.

Es soll nun in erster Näherung eine lineare Abhängigkeit der sich einstellenden Reingasstaubkonzentration  $c_{Reingas}$  von der reduzierten Oberflächenporosität  $E_{0,red}$  angenommen werden.

$$c_{Reingas} = k_{Emission} \cdot E_{0,red} \quad (5-16)$$

$c_{Reingas}$	sich bei gegebenen Prüfbedingungen einstellende Reingasstaubkonzentration [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]
$k_{Emission}$	Staubdurchtrittskonstante zur Beschreibung der sich einstellenden Reingasstaubkonzentration [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]

mit

$$k_{Emission} = f(\text{Prüfbedingungen}) \quad (5-17)$$

Unter der Modellvorstellung, dass die Reingasstaubkonzentration linear von der reduzierten Oberflächenporosität abhängt (Gleichungen (5-16), (5-17)) kann der Blockadedurchmesser aus den Versuchsergebnissen durch Lösen einer Extremwertaufgabe bestimmt werden. Als Bewertungskriterium wird der Regressionskoeffizient für die Zuordnung  $c_{Reingas} = k_{Emission} \cdot E_{0,red}$  herangezogen.

In Abbildung 5-13 ist der Regressionskoeffizient für die Zuordnung  $c_{Reingas} = k_{Emission} \cdot E_{0,red}$  in Abhängigkeit vom gewählten Wert für den Blockadedurchmesser dargestellt.

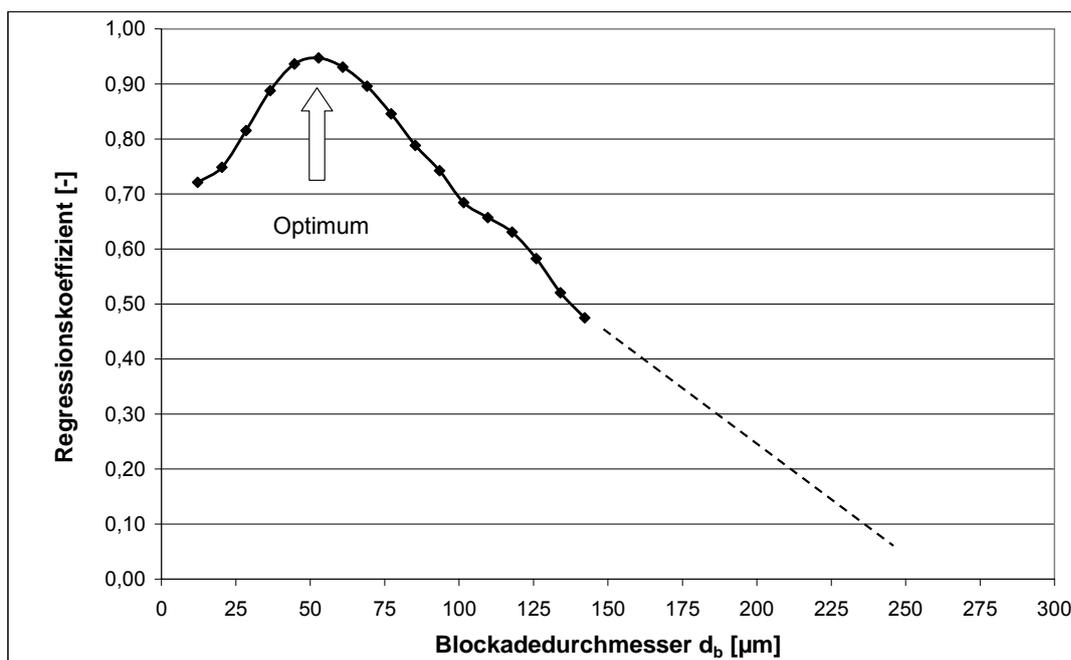


Abbildung 5-13: Regressionskoeffizient für die Zuordnung  $c_{Reingas} = k_{Emission} \cdot E_{0,red}$  in Abhängigkeit vom gewählten Wert für den Blockadedurchmesser  $d_b$

Wird ein zu niedriger Blockadedurchmesser gewählt, werden auch kleine Porenflächen, die nicht für einen Staubbuchtritt zur Verfügung stehen, fälschlich bei der Ermittlung der reduzierten Oberflächenporosität miteinbezogen. Da die unterschiedlichen Filtermedien verschiedene Anteile an kleineren Poren besitzen,

macht sich ein zu niedrig gewählter Blockadedurchmesser in der Güte der Zuordnung  $c_{Reingas} = k_{Emission} \cdot E_{0,red}$  und folglich in einem niedrigeren Wert für den Regressionskoeffizienten bemerkbar. Erhöht man den Wert des Blockadedurchmessers in der Berechnung der reduzierten Oberflächenporosität, werden sukzessive inaktive kleinere Porenflächen vernachlässigt, der Regressionskoeffizient steigt. Es zeigt sich für einen Blockadedurchmesser von  $d_b = 53 \mu\text{m}$  unter den gewählten Prüfbedingungen (Tabelle 5-3, Seite 48) ein Optimum für die lineare Regression der Zuordnung  $c_{Reingas} = k_{Emission} \cdot E_{0,red}$ . Für größere Blockadedurchmesser sinkt wiederum die Güte der Regression, da nun im zunehmenden Ausmaß für einen Staubbuchtritt aktive Porenflächen vernachlässigt werden.

In Abbildung 5-14 ist die mittlere Reingasstaubkonzentration in Abhängigkeit von der reduzierten Oberflächenporosität für einen Blockadedurchmesser von  $53 \mu\text{m}$  dargestellt.

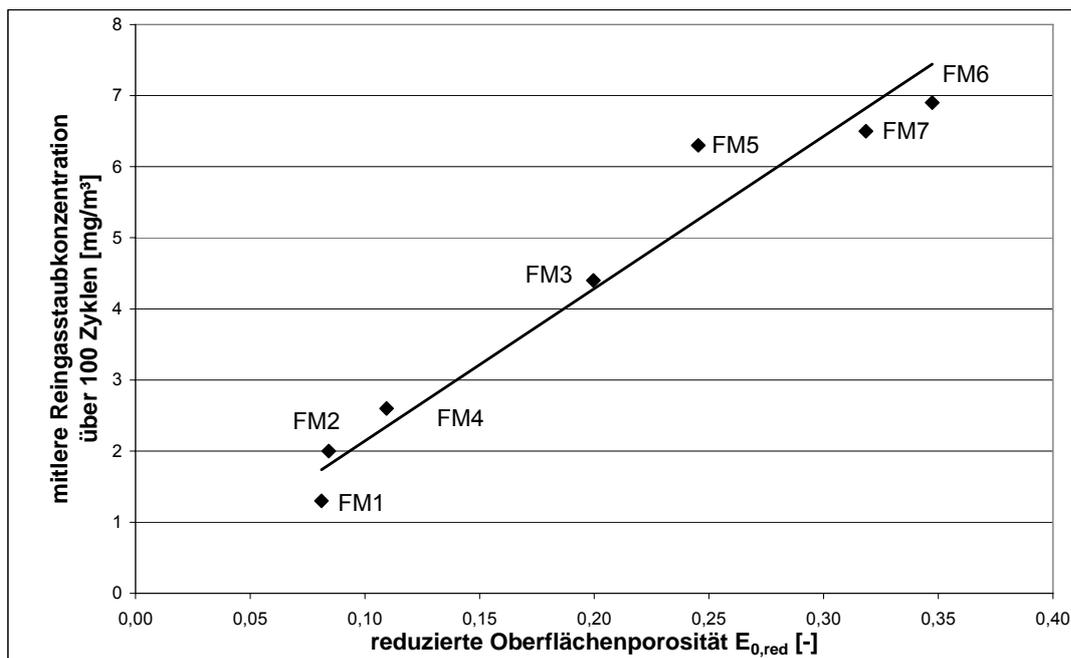


Abbildung 5-14: mittlere Reingasstaubkonzentration über 100 Filtrationszyklen in Abhängigkeit von der reduzierten Oberflächenporosität für die untersuchten Filtermedien FM1 bis FM7

Der lineare Zusammenhang zwischen der mittleren Reingasstaubkonzentration über 100 Zyklen und der reduzierten Oberflächenporosität bestätigt die Modellvorstellungen. Die Reingasstaubkonzentration von verschiedenen Filtermedien kann somit

durch die beiden Konstanten, den Blockadedurchmesser  $d_b = 53 \text{ } [\mu\text{m}]$  und die Steigung  $k_{Emission} = 21,4 \text{ } [\text{mg}/\text{m}^3]$  beschrieben werden.

Der Staubdurchtritt kann somit wiederum auf eine strukturelle Kenngröße (die reduzierte Oberflächenporosität) und auf zwei Konstante ( $d_b, k_{Emission}$ ), welche die Prüfbedingungen wiedergeben, zurückgeführt werden.

## **6 Einfluss elektrostatischer Ladungen auf das Filtrationsverhalten von Abreinigungsfiltermedien**

Die Abscheideeigenschaften filternder Abscheider können sowohl durch elektrostatische Ladungen des abzuscheidenden Staubes als auch des Filtermediums beeinflusst werden. Z.B. werden geladene Tiefenfiltermedien (Elektret-Filtermedien) gezielt für die Abscheidung feiner Stäube eingesetzt [35, 36, 37]. Es stellt sich die Frage, ob elektrostatische Ladungen auch das Filtrationsverhalten von Abreinigungsfiltermedien verbessern können. In diesem Kapitel soll zuerst eine Beschreibung der elektrostatischen Unterstützung der Partikelabscheidung an der Einzelfaser gegeben werden. Um den Einfluss elektrostatischer Ladungen auf Abreinigungsfiltermedien untersuchen zu können, sollen Nadelfilze mittels negativer Koronaentladung in ihren Ladungszuständen verändert werden. Der Ladeerfolg soll durch eine Ladungsvermessung von aus geladenen Filzen herauspräparierten Fasern im Vergleich zu Fasern, die aus ungeladenen Filzen entnommen werden, nachgewiesen werden. In Filtrationsversuchen an einem Filtermittelprüfstand nach VDI 3926 Typ 2 sollen geladene Filtermedien mit ungeladenen Filtermedien in Bezug auf das Staubeinlagerungsverhalten den sich entwickelnden Restdruckverlust und der sich einstellenden Reingasstaubkonzentration verglichen werden.

### **6.1 Elektrostatische Unterstützung der Partikelabscheidung an der Einzelfaser**

Durch Überschussladungen und Dipole treten zwischen Partikeln und Fasern verschiedene elektrostatische Wechselwirkungskräfte auf. In [1] wird ein Überblick über die Möglichkeiten elektrostatischer Beeinflussung zwischen Partikeln und Filtermedien gegeben. In Abbildung 6-1 sind die zwei stärksten elektrostatischen Wechselwirkungskräfte dargestellt.

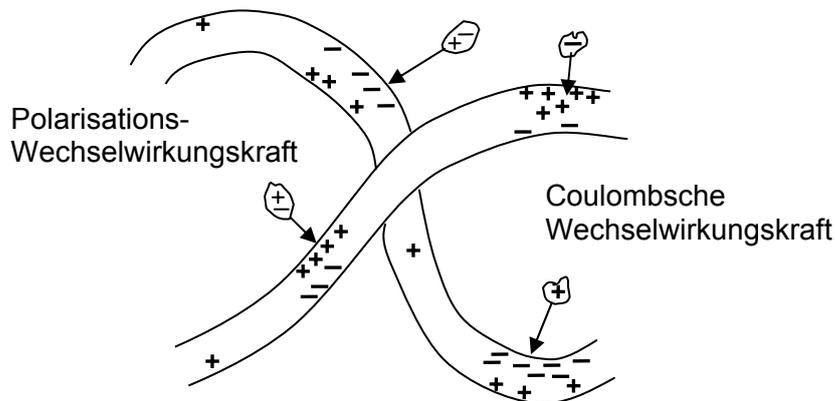


Abbildung 6-1: verschiedene elektrostatische Wechselwirkungskräfte zwischen Partikeln und Filtermittelfasern, nach [7]

Die größte anziehende Kraftwirkung besteht zwischen Teilchen und Faserbereichen die Ladungen unterschiedlichen Vorzeichens aufweisen. Man spricht von Coulombschen Wechselwirkungen (Abbildung 6-1 rechts). Ist nur das Fasermaterial geladen, kann es durch das elektrostatische Feld der geladenen Bereiche zu einer Verschiebungspolarisation an den Staubpartikeln kommen. Dabei entstehen ebenfalls attraktive Wechselwirkungskräfte, die jedoch um eine Größenordnung geringer als die Coulombschen Wechselwirkungskräfte sind (Abbildung 6-1 links). Für eine genaue Beschreibung der elektrostatischen Wechselwirkungskräfte sei auf die Literatur verwiesen [1, 38].

## 6.2 Bestimmung des Ladungszustandes von Abreinigungsfiltermedien

Für die in der gegenständlichen Forschungsarbeit durchgeführten Untersuchungen wurde ein Messverfahren zur Bestimmung der lokalen Nettoladung von Einzelfasern gewählt. Der Aufbau des Messverfahrens ist schematisch in Abbildung 6-2 dargestellt. Das Prinzip des Messverfahrens wurde von Baumgartner et al [25, 39] vorgestellt und soll im Folgenden als Kondensatormessmethode bezeichnet werden.

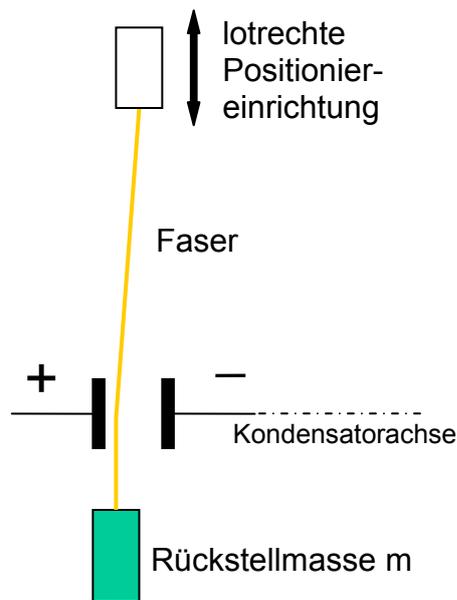


Abbildung 6-2: Prinzip der Kondensatormessmethode

Wie aus Abbildung 6-2 ersichtlich, wird eine Einzelfaser von mehreren Zentimetern Länge mit einer Rückstellmasse  $m$  versehen und zwischen den Platten eines miniaturisierten Plattenkondensators positioniert. Beim Anlegen einer Spannung an die Kondensatorplatten wird die geladene Faser aus ihrer Ruhelage um die Strecke  $\delta$  ausgelenkt (siehe Abbildung 6-3 unten). Mittels eines Mikroskops, das mit einem geeichten Okularmaßstab ausgerüstet ist, misst man die Faserauslenkung  $\delta$  aus der Ruhelage. Aus der Faserauslenkung kann die lokale Überschussladung des Faserabschnittes berechnet werden. Der Feintrieb erlaubt es den Aufhängepunkt relativ zu den Kondensatorplatten zu verschieben, sodass die Faser nahezu auf ihrer gesamten Länge auf Überschussladungen hin untersucht werden kann.

In Abbildung 6-3 sind die auf die Faser wirkenden Kräfte, die Gewichtskraft  $F_G$ , die elektrostatische Feldkraft  $F_E$  und die Einspannkraft  $F_S$ , die unter Vernachlässigung der Fasermasse gleich der Gewichtskraft  $F_G$  der Rückstellmasse  $m$  gesetzt werden kann, dargestellt.

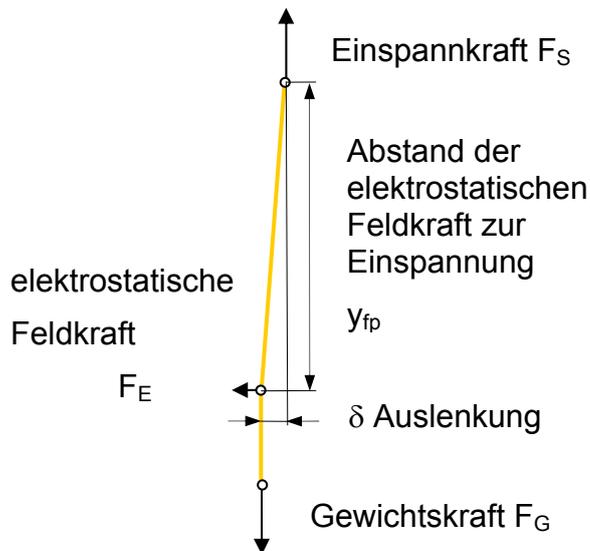


Abbildung 6-3: wirkende Kräfte auf eine geladene Faser im Kondensatorspalt

### Symbolik

$F_G$	Gewichtskraft der Rückstellmasse [N]
$F_S$	Einspannkraft an Faseraufhängung [N]
$F_E$	resultierende elektrostatische Feldkraft [N]
$y_{fp}$	Abstand der resultierenden Feldkraft zur Einspannung [m]
$\delta$	Auslenkung aus Ruhelage [m]

Für die Gewichtskraft folgt

$$F_G = m \cdot g \approx F_S \quad (6-1)$$

$m$	Rückstellmasse des Faserpendels [kg]
$g$	Erdbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]

Nach Anlegen einer Potentialdifferenz an die Kondensatorplatten baut sich ein annähernd homogenes elektrostatisches Feld mit der elektrostatischen Feldstärke  $E$  zwischen den Kondensatorplatten auf.

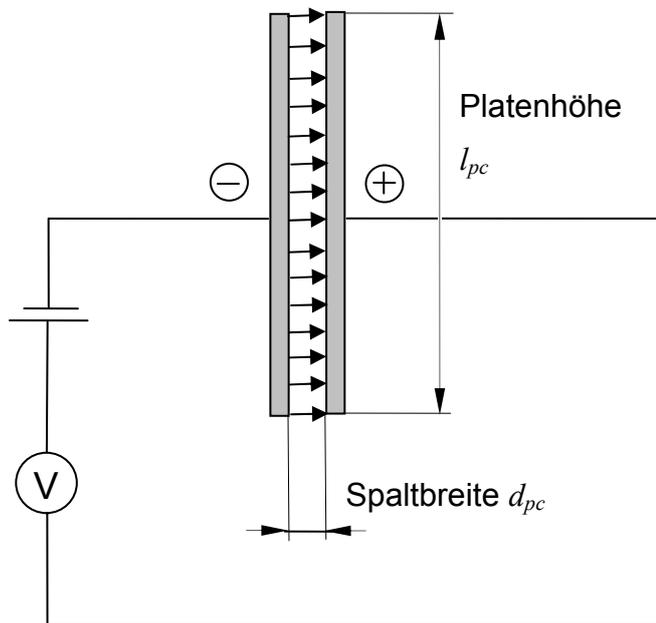


Abbildung 6-4: homogenes elektrostatisches Feld in einem Plattenkondensator

### Symbolik

$d_{pc}$  Spaltbreite des Kondensators [m]

$l_{pc}$  Plattenhöhe des Kondensators [m]

Für die Plattenkondensatoranordnung ergibt sich die Feldstärke  $E$  aus dem Quotienten der angelegten Spannung  $U$  und der Spaltbreite des Kondensators  $d_{pc}$ .

$$E = \frac{U}{d_{pc}} \quad (6-2)$$

$E$  Feldstärke im Spalt eines Plattenkondensators [V/m]

$U$  angelegte Spannung [V]

$d_{pc}$  Spaltbreite Kondensator [m]

Für die Kraftwirkung auf einen geladenen Faserabschnitt mit der mittleren Linienladungsdichte  $q_f$  im Spalt eines Kondensators mit der Plattenhöhe  $l_{pc}$  folgt:

$$F_E = Q \cdot E = l_{pc} \cdot q_f \cdot E \quad (6-3)$$

## Einfluss elektrostatischer Ladungen auf das Filtrationsverhalten von Abreinigungsfiltermedien

---

$F_E$	elektrostatische Feldkraft [N]
$Q$	Nettoladungsmenge des Faserabschnittes im Kondensatorspalt [C]
$E$	Feldstärke im Spalt eines Plattenkondensators [V/m]
$l_{pc}$	Plattenhöhe des Kondensators [m]
$q_f$	mittlere Linienladungsdichte der Faser im Bereich des Kondensatorspaltes [C/m]

Mit der Aufstellung eines Momentengleichgewichts um den Aufhängepunkt ergibt sich für die wirkende elektrostatische Kraft:

$$F_G \cdot \delta - F_E \cdot y_{fp} = 0 \quad \Rightarrow \quad F_E = F_G \frac{\delta}{y_{fp}} \quad (6-4)$$

$F_G$	Gewichtskraft der Rückstellmasse [N]
$\delta$	Auslenkung aus Ruhelage [m]
$F_E$	elektrostatische Feldkraft [N]
$y_{fp}$	Abstand der resultierenden Feldkraft zur Einspannung [m]

Durch Einsetzen der Gleichungen (6-1), (6-2) und (6-3) in Gleichung (6-4) und Umformen der Gleichung nach  $q_f$  ergibt sich für die mittlere Linienladungsdichte der Faser im Bereich des Kondensatorspaltes  $q_f$ :

$$l_{pc} \cdot q_f \cdot \frac{U}{d_{pc}} = m \cdot g \frac{\delta}{y_{fp}} \quad \Rightarrow \quad q_f = \frac{m \cdot g \cdot d_{pc}}{U \cdot l_{pc}} \frac{\delta}{y_{fp}} \quad (6-5)$$

$l_{pc}$	Plattenhöhe des Kondensators [m]
$q_f$	mittlere Linienladungsdichte der Faser im Bereich des Kondensatorspaltes [C/m]
$U$	angelegte Spannung [V]
$d_{pc}$	Spaltbreite Kondensator [m]
$m$	Rückstellmasse des Faserpendels [kg]
$g$	Erdbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]
$\delta$	Auslenkung aus Ruhelage [m]
$y_{fp}$	Abstand der resultierenden Feldkraft zur Einspannung [m]

Die lokale Auflösung der Messeinrichtung ist durch die Plattenhöhe des Kondensators begrenzt. Unter der lokalen Auflösung der Messanordnung ist die Zuordenbarkeit einer gemessenen Ladungsmenge zu einem Faserabschnitt der Kondensatorplattenhöhe zu verstehen. Höhere Auflösungen können durch den Einsatz eines Drahtkondensators erhalten werden. Für die Herleitung der Auswertgleichungen einer Drahtkondensatormessanordnung sei auf [22] verwiesen.

### Linienladungsdichteverteilung

Zur Beschreibung des Ladungszustandes eines Filtermediums kann die Verteilung der gemessenen Linienladungen  $q_0(q_f)$  bestimmt werden.

$$q_0(q_f) = \frac{\Delta N_i(q_f)}{N_{tot} \cdot \Delta q_f} \quad (6-6)$$

$q_0(q_f)$	<i>Linienladungsdichteverteilung [m/C]</i>
$N_{tot}$	<i>Gesamtanzahl der vermessenen Faserabschnitte [-]</i>
$\Delta N_i(q_f)$	<i>Anzahl der gemessenen Ladungen im Bereich von <math>\Delta q_f</math> [-]</i>
$\Delta q_f$	<i>Intervallbreite [C/m]</i>

In Abbildung 6-5 ist ein Beispiel für eine Linienladungsdichteverteilung eines mittels Koronaentladung aufgeladenen Filtermediums angegeben.

Es zeigt sich, dass das Fasermaterial aus dem das Filtermedium aufgebaut ist, nicht eine einheitliche Ladung trägt. Es finden sich verschieden stark negativ sowie positiv geladene Faserabschnitte. Je breiter der Kurvenzug ist, desto stärker unterschiedlich elektrostatische aufgeladene Faserabschnitte liegen vor.

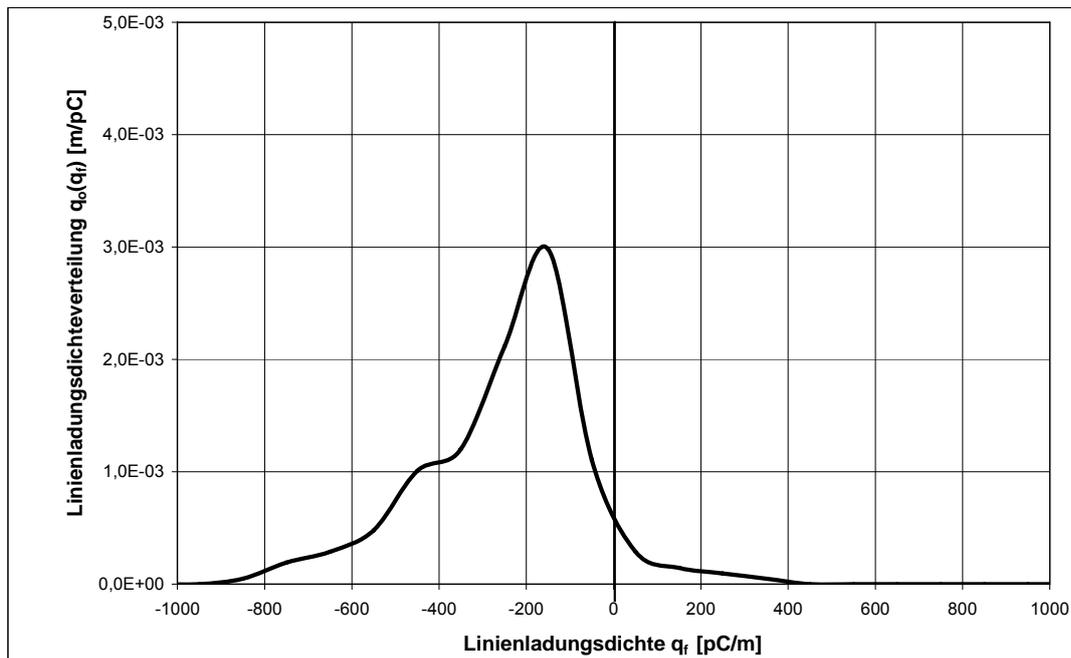


Abbildung 6-5: Linienladungsdichteverteilung eines mittels Koronaentladung aufgeladenen Filtermediums

Es ist nun von Interesse, wie elektrostatisch geladene Faserabschnitte das Betriebsverhalten von Abreinigungsfiltermedien, hinsichtlich Staubeinlagerungsverhalten, sich einstellender mittlerer Reingasstaubkonzentration sowie Restdruckverlustentwicklung, beeinflussen.

Um den Einfluss elektrostatischer Ladungen auf Abreinigungsfiltermedien untersuchen zu können, sollen Nadelfilze mittels negativer Koronaentladung in ihren Ladungszuständen verändert werden. Der Ladeerfolg soll mit Hilfe der in diesem Kapitel vorgestellten Kondensatormessmethode nachgewiesen werden. Schließlich soll in Filtrationsversuchen an einem Filtermittelprüfstand nach VDI 3926 Typ 2 geladene Filtermedien mit ungeladenen Filtermedien mit Bezug auf das Staubeinlagerungsverhalten, den sich entwickelnden Restdruckverlust und der sich einstellenden Reingasstaubkonzentration einem wertenden Vergleich unterzogen werden.

### 6.3 Veränderung des Ladungszustandes von Nadelfilzen mittels negativer Koronaentladung

#### Auflademethode

Zur experimentellen Veränderung des Ladungszustandes von Nadelfilzen wurde eine Aufladeapparatur entwickelt (siehe Abbildung 6-6).

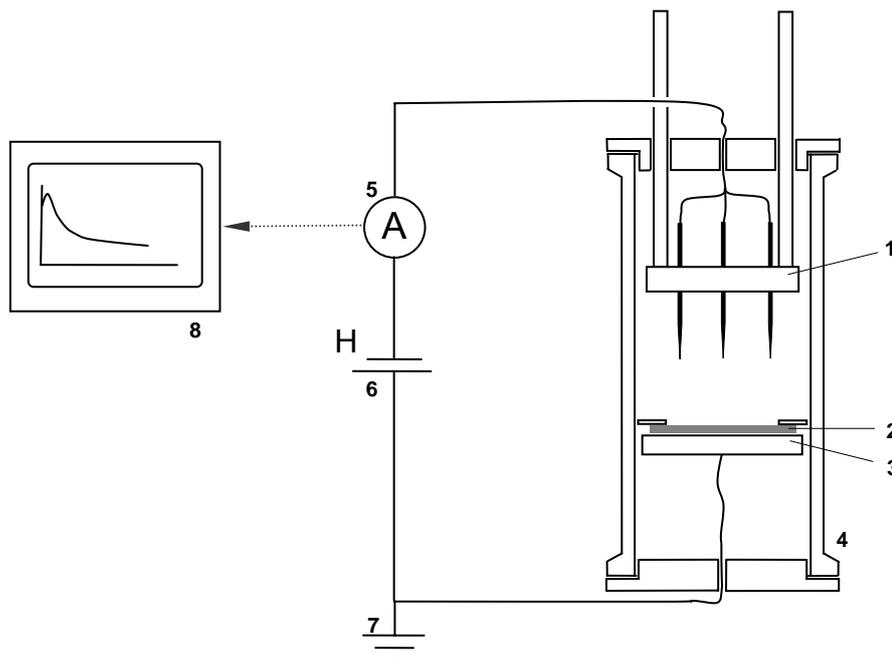


Abbildung 6-6: Konstruktion und Versuchsaufbau der eingesetzten Aufladeapparatur:  
1 höhenverstellbare Sprühelektroden, 2 Filtermedium, 3 geerdete Grundplatte, 4 Glas-  
zylinder, 5 Amperemeter, 6 Hochspannungsgenerator, 7 Erdung, 8 Koronastrommonitor

Das zu ladende Filtermedium ist auf einer geerdeten Niederschlagselektrode platziert. Über dem Filtermedium befinden sich die Sprühelektroden. Eine spezielle Elektrodenhalterung ermöglicht es die Anzahl (1, 3, 7 oder 19) der Elektrodenspitzen zu variieren. Weiters ist es möglich den Abstand zwischen den Sprühelektroden und der geerdeten Gegenelektrode einzustellen.

In Tabelle 6-1 (nächste Seite) sind die verwendeten Ladeparameter angeführt.

Filtermedien (FM)	PPS, PI und PES Nadelfilze
FM- Rondendurchmesser	165 mm
Anzahl Sprühelektroden	1, 3, 7 oder 19
Elektrodenabstand	25, 50 oder 75 mm
angelegte Spannung	10, 20 oder 30 kV
Nennleistung Hochspannungsgenerator	6 W

Tabelle 6-1: Ladeparameter

In Vorversuchen wurden die Ladeparameter hinsichtlich einer maximalen Aufladung der Filtermedien bewertet. Bei einer Anordnung mit sieben bzw. mit drei Sprühelektroden konnten maximale Veränderungen im Ladezustand der Filtermedien erzielt werden. Als Elektrodenabstand wurden 75 mm gewählt und die Sprühelektroden auf minus 30 kV gesetzt.

Um den Ladungszustand der geladenen Filtermedien zu erfassen, wurden einzelne Fasern aus den geladenen Filtermedien herauspräpariert und nach der im Kapitel 6.2 beschriebenen Kondensatormessmethode vermessen. Da durch die Faserentnahme die untersuchten Filtermedien beschädigt werden, können diese nicht für Bestäubungsversuche verwendet werden. Um zusätzlich Filtermedien für Bestäubungsversuche zu erhalten und gewährleisten zu können, dass diese den gleichen Ladungszustand wie die beschädigten Filtermedien tragen, wurde während des Ladeprozesses der Koronastrom aufgezeichnet. Durch den Ladeprozess verändert sich das elektrostatische Feld welches das Filtermedium umgibt und infolgedessen verändert sich der Widerstand für den Durchtritt ionisierter Ladungsträger durch das Filtermedium, wodurch sich der Koronastrom ändert. Erhält man vergleichbare Verläufe der Koronaströme kann davon ausgegangen werden, dass auch die geladenen Filtermedien einen ähnlichen Ladungszustand wie die zur Ladungsmessung herangezogenen Filtermedien tragen. Wurden hingegen bei zwei Filtermedien unterschiedliche Verläufe des Koronastromes gemessen, so unterschieden sich auch die Faserladungen von Fasern die aus diesen Filtermedien herauspräpariert und vermessen wurden. Unterschiede im Ladeverhalten von ein und demselben Filtermedium können z.B. durch Unterschiede im Auftragen einer

Ausrüstung liegen. Es zeigt sich ebenfalls ein starker Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf den Ladeerfolg. Um den Einfluss der Luftfeuchtigkeit zu reduzieren, wurde die Aufladeapparatur vor jedem Versuch mit trockener Druckluft gespült. Durch genannte Vorgehensweise konnten Filtermedien aus unterschiedlichen Faserwerkstoffen reproduzierbar geladen werden.

In Abbildung 6-7 sind die charakteristischen Verläufe der Koronaströme für verschiedene Filtermedien, bestehend aus unterschiedlichen Faserwerkstoffen (FM3 Polyimid, FM4 Polyphenylensulfid und FM5 Polyester; Tabelle 5-1 (Seite 43), dargestellt.

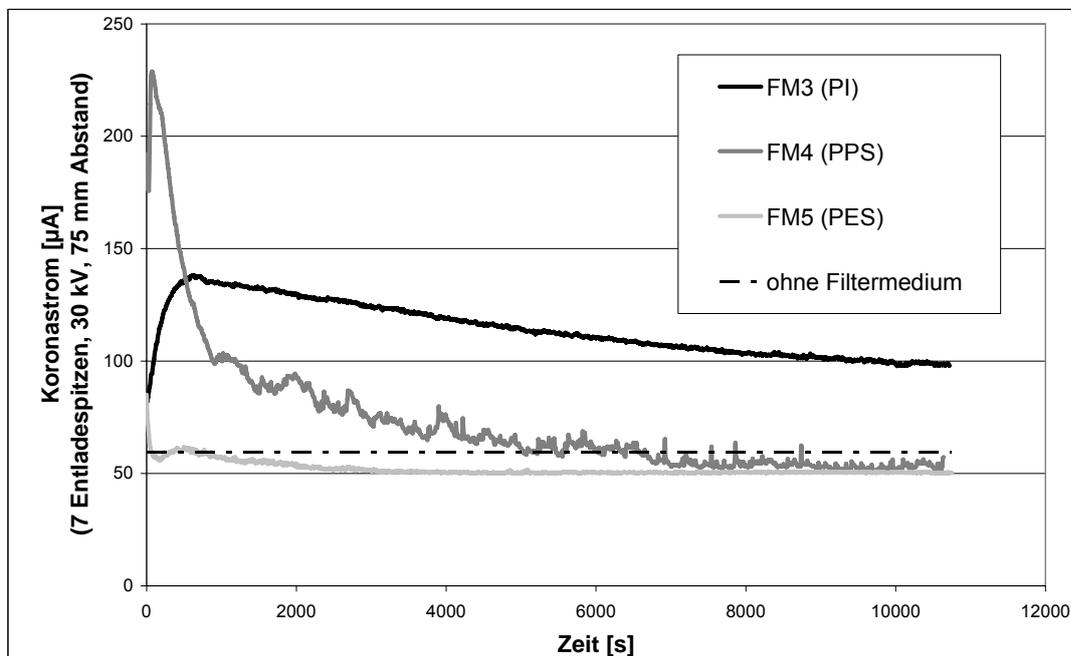


Abbildung 6-7: Verlauf des Koronaströmes während der Aufladung unterschiedlicher Nadelfilze

Als Referenz wurde zusätzlich der sich ohne ein Filtermedium einstellende Koronaström (strichpunktierte Linie) gemessen. Je nach Ladbarkeit des Mediums kommt es bei FM3 und FM4 anfänglich zu einer Erhöhung des Koronaströmes (bis zum Vierfachen des Referenzkoronaströmes ohne Filtermedium). Dieses Verhalten kann durch eine Aufnahme von Ladungsträgern des Fasermaterials erklärt werden. Nach Durchlaufen des maximalen Koronaströmes fällt dieser auf einen stationären Wert ab. Der stationäre Koronaström entspricht dabei einem Gleichgewichtsladungszustand des Fasermaterials bei den gewählten Versuchsbedingungen

(Anzahl Sprühelektroden, Abstand der Spitzen zur Gegenelektrode und angelegte Spannung), d.h. dass alle Fasern gleich viel Ladungsträger aufnehmen wie abgeben. Der höchste Wert für den Koronastrom ergab sich für das Filtermedium bestehend aus Polyphenylensulfid-Fasermaterial (FM4). Gleichfalls zeigte das Polyimid-Filtermedium (FM3) einen erhöhten Koronastrom vergleichsweise zum Polyester-Filtermedium (FM5) bei welchem die geringsten Werte für den Koronastrom gemessen wurden. Die Veränderung in der Koronastromkurve ist auf eine Änderung des Ladezustandes des Filtermediums zurückzuführen. Das bedeutet, dass leicht ladbare Filtermedien (z.B. aus PPS) eine größere Veränderung im Koronastrom zeigen als schlechter ladbare Filtermedien (z.B. aus PES).

### **Ladungsmessmethode**

Nach dem Laden wurde die Auswirkung des Ladeprozesses auf den Faserladungszustand der Filtermedien bewertet. Zu diesem Zweck wurde der Ladungszustand von einzelnen aus den geladenen Filtermedien herauspräparierten Fasern mit dem Ladungszustand von Fasern aus nicht aufgeladenen Filtermittelfasern verglichen. Die Ladungsmessungen wurden mit Hilfe der im Kapitel 6.2 *Bestimmung des Ladungszustandes von Abreinigungsfiltermedien* vorgestellten Kondensatormessmethode durchgeführt.

In Abbildung 6-8 (nächste Seite) ist die Faserladungsmesseinrichtung schematisch dargestellt. Für die Ladungsmessungen wurden je 10 Einzelfasern mit einer Länge von ca. 50 mm jedem Filtermedium entnommen. Konnten aus Filtermedien keine entsprechend langen Fasern herauspräpariert werden, so wurden diese durch Aneinanderkleben von einzelnen kürzeren Faserbruchstücken verlängert. Danach wurde an das Ende jeder Faser eine kleine Rückstellmasse befestigt, wodurch man ein Faserpendel erhielt. Dieses Faserpendel wurde in den Spalt eines miniaturisierten Plattenkondensators gehängt. Durch die Höhe (3 mm) der Kondensatorplatten wird die Auflösung der Messanordnung vorgegeben. Wird nun Hochspannung an die Kondensatorplatten gelegt, erfährt das Faserpendel in Abhängigkeit seines lokalen Ladungszustandes eine Auslenkung.

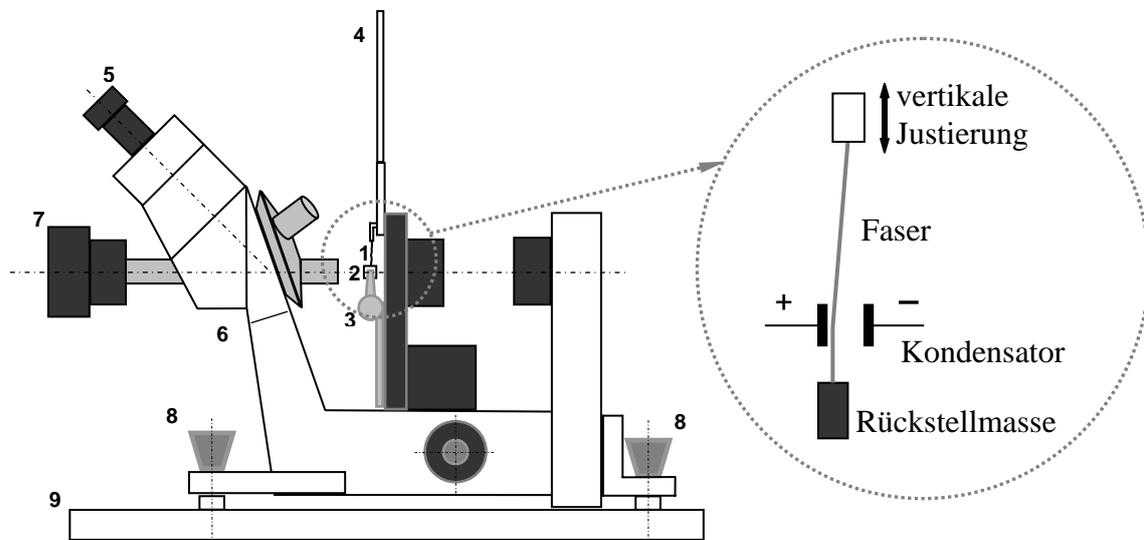


Abbildung 6-8: Messeinrichtung für Faserladungen (schematisch) 1 Faser, 2 Kondensator, 3 Kondensatorplattenjustierschrauben, 4 Vertikalverstelleinrichtung, 5 Okular, 6 Mikroskop, 7 Kamera, 8 Justierschrauben für waagrechte Positionierung, 9 Grundplatte

Die gemessene Ladungsmenge wird auf den Faserabschnitt, der zwischen den Kondensatorplatten liegt (Länge 3 mm), bezogen. Dadurch erhält man die lokale Linienladungsdichte des Faserabschnittes in Ladung pro Faserlänge in [pC/m]. Um die elektrostatischen Ladungen entlang einer Faser zu messen, wurde die vertikale Position der Faser im Kondensatorspalt verstellt. Die Schrittweite wird mit 2 mm kleiner als die Auflösung der Messanordnung (3 mm Kondensatorplattenhöhe) gewählt, um eine überlappende Vermessung der Faser zu erhalten.

## Ergebnisse

In Abbildung 6-9 ist exemplarisch das Ergebnis einer Ladungsmessung für eine Filtermittelfaser angegeben. Es zeigt sich, dass die vermessene Faser keinen einheitlichen Ladungszustand  $q_f$  über ihre Länge aufweist. Es können sich somit auf einer Einzelfaser positiv und negativ geladene Abschnitte befinden. Je größer demnach die Plattenhöhe der Messanordnung gewählt wird, desto eher können sich positiv und negativ geladene Bereiche innerhalb der Messzone befinden und dadurch ihren Messeffekt kompensieren.

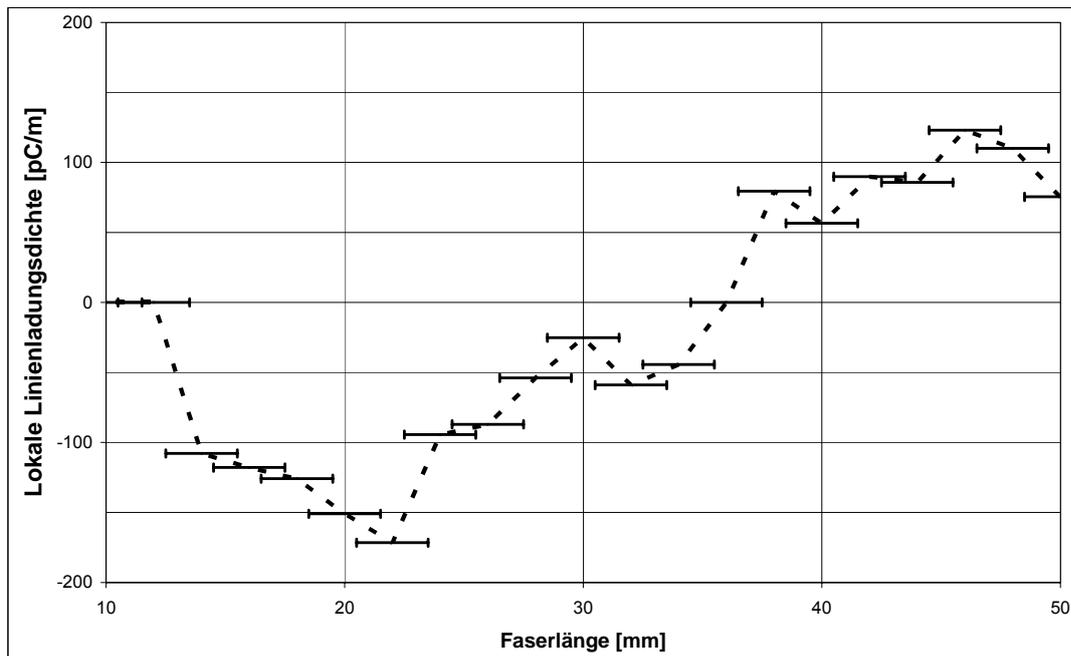


Abbildung 6-9: lokale Linienladungsdichte entlang einer vermessenen Einzelfaser

Man erhält somit einen Mittelwert für die Ladung im gemessenen Faserabschnitt. Ein ganzes Filtermedium kann demzufolge nach außen hin elektrostatisch neutral erscheinen, obwohl stark unterschiedlich geladene Faserabschnitte vorliegen. Dadurch ist auch die Stabilität elektrostatisch geladener Filtermedien erklärbar. Neben der notwendigen Bedingung, dass das Fasermaterial ein Isolator ist, können sich durch die Wirrlage der Filtermittelfasern in einem solchen Filtermedium unterschiedlich geladene Faserabschnitte (auch unterschiedlicher Fasern) gegenseitig stabilisieren.

Wird die Größe der Kondensatorelemente reduziert, erhöht sich die Auflösung der Messanordnung. Es kommt jedoch zu einem gleichzeitigen Rückgang der Messempfindlichkeit da sich auch die Anzahl von Ladungsträgern und somit ihr Messeffekt bei kleineren Kondensatorelementen verringert.

Um geladene Filtermedien mit Filtermedien im Originalzustand besser vergleichen zu können, wird nach Gleichung (6-6) (Seite 63) die Linienladungsdichteverteilung  $q_o(q_f)$  für alle 10 gemessenen Fasern einer Probe bestimmt.

In Abbildung 6-10 ist die Linienladungsdichteverteilung eines geladenen Filtermediums (FM4 PPS/PPS aufgeladen) im Vergleich zum Filtermedium im Ausgangsladungszustand (FM4 PPS/PPS original) dargestellt.

Das Filtermedium im Ausgangsladungszustand (FM4 PPS/PPS original) besteht aus Fasern welche positiv und negativ geladene Faserabschnitte besitzen. Es zeigt sich, dass durch den Ladeprozess mehr negativ geladene Faserabschnitte generiert werden. Als Konsequenz verschiebt sich die Linienladungsdichteverteilung in den Bereich negativerer Ladungen (FM4 PPS/PPS aufgeladen). Dabei gehen ein Teil der im Originalzustand positiv geladenen Faserabschnitte verloren.

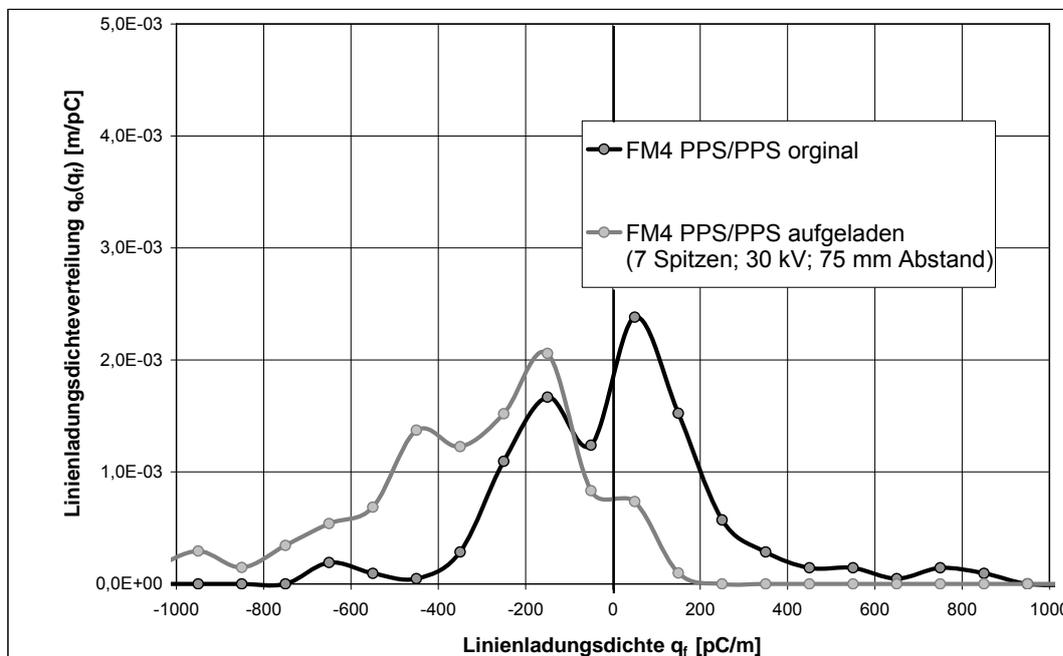


Abbildung 6-10: Linienladungsdichteverteilung eines geladenen Filtermediums und eines Filtermediums im Ausgangsladungszustand (FM4 PPS/PPS)

Es kommt somit neben einer teilweisen Kompensation positiv geladener Faserbereiche auch zu einer massiven negativen Aufladung einzelner Faserabschnitte. Durch die Isolatoreigenschaften des Faserwerkstoffes bleibt die Veränderung in der Ladungsverteilung auch nach dem Ladeprozess erhalten.

Ähnliche Ergebnisse wurden für das Filtermedium FM2 (PPS/GF) erhalten. Für die Filtermedien bestehend aus Polyimid Fasern (FM1 PI/GF, FM3 PI/PI) wurden auch eine leichte Verschiebung hin zu negativeren Linienladungsdichten gefunden. Das Polyesterfiltermedium (FM5 PES/PES) zeigte hingegen keine wesentliche

Veränderung in seiner Linienladungsdichteverteilung. Die schlechte Ladbarkeit des Polyesterfiltermediums kann neben dem Faserwerkstoff auch in Verunreinigungen, welche die Fasern oberflächlich leitfähiger machen, begründet sein.

#### 6.4 Einfluss eines erhöhten Ladungszustandes auf das Betriebsverhalten von Abreinigungsfiltermedien

In Filtermitteltests in Anlehnung an die VDI Richtlinie 3926 soll der Einfluss eines erhöhten Faserladungszustandes auf das Filtrationsverhalten von geladenen Filtermedien im Vergleich zu Medien im Ausgangsladungszustand bewertet werden. Dazu sollen das Restdruckverlustverhalten, die Reststaubmassen sowie die mittleren Reingasstaubkonzentrationen verglichen werden.

Die Ergebnisse aus den Bestäubungsversuchen sind in Tabelle 6-2 zusammengefasst.

Filtermedium	Zahl Elektroden [-]	Veränderung im Koronastrom [-]	Reststaubmasse [g/m <sup>2</sup> ]	Restdruckverlust nach 100 Zyklen [mbar]	mittl. Reingaskonz. über 100 Zyklen [mg/m <sup>3</sup> ]	mittl. Linienladungsdichte [pC/m]
FM4 PPS/PPS	Originalladungszustand		67,8	2,55	<b>3,0</b>	<b>10</b>
	7 Spitzen	hoch	68,4	2,55	<b>1,0</b>	<b>-368</b>
	3 Spitzen	sehr hoch	68,4	2,60	<b>0,5</b>	<b>-261</b>
FM2 PPS/GF	Originalladungszustand		65,7	3,1	<b>2,0</b>	<b>-158</b>
	3 Spitzen	sehr hoch	67,8	3,0	<b>0,3</b>	<b>-255</b>

Tabelle 6-2: Ergebnisse zu den Filtermitteltests geladener Filtermedien

Unter den gewählten Prüfbedingungen (Tabelle 5-3; Seite 48) zeigten die Versuche einen Zusammenhang zwischen der mittleren Linienladungsdichte und der Reingasstaubkonzentration. Wird die mittlere Linienladungsdichte in Richtung starker negativer Ladungen hin verschoben, so sinkt der Reingasstaubgehalt. Die Partikelpenetration durch das Filtermedium wird reduziert.

Andererseits zeigte sich, dass unter den gewählten Prüfbedingungen ein erhöhter Ladungszustand sich nicht maßgeblich auf das Verstopfungsverhalten der

Filtermedien auswirkt. Es liegen die Werte für die Reststaubmassen für geladene Filtermittel im gleichen Größenbereich wie bei den Medien im Ausgangszustand. Des Weiteren ergeben sich nahezu deckungsgleiche Verläufe der Druckverlustkurven und somit vergleichbare Werte für den Restdruckverlust nach der 100. Abreinigung.

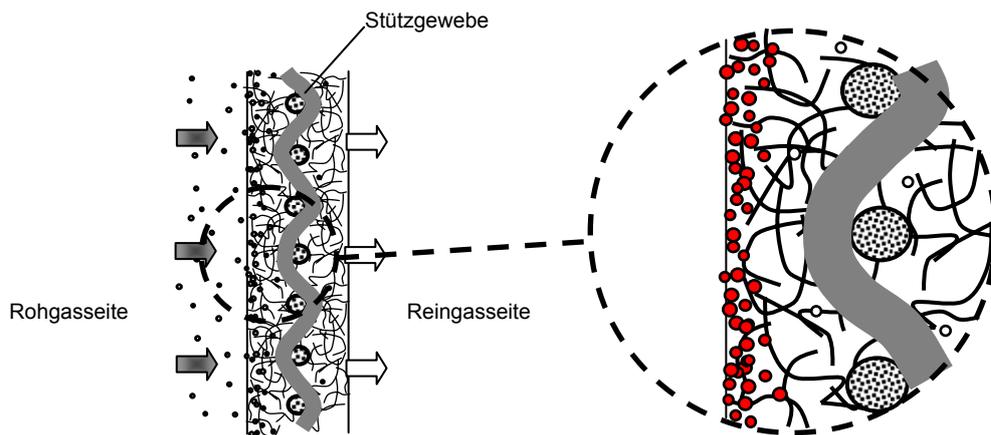


Abbildung 6-11: Staubeinlagerung in ein Oberflächenfiltermedium

Das Filtrationsverhalten elektrostatisch aufgeladener Filtermedien bezüglich Restdruckverlustentwicklung, Staubeinlagerung und Reingasstaubkonzentrationsentwicklung, kann folgend erklärt werden. Zu Filtrationsbeginn werden Partikel aufgrund verstärkter elektrostatischer Wechselwirkung mit dem Fasermaterial besser abgeschieden. Die Fasern nahe der Filtermitteloberfläche werden durch die Staubabscheidung von Staubpartikeln umhüllt (siehe Abbildung 6-11). Dabei werden sich bevorzugt Partikel in der Weise abscheiden, dass es zu einer lokalen Kompensation der Ladungen des Fasermaterials durch Anlagerung von elektrostatisch entgegengesetzt geladenen Partikeln kommt. Selbst bei einem nicht vollständigen Ausgleich der Faserladungen werden diese durch das abgeschiedene Partikelmaterial abgeschirmt. Einen ähnlichen Effekt beschreiben Walsh et al [27] bei Elektret-Tiefenfiltermedien. Es zeigte sich, dass eine relativ geringe Menge an eingelagertem Staub ausreichte, um den elektrostatischen Effekt des Fasermaterials zu egalisieren. Die weitere Partikeleinlagerung erfolgt aus diesem Grund ähnlich einer Staubeinlagerung in einer nicht aufgeladenen Faserschicht.

Für den Staub im Reingas sind hingegen jene Partikel, welche die Staubeinlagerungsschicht passieren, verantwortlich. Die Staubmenge, die bei einem qualitativ

hochwertigen Nadelfilz ins Reingas gelangt, ist im Vergleich zur abgeschiedenen bzw. in oberflächennahen Faserschichten eingelagerten Staubmasse verschwindend klein. Dabei können Partikel entweder direkt durch Lücken in der Staubeinlagerungsschicht ins Reingas gelangen oder bereits abgeschiedene Partikel sich erneut von der Kollektoroberfläche lösen und entweder in tiefer liegenden Faserschichten durch Tiefenfiltrationsmechanismen abgeschieden werden oder das Filtermedium passieren.

Durch den Ladeprozess werden auch tiefer liegende Faserschichten geladen und können als nachgeschaltetes Tiefenfiltermedium wirken.

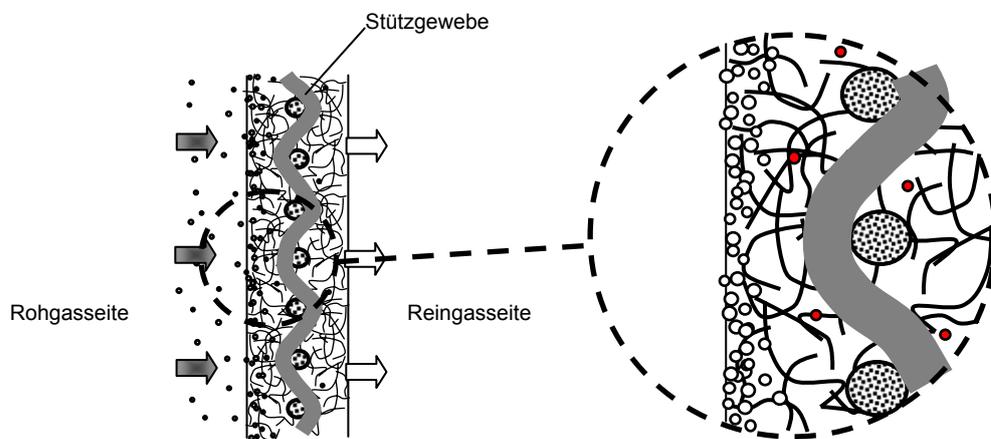


Abbildung 6-12: Partikelabscheidung unterhalb der Staubeinlagerungsschicht

Da die Ladungen unterhalb der Staubeinlagerungsschicht weder kompensiert noch durch abgeschiedenes Partikelmaterial abgeschirmt sind, werden jene Staubteilchen, welche die Staubeinlagerungsschicht passieren, verstärkt durch elektrostatische Effekte abgeschieden. Die Reduktion in der mittleren Reingasstaubkonzentration bei den geladenen Filtermedien ist somit auf eine elektrostatisch verstärkte Tiefenfiltration tiefer liegender Faserschichten des Filtermediums zurückzuführen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine Erhöhung des Ladungszustandes des Fasermaterials sich positiv auf den Reingasgehalt auswirken kann. Es gilt abzuklären inwieweit eine solche elektrostatische Unterstützung der Partikelabscheidung nach längerem industriellen Einsatz der Filtermedien von Dauer ist. Ein erhöhter Faserladungszustand zeigte unter den gewählten Versuchs-

bedingungen keinen wesentlichen Einfluss auf das Verstopfungsverhalten der Filtermedien. Es ist jedoch möglich, dass sich bei völlig entladem Fasermaterial und hoher Porosität des Filtermediums keine stabile Staubeinlagerungsschicht ausbilden kann, wodurch es zu einem Durchwandern von Staub kommen kann. Neben dem verstärkten Eindringen von Staub in das Filtermedium und damit erhöhten Restdruckverlusten wären entsprechend hohe Reingasstaubkonzentrationen die Folge. Um die Ausbildung einer dünnen, stabilen Staubeinlagerungsschicht zu begünstigen, scheint der Einsatz von leicht geladenem Fasermaterial als sinnvoll. Für solche Filtermedien könnten bevorzugt leicht ladbare Faserwerkstoffen wie Polyphenylensulfid und Polyimid Einsatz finden.

## **7 Einfluss multilobaler Faserquerschnittsformen auf die Struktur und das Filtrationsverhalten von Abreinigungsfiltermedien**

Als zusätzlichen Einflussparameter der Filtermittelfasern auf das Filtrationsverhalten von Abreinigungsfiltern ist neben dem Faserladungszustand, die Faserquerschnittsform zu nennen. In diesem Kapitel soll zunächst die Entstehung multilobaler Faserquerschnittsformen beschrieben sowie Beispiele für multilobale Faserquerschnittsformen gegeben werden.

Es soll aufgezeigt werden, wie sich die Faserquerschnittsform auf den strukturellen Aufbau eines Nadelfilzes auswirkt.

Mit Hilfe von Strömungssimulationen sollen die Unterschiede im Umströmungsfeld multilobaler Fasern im Vergleich zu Fasern mit Kreisquerschnitten visualisiert und diskutiert werden. Des Weiteren sollen mittels 2D-Simulationen das Durchströmungsverhalten verschieden verdichteter Schichten aus multilobalem Fasermaterial mit Schichten aus Fasern mit kreisrundem Querschnitt verglichen werden.

In Filtrationsversuchen nach VDI 3926 soll das Staubeinlagerungsverhalten von Nadelfilzen bestehend aus Faser kreisrunden Querschnitts mit Fasern multilobalen Querschnitts verglichen werden.

Abschließend sollen in Tiefenfiltrationsversuch die Auswirkungen der sich ergebenden Strukturen der Filtermedien auf das Partikelabscheideverhalten untersucht werden.

### **7.1 Entstehung multilobaler Faserquerschnittsformen**

Multilobale Faserquerschnittsformen entstehen u.a. beim Produktionsprozess von Polyimidfasern. Polyimidfasermaterial wird durch seine hohe Temperaturbeständigkeit (bis 260°C) bevorzugt für die Heißgasfiltration eingesetzt. Die hohe Temperaturbeständigkeit des Fasermaterials ist auf seine chemische Struktur zurückzuführen (Abbildung 7-1).

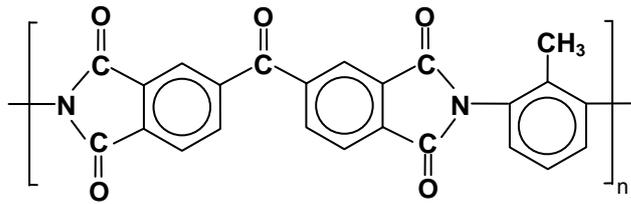


Abbildung 7-1: chemische Struktur von Polyimid [40]

Da Polyimid nicht schmelzbar ist, werden Polyimidfasern in einem Lösemittelspinnverfahren hergestellt. Dazu wird eine Polymer-Lösung versponnen. Die Faserquerschnitte sind unmittelbar nach der Spinndüse kreisförmig. Erst während des Trocknens in einem beheizten Spinnsticht bilden sich durch Schrumpfen der Fasern (mehrfach) gelappte Faserquerschnitte aus (siehe Abbildung 7-2 und Abbildung 7-3). Man spricht von multilobalen Faserquerschnittsformen.

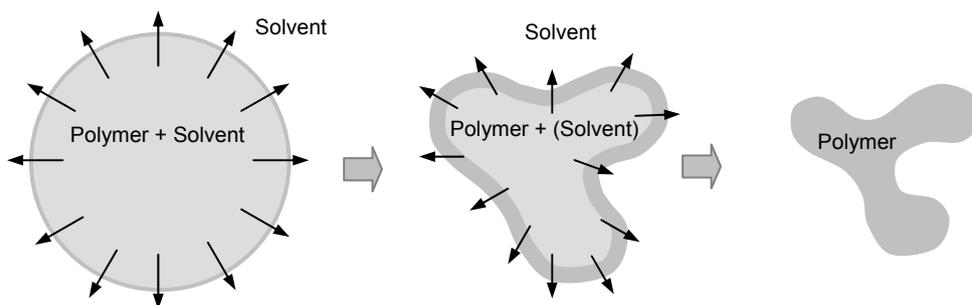


Abbildung 7-2: Entstehung eines multilobalen Faserquerschnittes

Weitere Beispiele für multilobaler Querschnittsformen finden sich in Abbildung 7-3.



Abbildung 7-3: Querschnittsformen multilobaler Polyimid-Fasern

REM- Aufnahme von Polyimid-Faserenden (links); lichtmikroskopische Aufnahme eines Schliffbildes von eingebetteten Polyimid-Fasern (rechts) [41]

Es ist nun von Interesse, welchen Einfluss multilobale Faserquerschnitte im Vergleich zu einem runden Faserquerschnitt auf die sich ergebenden Filzstrukturen und infolge auf das Staubfiltrationsverhalten von Nadelfilzen haben.

## 7.2 Einfluss der Faserquerschnittsform auf den Aufbau eines Nadelfilzes

Ein Nadelfilz ist ein dreidimensionales Gebilde, bestehend aus vielen ineinander verschlungenen Einzelfasern. Dabei berühren sich die den Nadelfilz aufbauenden Fasern in einzelnen Punkten. Es soll nun geometrisch bestimmt werden inwieweit sich zwei Fasern, ohne deformiert zu werden, annähern können. Als Maß des Abstandes von zwei sich kreuzenden Fasern soll der Abstand  $l$  der Mittellinien der Fasern herangezogen werden. Bei asymmetrischen Querschnittsformen wird die Schwerlinie der Faser als Mittellinie definiert.

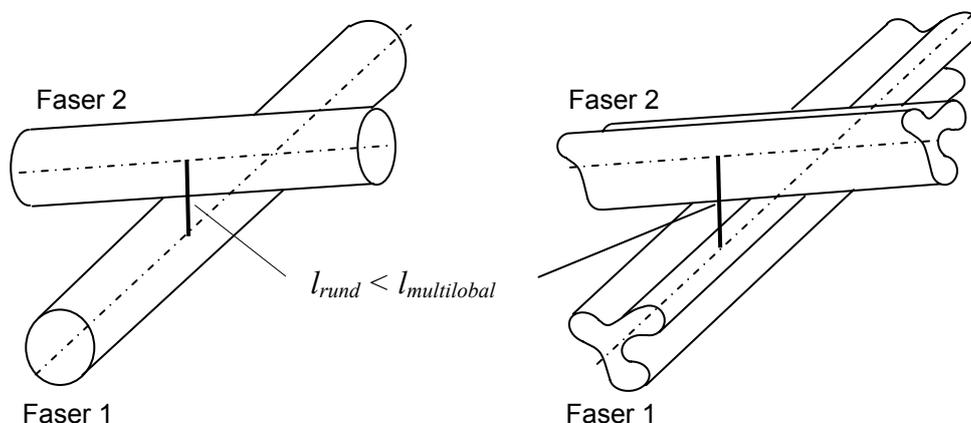


Abbildung 7-4: sich kreuzende Fasern; mit Kreisquerschnitt (links); mit multilobalen Querschnitt (rechts)

In Abbildung 7-4 sind sich kreuzende Fasern kreisrunden Querschnitts im Vergleich zu zwei multilobalen Fasern samt ihren Mittellinien dargestellt. Der Abstand  $l$  der Mittellinien im Berührungspunkt zweier Fasern kann dabei in einen Beitrag von Faser 1 mit  $d_{\text{Faser1}}/2$  und einen Beitrag von Faser 2 mit  $d_{\text{Faser2}}/2$  aufgeteilt werden.

Für sich berührende Fasern kreisrunden Querschnitts ergibt sich der Abstand  $l$  somit als Summe der Radien der beiden kreisförmigen Faserquerschnitte.

$$l = \frac{d_{Faser1}}{2} + \frac{d_{Faser2}}{2} \quad (7-1)$$

$d_{Faser1}$  Durchmesser der Faser 1 [ $\mu\text{m}$ ]

$d_{Faser2}$  Durchmesser der Faser 2 [ $\mu\text{m}$ ]

$l$  Abstand der Mittellinien im Berührungspunkt [ $\mu\text{m}$ ]

Dreht man eine multilobale Faser um ihre Mittellinie ergeben sich je nach Drehwinkel für eine feste Blickrichtung unterschiedliche Faserdurchmesser. Aus diesem Grund muss zur Bestimmung des Abstandes der Mittellinien von zwei sich berührenden multilobal geformten Fasern zusätzlich der Drehwinkel der Fasern in Faserlängsrichtung berücksichtigt werden. Der für den Abstand maßgebliche Durchmesser von Faser 1 entspricht dabei dem projizierten Faserdurchmesser der Faser 1 in Richtung der Mittellinie von Faser 2 (siehe Abbildung 7-5).

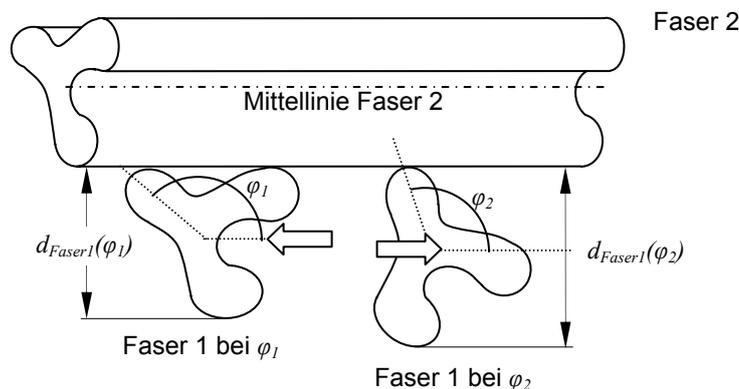


Abbildung 7-5: projizierte Faserdurchmesser für zwei verschiedene Drehwinkel

### Symbolik

$\varphi_1, \varphi_2$  Drehwinkel der Faser [rad]

$d_{Faser1}(\varphi_1)$  projizierter Faserdurchmesser (in Richtung Faser 2) bei Drehwinkel  $\varphi_1$  [ $\mu\text{m}$ ]

$d_{Faser2}(\varphi_2)$  projizierter Faserdurchmesser (in Richtung Faser 1) bei Drehwinkel  $\varphi_2$  [ $\mu\text{m}$ ]

Analog ergibt sich der für die Abstandsberechnung benötigte Durchmesser von Faser 2 aus ihrem projizierten Durchmesser in Richtung Faser 1. Um den mittleren

Beitrag einer Faserform zum Abstand  $l$  berechnen zu können, kann ein mittlerer Faserdurchmesser über alle Blickrichtungen berechnet werden.

Für den mittleren Faserdurchmesser folgt

$$d_{m,Faser} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} d_{Faser}(\varphi) d\varphi \quad (7-2)$$

$d_{Faser}(\varphi)$  projizierter Faserdurchmesser in Abhängigkeit zum Drehwinkel  $\varphi$  der Faser [ $\mu\text{m}$ ]

$d_{m,Faser}$  mittlerer Faserdurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]

$\varphi$  Drehwinkel der Faser [rad]

Für eine graphische Bestimmung des mittleren Faserdurchmessers werden die projizierten Faserdurchmesser für  $N$  Blickrichtungen gemittelt:

$$d_{m,Faser} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{i=N-1} d_{Faser}\left(\varphi = i \frac{\pi}{N}\right) \quad (7-3)$$

$N$  Anzahl der Blickrichtungen [-]

$i$  Laufvariable [-]

$d_{Faser}(\varphi)$  projizierter Faserdurchmesser in Abhängigkeit zum Drehwinkel  $\varphi$  der Faser [ $\mu\text{m}$ ]

$d_{m,Faser}$  mittlerer Faserdurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]

$\varphi$  Drehwinkel der Faser [rad]

In Abbildung 7-6 (nächste Seite) ist für verschiedene multilobale Faserquerschnittsformen jeweils der mittlere Faserdurchmesser graphisch ermittelt worden. Als Ergebnis ist die Vergrößerung des mittleren Faserdurchmessers im Vergleich zum Durchmesser eines flächengleichen Kreisquerschnitts angegeben.

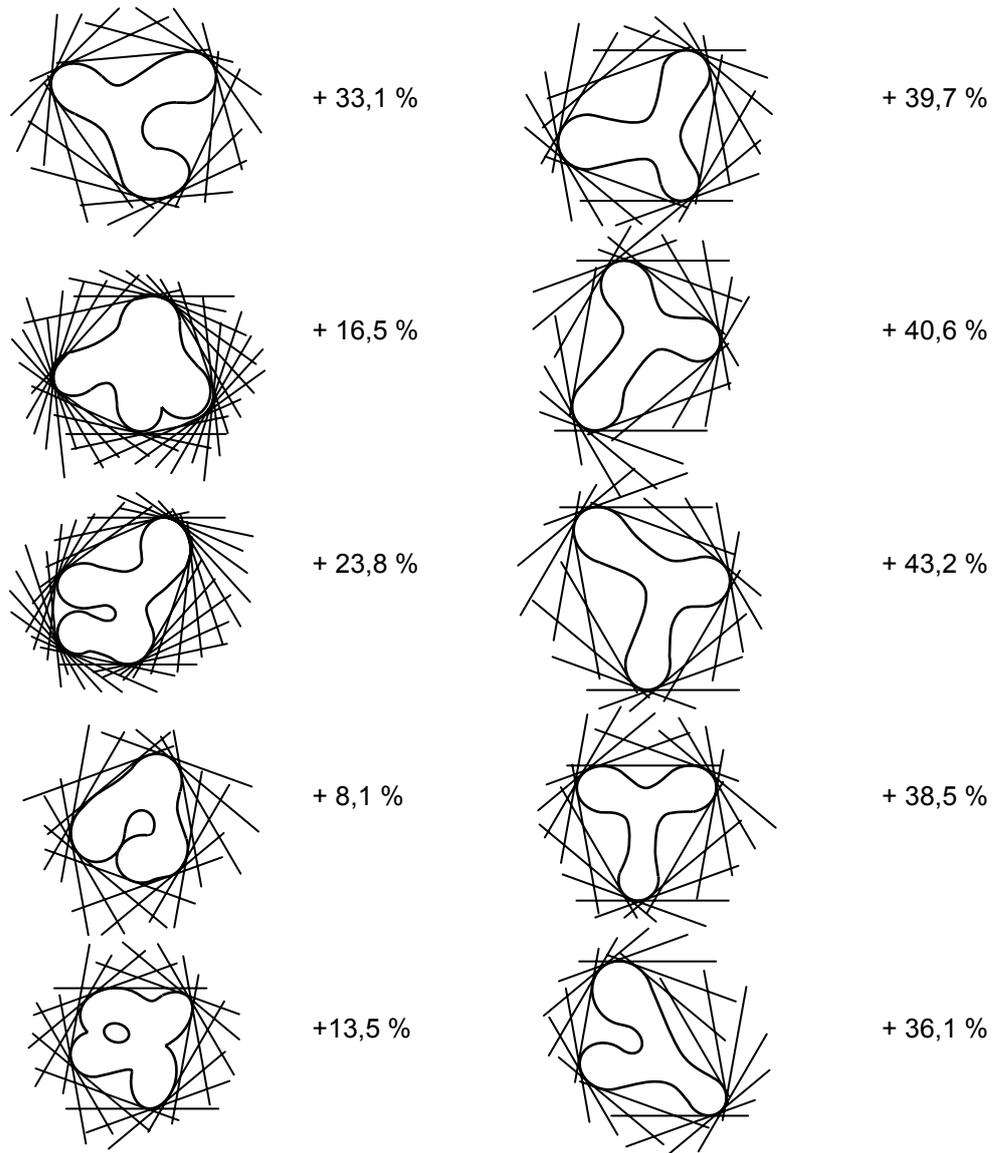


Abbildung 7-6: Vergrößerung des mittleren Faserdurchmessers für verschiedene multilobale Querschnittsformen im Vergleich zu flächengleichen Kreisquerschnitten

Es zeigt sich, dass multilobales Fasermaterial um durchschnittlich 30 % größere mittlere Faserdurchmesser als runde Fasern selber Querschnittsfläche aufweisen.

Der Einfluss der größeren mittleren Faserdurchmesser bei multilobalem Fasermaterial auf die Schichtdicke eines Filtermediums soll infolge betrachtet werden.

Baut man aus Fasern eine dreidimensionale Filzstruktur auf, so kann zwischen zwei möglichen Grenzfällen unterschieden werden.

### Grenzfall 1

#### Fasern liegen nur in der XY Ebene

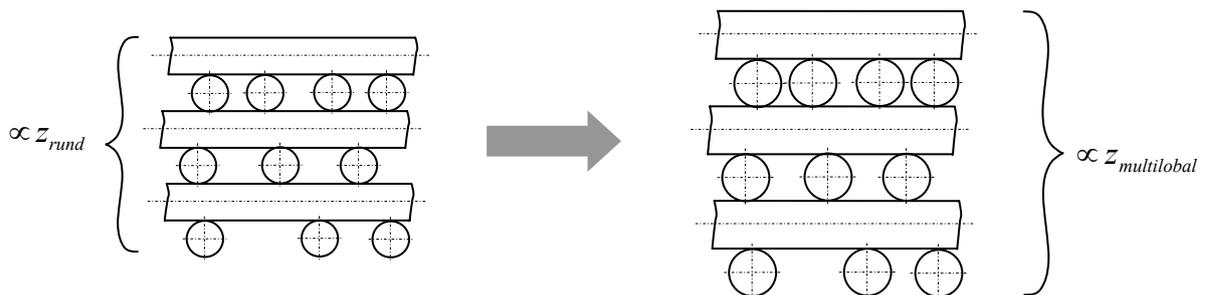


Abbildung 7-7: Dickenzunahme einer Faserschicht durch Vergrößerung der Faserdurchmesser bei horizontal ausgerichteten Fasern

Bei dieser Anordnung geht eine Vergrößerung des mittleren Faserdurchmessers direkt in die Höhe des Filzes ein:

$$z_{\text{multilobal}} = \frac{d_{m,\text{multilobal}}}{d_{\text{rund}}} z_{\text{rund}} \quad (7-4)$$

$z_{\text{multilobal}}$  Schichtdicke bei multilobalem Fasermaterial [mm]

$z_{\text{rund}}$  Schichtdicke bei Fasermaterial kreisrunden Querschnitts [mm]

$d_{m,\text{multilobal}}$  mittlerer Faserdurchmesser des multilobalen Fasermaterials [ $\mu\text{m}$ ]

$d_{\text{rund}}$  Faserdurchmesser des Fasermaterials mit kreisrunden Querschnitt [ $\mu\text{m}$ ]

### Grenzfall 2

#### Fasern liegen in völliger Wirrlage vor

Liegen die Fasern in Wirrlage vor, geht eine Erhöhung des projizierten Faserdurchmessers in alle Raumrichtungen ein. Vergrößert man gedanklich ein kleines würfelförmiges Volumenelement mit der Seitenlänge  $a$  eines solchen Filzes

bestehend aus Fasern des Durchmessers  $d_{rund}$  um den Faktor  $d_{m,multilobal}/d_{rund}$ , erhält man ein neues Volumenelement gleicher Struktur jedoch mit Fasern des Durchmessers  $d_{m,multilobal}$ . Das Volumen des vergrößerten Würfels wächst dabei mit der dritten Potenz des Vergrößerungsfaktors  $d_{m,multilobal}/d_{rund}$  (siehe Abbildung 7-8).

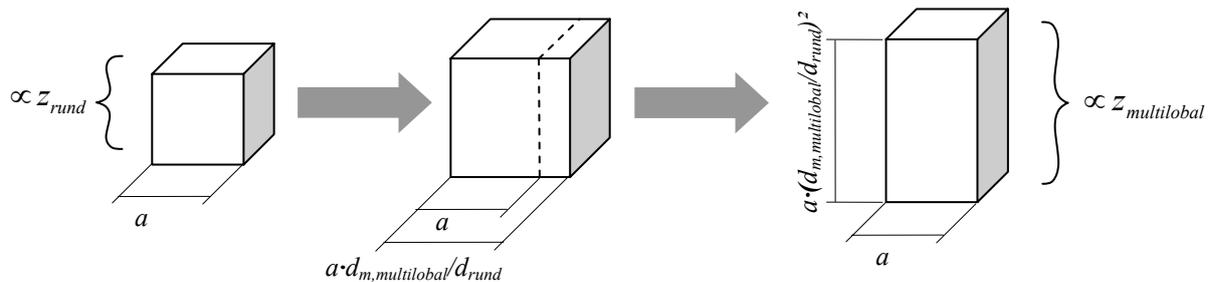


Abbildung 7-8: Dickenzunahme einer Faserschicht durch größere projizierte Faserdurchmesser bei Fasern in Wirrlage

### Symbolik

$a$	Seitenlänge Ausgangswürfel [mm]
$d_{m,multilobal}$	mittlerer Faserdurchmesser des multilobalen Fasermaterials [ $\mu\text{m}$ ]
$d_{rund}$	Faserdurchmesser des Fasermaterials mit kreisrundem Querschnitt [ $\mu\text{m}$ ]
$z_{rund}$	Schichtdicke bei Fasermaterial kreisrunden Querschnitts [mm]
$z_{multilobal}$	Schichtdicke bei multilobalem Fasermaterial [mm]

Durch die Vergrößerung des Würfels verlängern sich jedoch die Fasern ebenfalls um den Vergrößerungsfaktor  $d_{m,multilobal}/d_{rund}$ . Die Summe aller Faserlängen (Gesamtfaserlänge) im vergrößerten Würfel ist somit um den Vergrößerungsfaktor  $d_{m,multilobal}/d_{rund}$  höher als im Ausgangswürfel mit der Seitenlänge  $a$ . Um dies zu berücksichtigen, wird vom vergrößerten Würfel ein Teilvolumen abgetrennt, sodass im verbleibenden Volumen die Gesamtfaserlänge wieder der Gesamtfaserlänge im Ausgangselement entspricht. Dazu wird bei einer Seite des vergrößerten Würfels bei der Ausgangslänge  $a$  geteilt (strichlierte Linie in Abbildung 7-8). Die Gesamtfaserlänge im verbleibenden Teilvolumen ist dabei um das Teilungsverhältnis der Seite

$a/(a(d_{m,multilobal}/d_{rund}))$  geringer und entspricht somit wieder der Gesamtfaserlänge des Ausgangswürfels. Das verbleibende Volumen ergibt sich zu  $a^3(d_{m,multilobal}/d_{rund})^2$ .

Bezieht man das verbleibende Volumen auf die Ausgangsfläche (Abbildung 7-8 rechts) ergibt sich für die Zunahme der Schichtdicke:

$$z_{multilobal} = \left( \frac{d_{m,multilobal}}{d_{rund}} \right)^2 z_{rund} \quad (7-5)$$

$z_{multilobal}$  Schichtdicke bei multilobalem Fasermaterial [mm]

$z_{rund}$  Schichtdicke bei Fasermaterial kreisrunden Querschnitts [mm]

$d_{m,multilobal}$  mittlerer Faserdurchmesser des multilobalen Fasermaterials [ $\mu\text{m}$ ]

$d_{rund}$  Faserdurchmesser des Fasermaterials mit kreisrundem Querschnitt [ $\mu\text{m}$ ]

Da bei der Produktion eines Nadelfilzes (Kapitel 4.1) einzelne Faserflore übereinandergetafelt werden und erst durch den Nadelprozess versucht wird die Fasern in Wirrlage zu bringen, sollte der Wert für die Zunahme der Schichtdicke für einen Nadelfilz aus multilobalen Fasern somit zwischen den genannten beiden Grenzfällen einer nur horizontalen Ausrichtung der Fasern und Fasern in völliger Wirrlage liegen.

$$\frac{d_{m,multilobal}}{d_{rund}} z_{rund} \leq z_{multilobal} \leq \left( \frac{d_{m,multilobal}}{d_{rund}} \right)^2 z_{rund} \quad (7-6)$$

$z_{multilobal}$  Schichtdicke bei multilobalem Fasermaterial [mm]

$z_{rund}$  Schichtdicke bei Fasermaterial kreisrunden Querschnitts [mm]

$d_{m,multilobal}$  mittlerer Faserdurchmesser des multilobalen Fasermaterials [ $\mu\text{m}$ ]

$d_{rund}$  Faserdurchmesser des Fasermaterials mit kreisrundem Querschnitt [ $\mu\text{m}$ ]

Unter der Berücksichtigung das Fasern mit multilobalen Querschnittsformen bei gleicher Querschnittsfläche um 30% dicker sind als Fasern kreisrunden Querschnitts, ergibt sich aus Gleichung (7-6) folgende Abschätzung für den Einfluss multilobaler Faserquerschnittsformen auf die Dicke eines Nadelfilzes im Vergleich zu Fasern kreisrunden Querschnitts.

## Einfluss multilobaler Faserquerschnittsformen auf die Struktur und das Filtrationsverhalten von Abreinigungsfiltermedien

$$1,3 z_{rund} \leq z_{multilobal} \leq 1,69 z_{rund} \quad (7-7)$$

$z_{multilobal}$  Schichtdicke bei multilobalem Fasermaterial [mm]

$z_{rund}$  Schichtdicke bei Fasermaterial kreisrunden Querschnitts [mm]

Der bei der Erzeugung von Nadelfilzen entstehende Unterschied in ihrer Dicke wird nicht nur durch die oben erwähnten geometrischen Zusammenhänge, sondern auch durch die Verdichtungsparameter, die dem Nadelfilzherstellungsprozess zugrunde liegen, bzw. auch durch die unterschiedliche Faserbiegsamkeit (geringer bei multilobalen Fasern) bestimmt.

Berechnet man das Verhältnis der Dicken ( $z_{multilobal}/z_{rund}$ ) für die untersuchten Filtermedien ergibt sich untenstehende Tabelle 7-1.

Bez. Fasermat.	Faserquerschnittsform	Flächengew. [g/m <sup>2</sup> ]	Luftdurchlässigkeit [l/(dm <sup>2</sup> ·min) bei 200 Pa]	Dicke [mm]	$\frac{z_{multilobal}}{z_{rund}}$
FM1 PI/GF	multilobal	490	115	2,35	1,38
FM2 PPS/GF	rund	490	130	1,7	-
FM3 PI/PI	multilobal	531	129	2,6	1,53
FM4 PPS/PPS	rund	528	130,5	1,7	-
FM5 PES/PES	rund	535	129	1,7	-
FM6 PI/PI	multilobal	501	156	2,8	1,47
FM7 PPS/PPS	rund	508	162	1,9	-

Tabelle 7-1: Einfluss multilobaler Faserquerschnittsformen auf die Dicke eines Nadelfilzes im Vergleich zu Fasern kreisrunden Querschnitts

Bei den auf gleiche Luftdurchlässigkeit gefertigten Filtermitteln FM3/(FM4 bzw. FM5) und FM6/FM7 ergibt sich jeweils eine um ca. 50% größere Dicke der Filtermedien bestehend aus Fasern multilobalen Querschnitts. Beim Filtermittelpaar FM1/FM2 wurde hingegen Filtermedium FM1 (multilobal) auf eine geringere Luftdurchlässigkeit

gefertigt. Trotz der reduzierten Luftdurchlässigkeit ist FM1 noch um 38% dicker als das Vergleichsfiltermedium FM2 bestehend aus Fasern kreisrunden Querschnitts.

Das Verhältnis der gemessenen Nadelfilzdicken bestätigen somit die theoretischen Überlegungen aus der Abschätzung zum Einfluss multilobaler Faserquerschnittsformen auf die Dicke eines Nadelfilzes im Vergleich zu Fasern kreisrunden Querschnitts.

### **7.3 Strömungsfeld um multilobale Einzelfasern im Vergleich zum Strömungsfeld um Fasern mit Kreisquerschnitt**

Zur Aufklärung des Einflusses der Faserform auf das Durchströmungsverhalten eines Nadelfilzes sollen computergestützte Simulationen mit FLUENT 6.1 durchgeführt werden. Numerische Berechnungen von Umströmungsfeldern elliptischer Faserquerschnitte wurden bereits von Raynor durchgeführt [42]. Je nach Anströmungsrichtung und dem Seitenverhältnis der elliptischen Querschnittsformen, zeigten sich deutliche Unterschiede im Geschwindigkeitsprofil um die umströmten Faserquerschnitte. Besonders bei sehr flachen elliptischen Querschnittsformen kam es zu Bereichen erhöhter Strömungsgeschwindigkeiten. Aufgrund der erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten ist laut Raynor mit einer Unterstützung der Trägheitsabscheidung bei der Umströmung von Fasern mit elliptischen Querschnittsformen im Vergleich zu Fasern kreisrunden Querschnitts zu rechnen. Durch höhere Strömungsgeschwindigkeiten ergeben sich auch größere Strömungskräfte auf die umströmten Fasern. Infolge sind auch größere Druckverluste für Filterschichten bestehend aus Fasern mit elliptischen Querschnitten im Vergleich zu Filterschichten bestehend aus Fasern kreisrunden Querschnitts zu erwarten.

Ein Überblick über die Filtrationseigenschaften von Fasern mit unterschiedlichen trilobalen Querschnittsformen wird von Rohrbach [43] gegeben. Als einen Vorteil von Fasern mit trilobalem Querschnitt zu Fasern kreisrunden Querschnitts ist in der größeren Kollektorfläche zu sehen. Mittels mikroskopischer Aufnahmen konnte Rohrbach bei Tiefenfiltermedien eine vermehrte Einlagerung von Staub zwischen den Stegen speziell geformter, trilobaler Querschnittsformen nachweisen.

Die einzelnen Lappen, aus denen multilobale Faserquerschnitte aufgebaut sind, können ebenfalls elliptische Formen besitzen. Es ist nun von Interesse wie sich die einzelnen Lappen einer Faser mit multilobalem Querschnitt auf das Umströmungsfeld der Faser auswirken.

Es soll zwischen der Umströmung einzelner Fasern in einem Gitter bestehend aus parallelen Fasern und der Durchströmung eines zweidimensionalen Filzes bestehend aus Fasern unterschiedlichen Querschnitts (siehe Kapitel 7.4 *Strömungssituation in einem Nadelfilz*) differenziert werden. Die Simulation von Einzelfaserumströmungen soll Aufschluss über den Einfluss der verschiedenen Faserformen auf die auftretenden Strömungsfelder und infolge Rückschlüsse auf Druckverlust und Partikelabscheidemechanismen zulassen. Durch die Umströmungssimulation von Fasern in einem nachgebildeten Filz soll das Zusammenspiel mehrerer Fasern analysiert werden.

### **Simulationsmethodik**

In der numerischen Strömungssimulation wird zwischen 2D- und 3D-Modellen unterschieden. Während bei einem 3D-Modell die Geometrie von um- bzw. durchströmten Körpern dreidimensional abgebildet wird, versucht man bei einem 2D-Modell die Geometrie auf ein zweidimensionales Problem zurückzuführen. Bei einem 2D-Modell wird dabei die Strömung in einer Ebene betrachtet und oberhalb bzw. unterhalb dieser Ebene als gleich fortgesetzt angenommen. Durch die Reduktion der Komplexität des Modells, kann die für die Simulation benötigte Rechnerleistung, der erforderliche Speicherplatz und infolge die Rechenzeit reduziert werden. Weiters wird versucht durch die Ausnützung von Symmetrieebenen der abzubildenden Geometrie das Modell noch weiter zu vereinfachen.

Für die Umströmung einzelner Fasern (in einem Gitter) sollen die zweidimensionalen Strömungsprofile und Druckprofile für verschiedene Anströmrichtungen für drei verschiedene multilobale Faserquerschnittsformen (Abbildung 7-9) bestimmt und mit den Ergebnissen für flächengleiche Fasern mit kreisrunden Querschnitten verglichen werden.

## Einfluss multilobaler Faserquerschnittsformen auf die Struktur und das Filtrationsverhalten von Abreinigungsfiltermedien

---

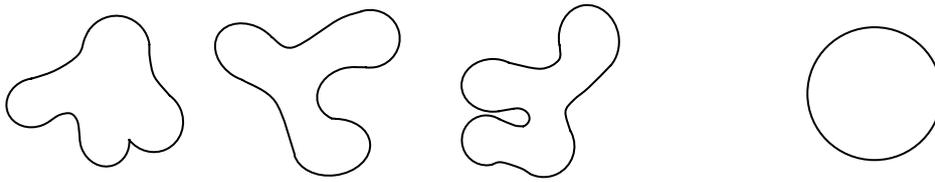


Abbildung 7-9: multilobale Faserquerschnitte im Vergleich zu einem Kreisquerschnitt gleicher Fläche

In Abbildung 7-10 ist der Simulationsbereich mit den dazugehörigen Randbedingungen für ein Fasergitter dargestellt.

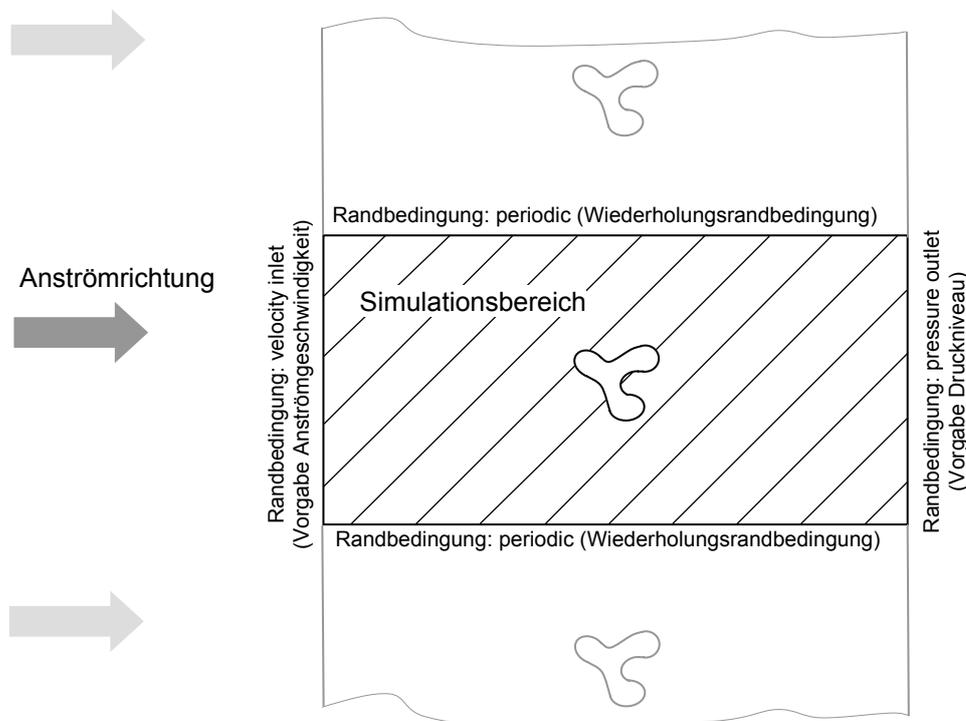


Abbildung 7-10: Simulationsbereich und Randbedingungen für ein Fasergitter

Unter Ausnützung des symmetrischen Aufbaus eines Gitters muss das Fasergitter nur im Bereich einer einzelnen Faser modelliert werden. Die Größe des rechteckigen Simulationsbereichs beträgt für die Gitterdurchströmung  $100 \times 200 \mu\text{m}$  mit einer Faser von 2,2 dtex im Mittelpunkt. An der oberen und unteren Begrenzung des Simulationsbereichs wird eine Wiederholungsrandbedingung (periodic) gesetzt. Eine Wiederholungsrandbedingung ist eine Symmetrierandbedingung. Ein weiteres Beispiel einer Symmetrierandbedingung wäre eine Spiegellinie. Durch die Wahl einer

Wiederholungsrandbedingung wird an zwei gegenüberliegenden Begrenzungen eines Simulationsbereichs vorgeschrieben, dass die Verläufe von Geschwindigkeit, Druck, Temperatur ect. entlang der zwei Begrenzungslinien gleich sind. Stapelt man den Simulationsbereich gedanklich übereinander, ergibt sich somit ein Gitter bestehend aus Fasern des umströmten Querschnitts im Abstand der Höhe des Simulationsbereichs (100  $\mu\text{m}$ ).

Durch die Wahl der Randbedingungen werden die Anströmgeschwindigkeit sowie das Druckniveau festgelegt. Dazu wird an der linken Begrenzung des Simulationsbereichs eine in der industriellen Praxis bei filternden Abscheidern übliche Anströmgeschwindigkeit von 1,5 m/min vorgegeben. Man spricht von einem Geschwindigkeitseinlass (velocity inlet). Auf der rechten Begrenzung des Simulationsbereichs wird hingegen die Bezugslinie für den Druck gesetzt. Man spricht von einem Druck Auslass (pressure outlet).

Für die numerische Strömungsberechnung muss der Simulationsbereich noch in einzelne Zellen unterteilt werden. Es entsteht das sogenannte Berechnungsnetz (grid). Um eine möglichst gleichmäßige Unterteilung des Simulationsbereichs zu erreichen, wurde ein Dreiecksgitter mit einer Auflösung (Kantenlänge Dreieck) von 1,4  $\mu\text{m}$  generiert. Da die Dreieckszellen mit 1,4  $\mu\text{m}$  Seitenlänge viel kleiner als der umströmte Faserquerschnitt (Durchmesser ca. 25  $\mu\text{m}$ ) sind, kann somit das Strömungsprofil um den umströmten Querschnitt gut nachgebildet werden. Für die gegebene Geometrie erhält man ca. 20.000 Zellen im Simulationsbereich. Mit einem Solver (numerischer Gleichungslöser) werden für jede dieser Zellen die Erhaltungssätze der Strömungslehre in Form von Energie-, Masse- und Impulsbilanzen gelöst. Für die gegebenen Rahmenbedingungen (niedrige Anströmgeschwindigkeit, kleiner Faserdurchmesser) ist die Strömung laminar zu rechnen.

Als Ergebnis der Strömungssimulation erhält man das Geschwindigkeits- bzw. das Druckprofil im Simulationsbereich. Zur Visualisierung der Strömung im Bereich des Gitters ist in Abbildung 7-11 dasselbe Bild des betreffenden Profils (Geschwindigkeit, Druck) mehrfach übereinander gestapelt.

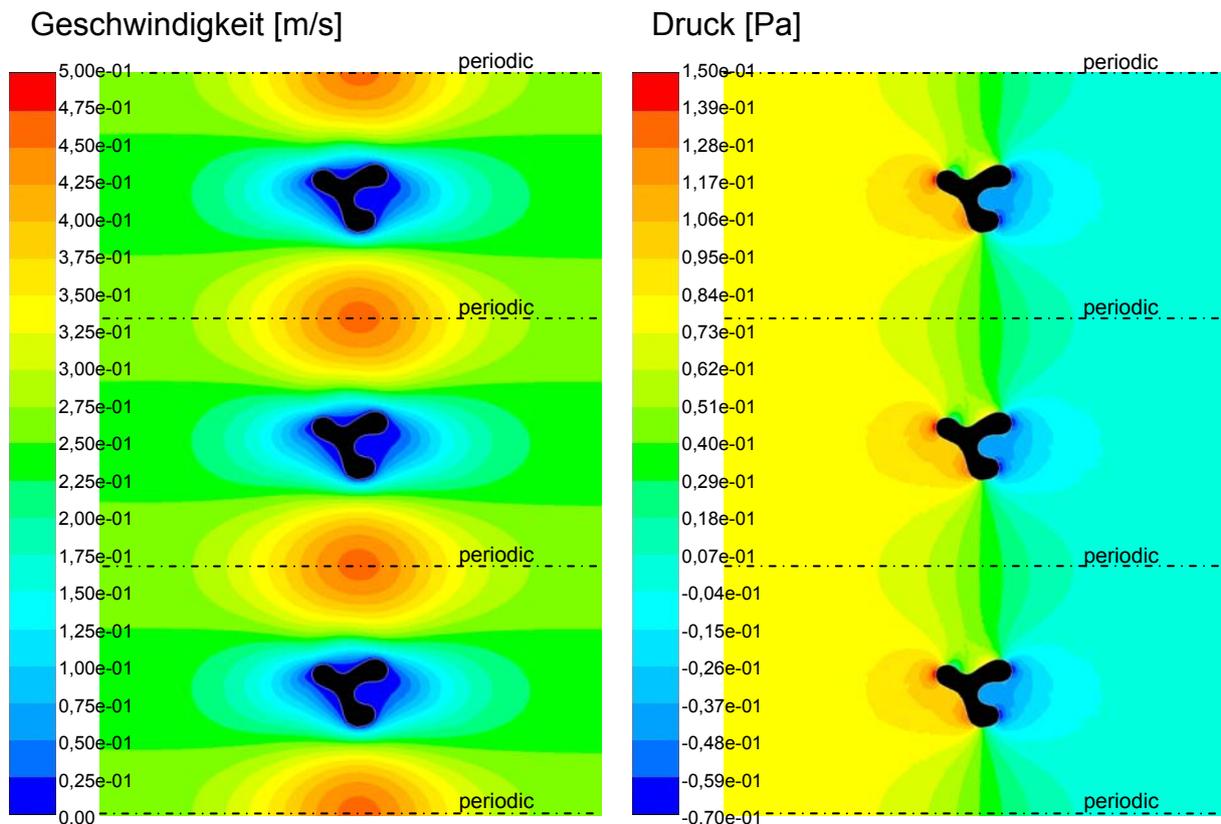


Abbildung 7-11: Geschwindigkeits- und Druckprofil für ein Fasergitter

### Plausibilitätsbetrachtung der Simulationsergebnisse

Zur Kontrolle der Simulationsergebnisse wurden von Daten für Einzelfaserumströmung von Kreisquerschnitten die auf die Fasern wirkenden Widerstandskräfte ermittelt und diese mit Literaturwerten [44] für eine Zylinderumströmung verglichen. Es zeigt sich, dass zwar die Widerstandswerte für die Fasern kreisrunden Querschnitts aus der Simulation höher als die Literaturwerte liegen, die Größenordnung stimmt jedoch. Durch den direkten Vergleich von Simulationsergebnissen untereinander werden diese Abweichungen und ein etwaiger Einfluss der Randbedingungen egalisiert.

### Kraftwirkung auf eine umströmte Faser

Die Kraftwirkung der Strömung auf eine umströmte Faser setzt sich aus Normal- und Schubkräften zusammen [31].

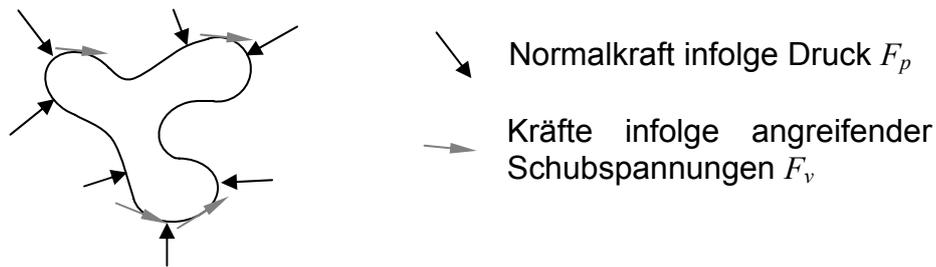


Abbildung 7-12: auf eine multilobale Faser wirkende Druck- und Schubkräfte infolge der Umströmung

Die resultierende Kraft auf eine umströmte Faser ergibt sich aus der Summe aller an einer Faser angreifenden Kräfte.

$$F = \sum F_p + \sum F_v \quad (7-8)$$

$F$       längenbezogene Kraftwirkung auf die Faser infolge der Umströmung [N/m]

$F_p$     längenbezogene Normalkräfte infolge des Druckes [N/m]

$F_v$     längenbezogene Schubkräfte infolge der Schubspannung [N/m]

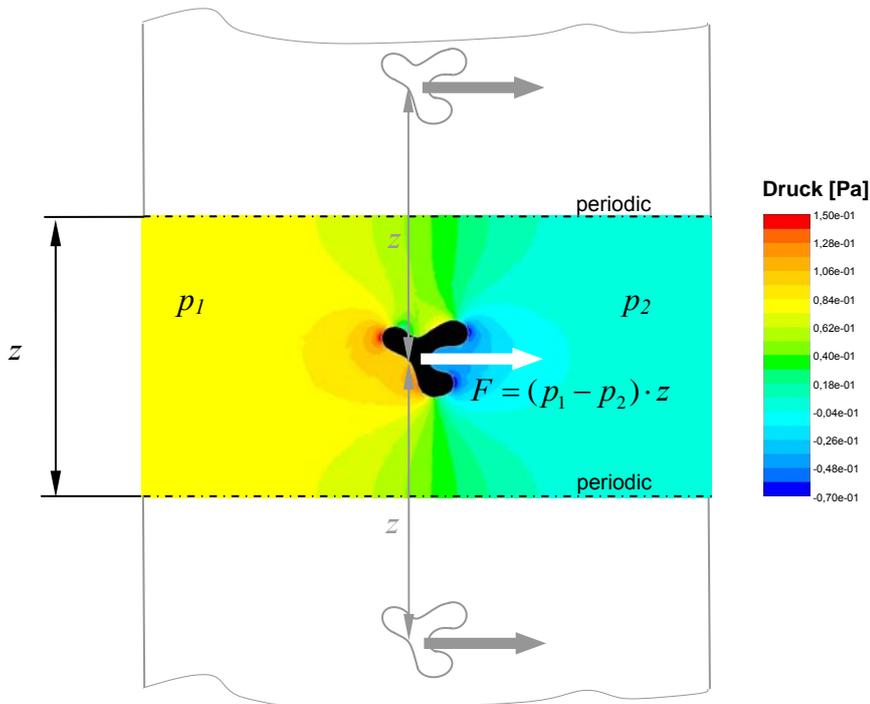


Abbildung 7-13: Zusammenhang zwischen dem Druckabfall an einem Fasergerüst und den auf die einzelnen Fasern wirkenden (längenbezogenen) Strömungskräften

Zwischen dem Druckabfall  $\Delta p$  über das Fasergitter und der auf eine Faser wirkenden Kraft  $F$  (Abbildung 7-13) gilt folgender Zusammenhang:

$$F = (p_1 - p_2) \cdot z \propto \Delta p \quad (7-9)$$

$F$       *längenbezogene Kraftwirkung auf die Faser infolge der Umströmung [N/m]*

$p_1$      *Druck vor dem Fasergitter [Pa]*

$p_2$      *Druck nach dem Fasergitter [Pa]*

$\Delta p$     *Druckverlust über das Fasergitter [Pa]*

$z$       *Höhe des Simulationsbereichs (Faserabstand im Fasergitter) [ $\mu\text{m}$ ]*

Die auf die Faser wirkende Kraft beinhaltet Informationen über das Druck- und das Geschwindigkeitsfeld und kann daher bei gleichen Randbedingungen als Vergleichsgröße herangezogen werden.

### Vergleich der zu bewertenden Faserquerschnitte mit Fasern kreisrunden Querschnitts

Es soll mit denselben Randbedingungen wie bei der Umströmungssimulation multilobal geformter Faserquerschnitte das Strömungs- und Druckprofil von Fasern mit Kreisquerschnitten errechnet werden.

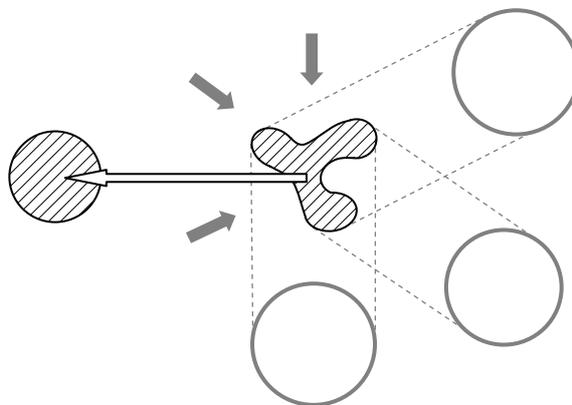


Abbildung 7-14: Vergleichskreisquerschnitte gleicher Fläche (links);  
mit gleichem projiziertem Faserdurchmessers (rechts)

Zum Vergleich können entweder Fasern gleichen Querschnitts oder Fasern die denselben projizierten Durchmesser in Anströmrichtung besitzen, herangezogen werden. Das Verhältnis der auftretenden Kraftwirkungen ( $F_{\text{multilobal}}/F_{\text{rund}}$ ) entspricht dem relativen Druckverlust der untersuchten multilobalen Faser zur Vergleichsfaser mit kreisförmigem Querschnitt.

Trägt man für jede Anströmrichtung das Verhältnis von der auf die Faser wirkenden Kraft zu der auf den Bezugskreisquerschnitt wirkenden Kraft ein, erhält man ein Polardiagramm (siehe Abbildung 7-15).

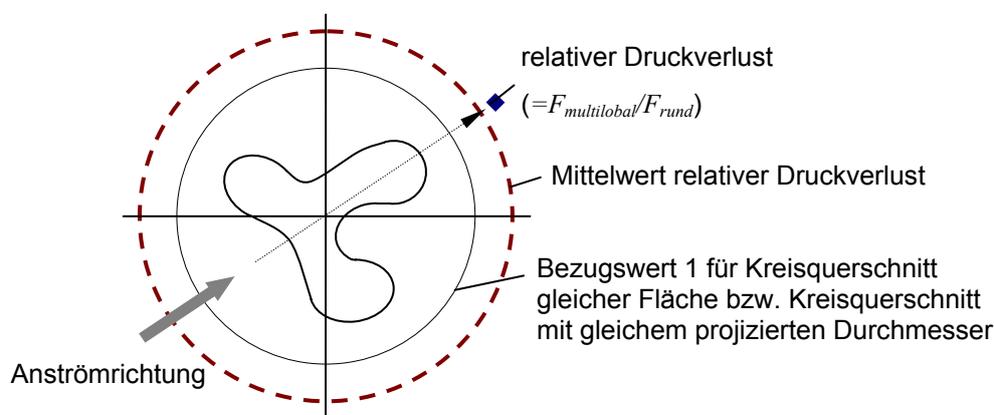


Abbildung 7-15: Darstellung der Simulationsergebnisse für verschiedene Anströmrichtungen im Polardiagramm

Jeder in den folgenden Diagrammen eingezeichnete Punkt entspricht einer ausgewerteten Strömungssimulation für die jeweilige Anströmrichtung. Tritt eine höhere Kraftwirkung als bei der Vergleichsfaser auf, so ist auch der resultierende Druckverlust entsprechend höher. Bei gleicher Kraftwirkung auf die multilobale Faser wie auf den kreisrunden Vergleichsquerschnitt ergibt sich somit der Zahlenwert 1.

Zur leichteren Orientierung wurden in den Diagrammen ebenfalls der Bezugswert 1 der Vergleichsfaser (durchgezogene Linie) und der Mittelwert für den relativen Druckverlust über alle Anströmrichtungen eingezeichnet.

In Abbildung 7-16 sind die Ergebnisse aus dem Vergleich der drei untersuchten multilobalen Faserquerschnittsformen (Abbildung 7-9) zu Fasern mit kreisrundem Querschnitt mit jeweils gleicher Fläche dargestellt.

## Einfluss multilobaler Faserquerschnittsformen auf die Struktur und das Filtrationsverhalten von Abreinigungsfiltermedien

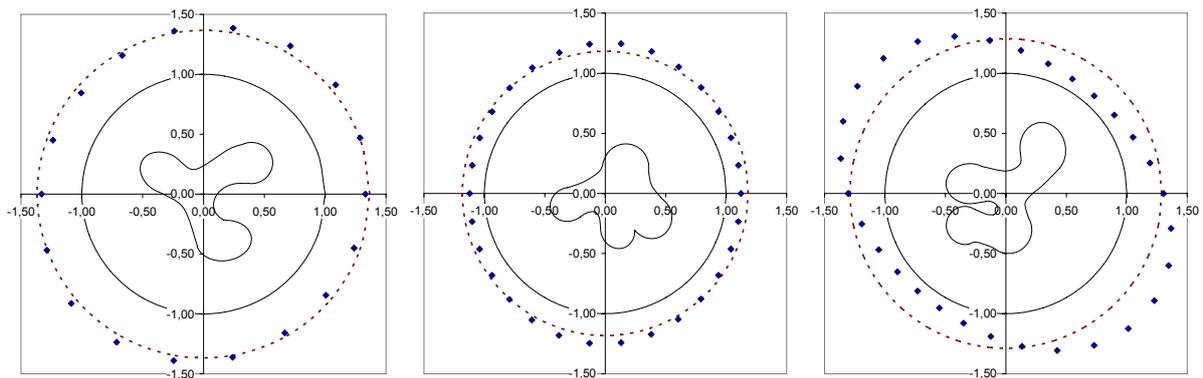


Abbildung 7-16: Kraftwirkung auf multilobale Fasern im Vergleich zu Fasern mit kreisrundem Querschnitt und gleicher Querschnittsfläche

Aufgrund der größeren projizierten Faserdurchmesser (bei gleicher Querschnittsfläche) ergeben sich proportional größere Widerstandskräfte. Je stärker der Faserquerschnitt von einem Kreisquerschnitt abweicht, desto größer ist das Verhältnis der Widerstandskräfte.

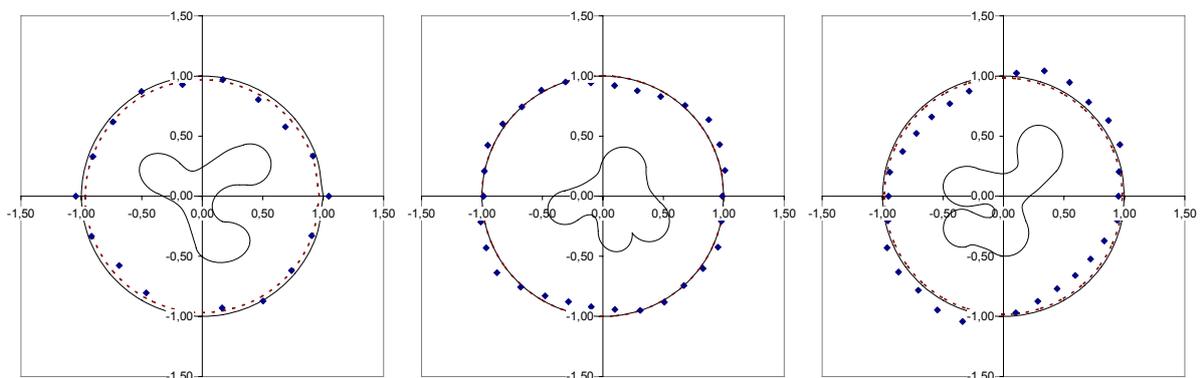


Abbildung 7-17: Kraftwirkung auf multilobale Fasern im Vergleich zu Fasern mit kreisrundem Querschnitt und gleichen projizierten Durchmessern

Aus dem Vergleich der Simulationsergebnisse für die Einzelfaserumströmung von multilobalen Fasern mit Fasern kreisrunden Querschnitts mit gleichen projizierten Faserdurchmessern (siehe Abbildung 7-17) geht hervor, dass durchschnittlich gleiche oder geringere Widerstandskräfte auf multilobale Fasern wirken. Daraus kann geschlossen werden, dass multilobale Faserquerschnitte einen geringeren Strömungswiderstandsbeiwert im Vergleich zu einer Faser mit Kreisquerschnitt aufweisen, sofern sie über einen gleichen projizierten Faserdurchmesser verfügen. Multilobal geformte Fasern können somit als „windschlüpfiger“ bezeichnet werden.

Ferner bilden sich bei der Umströmung der verschiedenen multilobalen Fasergeometrien in Abhängigkeit von der Anströmrichtung strömungsberuhigte Zonen (Strömungstotzonen) zwischen den einzelnen Lappen der Fasern aus (Abbildung 7-18).

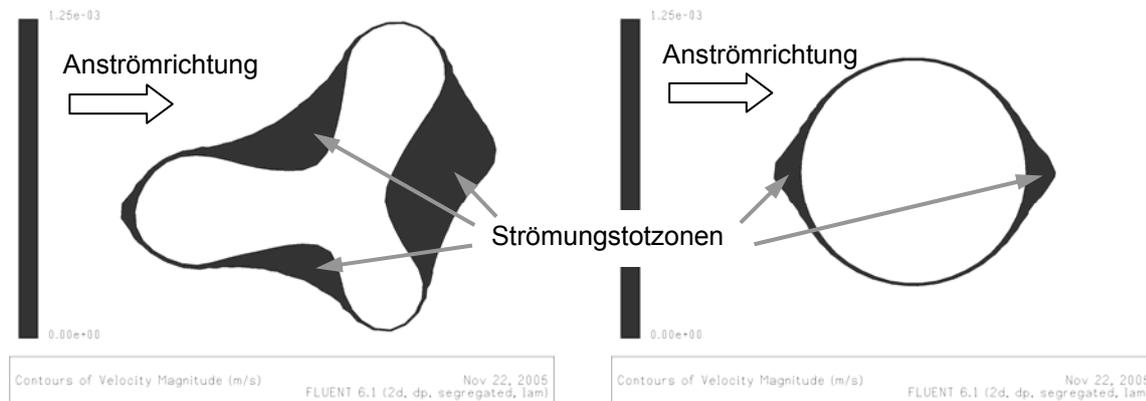


Abbildung 7-18: unterschiedlich geformte Strömungstotzonen um eine multilobale Faser und um eine flächengleiche Faser kreisrunden Querschnitts bei gleicher Anströmgeschwindigkeit

Die dargestellten Fasern wurden von links angeströmt und jene Bereiche, in welchen eine Strömungsgeschwindigkeit kleiner als 5 % der Anströmgeschwindigkeit herrscht, dunkel eingefärbt. Diese Bereiche können in erster Näherung als Strömungstotzonen bezeichnet werden.

Es ist erkennbar, dass sich bei der Umströmung der multilobalen Faser im Vergleich zur Faser kreisrunden Querschnitts eine weitaus größere Totzonenfläche pro Faserquerschnittsfläche ausbildet. Diese Totzonenbereiche können bei der Partikelbeaufschlagung während der Filtrations- und Regenerationszyklen eines Abreinigungsfiltermediums als zusätzlicher Speicherraum für ins Filtermedium eingedrungene Partikeln angesehen werden. Es ist anzunehmen, dass Partikel die im Laufe des Filtrationsprozesses in diese Totzonenräume gelangen, aufgrund der geringen bzw. nicht vorhandenen Fluidreibung keinen wesentlichen Beitrag zur Druckverlusthöhung über das bestaubte Filtermedium leisten.

Der Partikelverstopfungsprozess bzw. der Partikeltransportprozess in die Tiefe des Filtermediums, speziell während der Abfolge von Filtrations- und Abreinigungszyklen, kann nicht nur allein durch die Faserumströmung und den damit verbundenen

Abscheidemechanismen von Einzelpartikeln erklärt werden. Vielmehr sind die bei der Abreinigung in der Tiefe des Filtermediums losgerissenen Partikelmassen, die durch den inversen Luftstrom nicht ausgeblasen wurden mitverantwortlich für den Verstopfungszustand des Filtermediums. Diese internen Restpartikelmassen werden dann während des nach der Abreinigung folgenden Filtrationsvorgangs durch die Strömungsumkehr bevorzugt in die Strömungstotzonen eingelagert und liefern infolge nur einen geringen Anteil zur Restdruckverlusterhöhung des Filtermediums.

### **Faserumströmung von Fasern mit multilobalem und rundem Faserquerschnitt bei gleicher Faserquerschnittsfläche und gleicher Anströmgeschwindigkeit**

Um die Auswirkungen auf den Druckverlustanstieg durch die Einlagerung von Partikeln in den Totzonen besser aufklären zu können wurde in einer Umströmungssimulation von multilobalen und kreisförmigen Faserquerschnitten jeweils die Totzonenflächen ermittelt und die angreifenden Druck- und Scherkräfte während der Umströmung berechnet. Diese Kräfte, die den Strömungswiderstand der Faser bewirken, können stellvertretend für den Anteil der Faser am Druckverlust einer aus solchen Fasern aufgebauten Faserschicht angesehen werden.

In einer Simulationsfolge werden die bei einer Umströmung ermittelten Totzonenflächen gedanklich vollständig mit Partikeln aufgefüllt und der Gesamtquerschnitt aus der Faser und den eingelagerten Partikeln als neuer Umströmungsquerschnitt definiert und erneut umströmt. Die danach entstehenden Totzonen werden wiederum mit Partikeln aufgefüllt und umströmt.

In Abbildung 7-19 ist das Ergebnis dieser Simulationsfolge für einen multilobalen Querschnitt im Vergleich zu einem kreisförmigen Querschnitt gleicher Ausgangsfläche dargestellt. Die Anströmgeschwindigkeit ist mit 1,5 m/min für beide Faserarten gleich. Auf der Abszisse ist die Zunahme der Faserquerschnittsfläche durch Auffüllen der Totzonenfläche im Laufe der einzelnen Simulationen im Verhältnis zur ursprünglichen Faserfläche aufgetragen. Dies kann als ein Maß für die eingelagerte Staubmasse angesehen werden. Auf der Ordinate sind die zugehörigen relativen, auf den Ausgangswert der flächengleichen Faser kreisrunden Querschnitts bezogenen, Druck- und Scherkräfte sowie die Gesamtkraft der Umströmung aufgetragen.

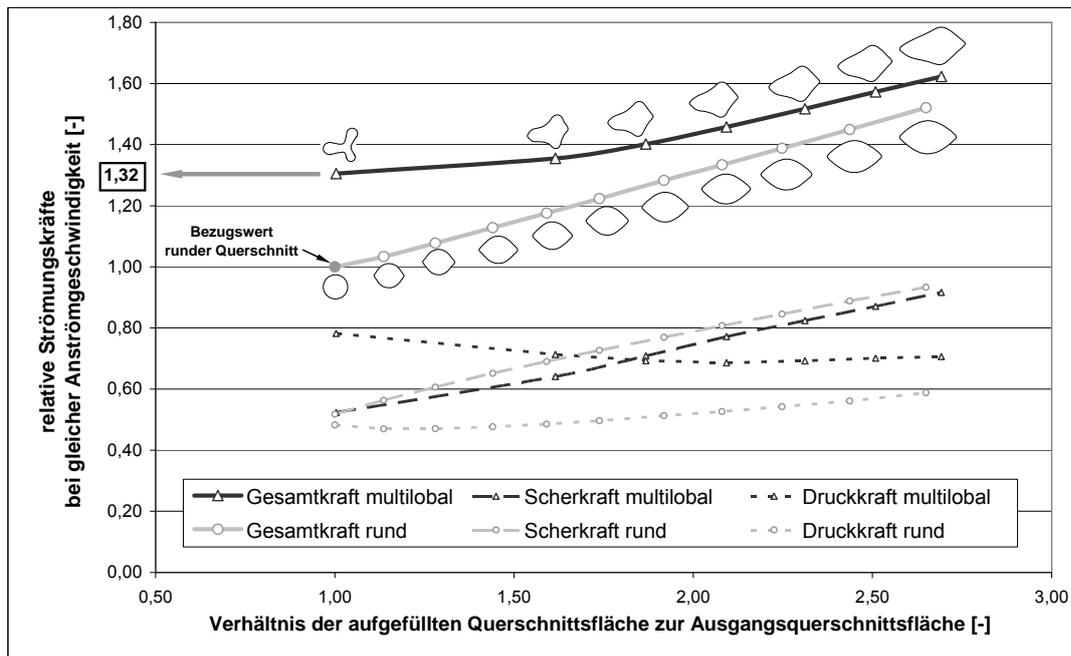


Abbildung 7-19: Veränderung der Strömungskräfte durch sukzessives Auffüllen der Strömungstotzonen für einen multilobalen und einen flächengleichen, kreisrunden Faserquerschnitt bei gleicher Anströmgeschwindigkeit

Aus Abbildung 7-19 ist ersichtlich, dass die partikelfreie multilobale Faser einen höheren Druckverlustanteil als die flächengleiche Faser kreisrunden Querschnitts hat. Dies ist auf die Unterschiede in den projizierten Faserdurchmessern zurückzuführen. Bei zunehmend gleicher Massenbelegung ergibt sich jedoch für die Faser mit multilobaler Querschnittsform im Vergleich zur flächengleichen Faser kreisrunden Querschnitts ein geringerer Druckverlustanstieg. Wenn die Strömungstotzonen der multilobalen Faser mit Partikelmaterial aufgefüllt sind und infolge eine ähnliche Querschnittsform wie die Faser kreisrunden Querschnitts aufweist, sind die weiteren Druckverlustzunahmen von annähernd gleicher Größe. Dies zeigt, dass mit der multilobalen Faser größere Partikelmassen gespeichert werden können ohne dass der Druckverlust im Vergleich zur Faser kreisrunden Querschnitts wesentlich zunimmt.

Da multilobale Fasern im Vergleich zu flächengleichen Fasern kreisrunden Querschnitts im Mittel über größere projizierte Faserdurchmesser verfügen, ergibt sich bei gleicher Flächenmasse für multilobale Fasern eine dickere Faserschicht als für eine Faserschicht bestehend aus Fasern kreisrunden Querschnitts. Dadurch ist

die Porosität solcher multilobalen Faserschichten im Vergleich zu Faserschichten mit runden Faserquerschnitten größer. Infolge erhöhter Porosität, reduziert sich die Anströmgeschwindigkeit der Fasern.

Um Faserschichten aus unterschiedlichen Materialien hinsichtlich des Filtrationsverhaltens vergleichen zu können, ist es notwendig nicht nur gleiche Flächenmasse und gleichen Fasertiter, sondern auch gleiche Luftdurchlässigkeit zu gewährleisten.

### **Faserumströmung von Fasern mit multilobalem und rundem Faserquerschnitt bei gleicher Faserquerschnittsfläche und gleicher Luftdurchlässigkeit**

Die Daten aus der Simulationsrechnung für die Faserumströmung bei gleicher Anströmgeschwindigkeit (Abbildung 7-19) können wie folgt auf gleiche Luftdurchlässigkeit (Abbildung 7-20) umgerechnet werden: Gleiche Luftdurchlässigkeit bedeutet bei gleicher Flächenmasse und gleichem Fasertiter einer Faserschicht bestehend aus multilobalen Fasern im Vergleich zu einer Faserschicht bestehend aus Fasern kreisrunden Querschnitts, dass die Anzahl der umströmten Faserquerschnitte der Schichten gleich ist und dass infolge die Reibungskraftwirkungen auf einzelne multilobale und runde Fasern ebenfalls gleich sind. Da im laminaren Bereich der berechnete Kraftanteil proportional der Anströmgeschwindigkeit ist und dieser bei der Umströmung im unbestaubten Zustand um das 1,32-fache größer (Abbildung 7-19) für die multilobale Faser als für die runde Faser ist, kann im Falle gleicher Luftdurchlässigkeit der Kraftverlauf der multilobalen Faser durch 1,32 dividiert werden (Abbildung 7-20). Daraus ergibt sich, dass bei gleicher Luftdurchlässigkeit auch die Anströmgeschwindigkeit der multilobalen Faser ebenfalls um den Faktor 1,32 geringer als für die Faser kreisrunden Querschnitts ist.

In Abbildung 7-20 ist die Veränderung der Strömungskräfte durch sukzessives Auffüllen der Strömungstotzonen für einen multilobalen und einen flächengleichen, kreisrunden Faserquerschnitt bei gleicher Luftdurchlässigkeit der durchströmten Faserschicht dargestellt. Bei gleicher Luftdurchlässigkeit ergeben somit beim multilobalen Faserquerschnitt gleiche Widerstandskräfte der Strömung als im Vergleich zum runden Faserquerschnitt. Füllt man nun sukzessive die Strömungstotzonen beider Faserquerschnitte gedanklich mit Partikelmaterial auf,

ergibt sich für den Kreisquerschnitt eine stärkere Zunahme der Strömungskräfte als im Vergleich zum multilobalen Faserquerschnitt.

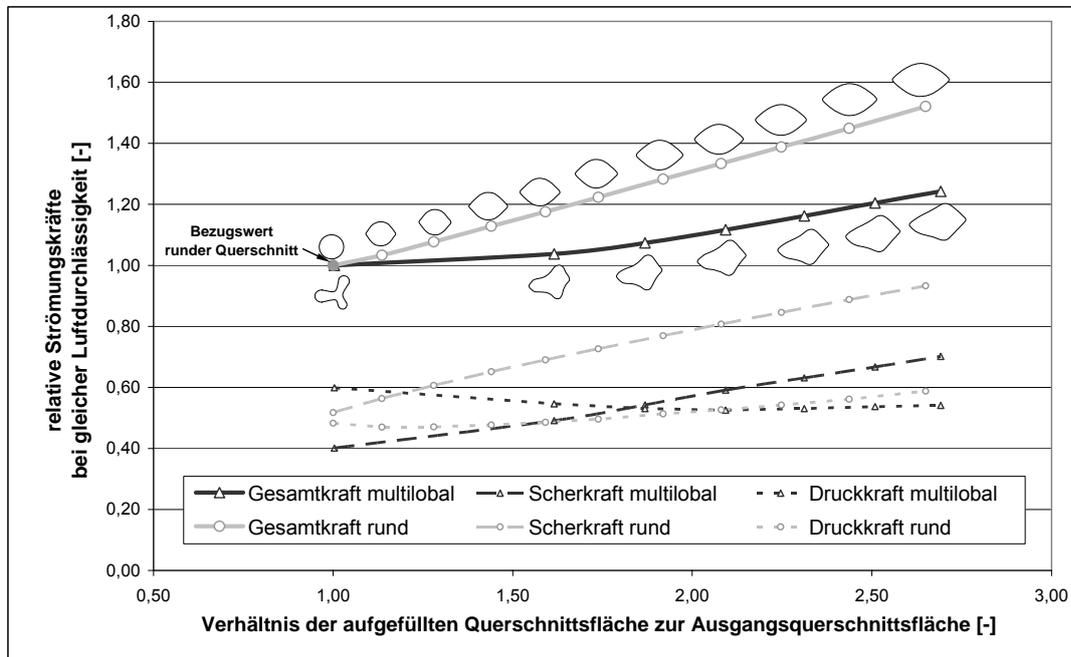


Abbildung 7-20: Veränderung der Strömungskräfte durch sukzessives Auffüllen der Strömungstotzonen für einen multilobalen und einen flächengleichen, kreisrunden Faserquerschnitt bei gleicher Luftdurchlässigkeit der durchströmten Faserschicht

Aus den Umströmungssimulationen kann geschlossen werden, dass beim Vergleich von Filtermedien, die auf gleiche Luftdurchlässigkeit, gleiche Flächenmasse und gleichen Fasertiter gefertigt wurden, für Filtermedien bestehend aus multilobalen Faserquerschnittsformen wegen ihres Strömungstotzonenspeichereffektes ein moderaterer Restdruckverlustverlauf als bei Filtermedien bestehend aus runden Faserquerschnittsformen zu erwarten ist.

In Filtermitteltestes soll nun das Staubeinlagerungsverhalten und seine Auswirkung auf die Restdruckverlustentwicklung untersucht werden.

## Bestätigung der Simulationsergebnisse durch Filtermitteltests

An einem Filtermittelprüfstand VDI 3926 Typ 2 (Abbildung 5-9, Seite 47) wurden der Restdruckverlust, die eingelagerte Staubmasse und der Reingasstaubgehalt für die Filtermedien FM3 (multilobaler Faserquerschnitt) und FM4 (runder Faserquerschnitt),

welche annähernd gleiche Luftdurchlässigkeit, gleiche Flächenmasse und gleichen Fasertiter besitzen, mit zunehmender Zyklenzahl (je nach 1, 2, 3, 5, 20, 50 bzw. 100 Zyklen) gemessen. Die verwendeten Prüfparameter sind in Tabelle 5-3 auf Seite 48 zusammengefasst. In Abbildung 7-21 sind die Ergebnisse aus den Filtermittelpfahrungen dargestellt. Dabei entstand jeder Messpunkt aus einem durchgehenden Versuch, wobei für verschiedene Abbruchszeitpunkte der Versuch jeweils wieder vom Anfang an gestartet wurde. Damit kann die Reproduzierbarkeit der Aussagen verbessert werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7-21 dargestellt.

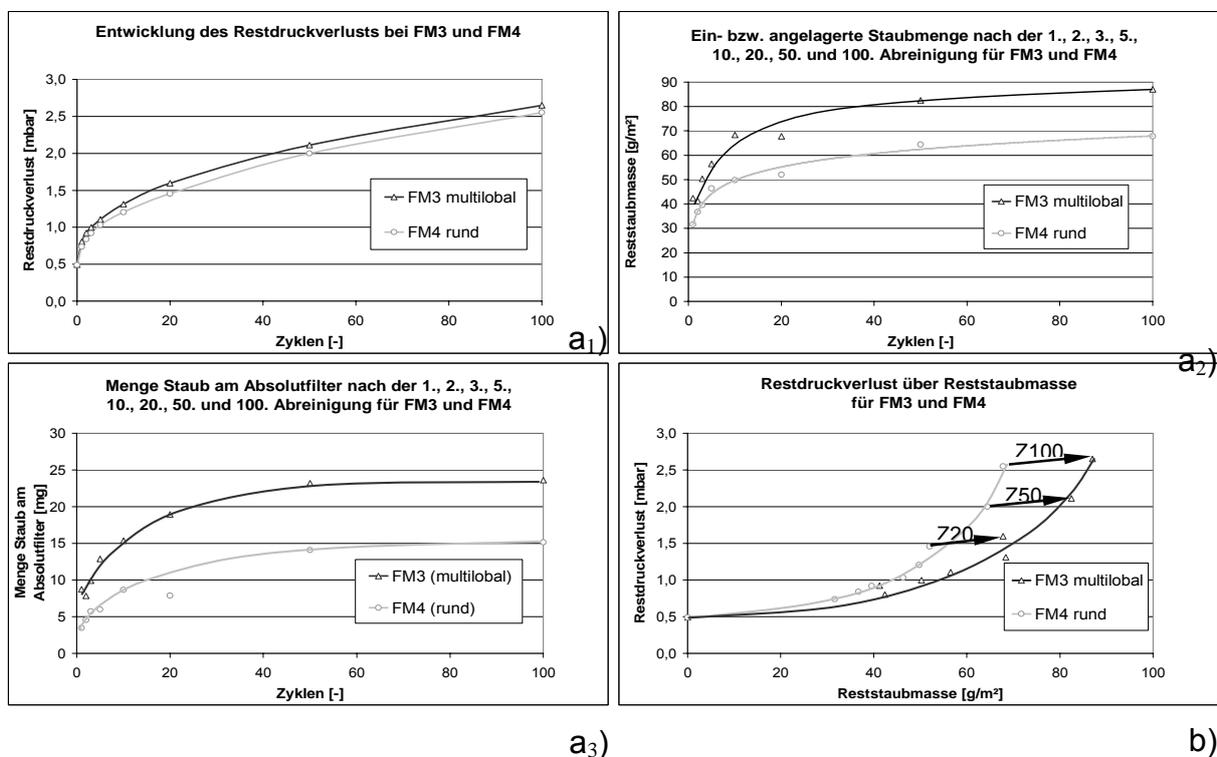


Abbildung 7-21: Ergebnisse der Bestäubungsversuche für FM3 (multilobal) und FM4 (rund) bei gleichem Flächengewicht, gleicher Luftdurchlässigkeit und gleichem Fasertiter; a<sub>1</sub>) - a<sub>3</sub>) Restdruckverlust, Reststaubmasse, Staubdurchtritt jeweils über Zyklenzahl; b) Restdruckverlust über Reststaubmasse

Es zeigt sich, dass sich bei größerer Staubeinlagerung und größerem Staubdurchtritt beim Filtermedium FM3 bestehend aus Fasern mit multilobalen Querschnittsformen der Restdruckverlust im gleichen Größenbereich liegt wie bei FM4, welches aus Fasern kreisrunden Querschnitts besteht. Das deutet darauf hin, dass die bei Filtermedien bestehend aus Fasern multilobalen Querschnitts im Vergleich zu Filtermedien aus Fasern kreisrunden Querschnitts vermehrt eingelagerte

## Einfluss multilobaler Faserquerschnittsformen auf die Struktur und das Filtrationsverhalten von Abreinigungsfiltermedien

Staubmenge eine geringere Druckverlustrelevanz aufweist. Ein Teil des Staubes wird in Bereiche eingelagert, die infolge des Speichereffektes der Strömungstotzonen nur wenig zur Druckverlusterhöhung beitragen.

Um einen optimalen Einsatz von Filtermedien bestehend aus multilobalen Fasern zu gewährleisten ist es sinnvoll diese im Vergleich zu Filtermedien bestehend aus Fasern kreisrunden Querschnitts auf eine geringere Luftdurchlässigkeit bei gleichem Fasertiter und gleicher Flächenmasse zu fertigen. Damit werden die Staubeinlagerung und der Staubdurchtritt reduziert und der damit verbundene Anstieg des Restdruckverlustes würde geringer ausfallen. Der Leerdruckverlust des unbestäubten Mediums ist jedoch höher, befindet sich aber bei relativ niedrigen Druckwerten, und wird durch die fortschreitende moderatere Restdruckverlusterhöhung bei höheren Zykluszahlen unter jener für Filtermedien mit Fasern kreisrunder Querschnittsflächen zu liegen kommen.

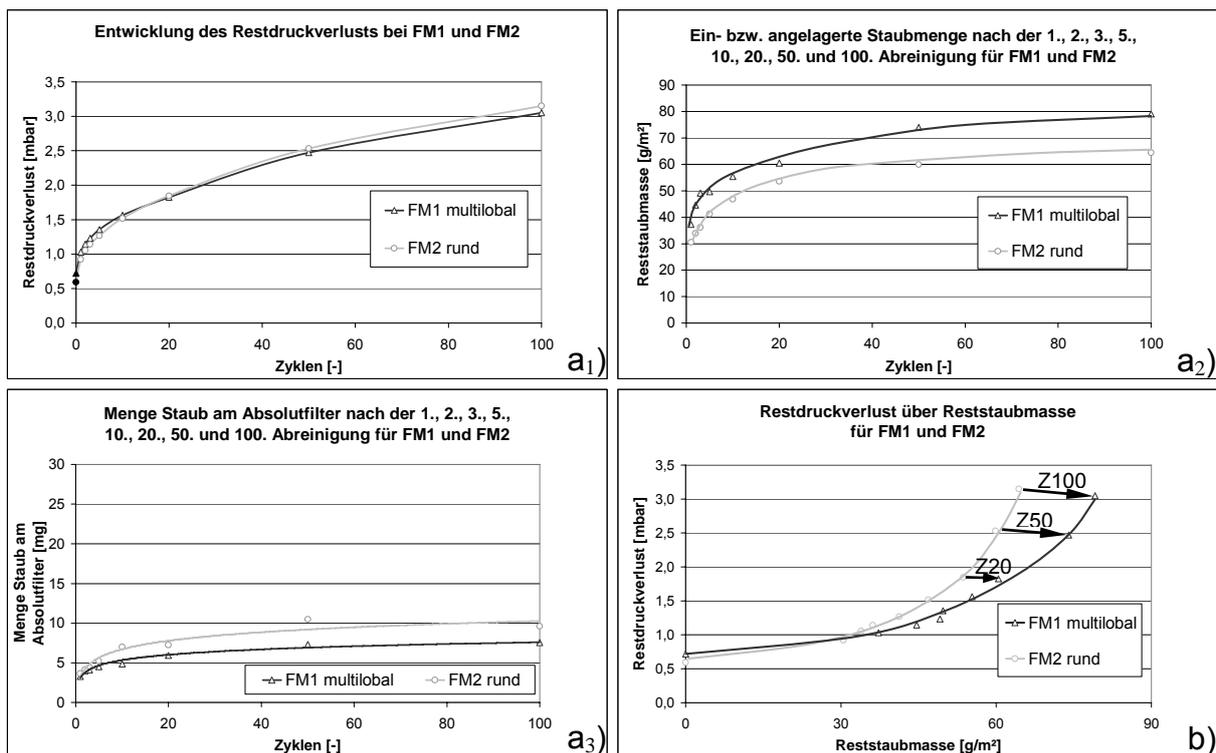


Abbildung 7-22: Ergebnisse der Bestäubungsversuche für FM1 (multilobal) und FM2 (rund) bei gleichem Flächengewicht, gleichem Fasertiter jedoch verringerter Luftdurchlässigkeit von FM1 gegenüber FM2; a<sub>1</sub>) - a<sub>3</sub>) Restdruckverlust, Reststaubmasse, Staubdurchtritt jeweils über Zykluszahl; b) Restdruckverlust über Reststaubmasse

Wie Abbildung 7-22 zeigt, bestätigen die Versuchsergebnisse für die Filtermedien FM1 PI (multilobal) und FM2 PPS (rund) diese Überlegungen. Es zeigt sich, dass trotz höheren Leerdruckverlust und einer höheren Staubeinlagerung beim Filtermedium bestehend aus multilobalem Fasermaterial (FM1) sich die Restdruckverlustkurve zu niedrigeren Drücken im Vergleich zum Filtermedium bestehend aus Fasern kreisrunden Querschnitts (FM2) hin entwickelt. Der Speichereffekt der Strömungstotzonen überwiegt. Ferner ist ein geringerer Staubdurchtritt bei FM1 (multilobal) im Vergleich zu FM2 (rund) festzustellen.

Eine weitere Erklärung für die moderatere Restdruckverlustentwicklung bei FM1 (multilobal) im Vergleich zu FM2 (rund), liegt in der Ausbildung einer dünnen stabilen Staubeinlagerungsschicht. Vergleicht man die Verläufe der Staubeinlagerung von FM1 (multilobal) im Vergleich zu FM2 (rund) ist eine vermehrte Staubaufnahme von FM1 während der ersten Filtrationszyklen feststellbar. In dieser Phase der Filtration werden die zusätzlich in den oberflächennahen Faserschichten vorhandenen Strömungstotzonen aufgefüllt. Diese nach innen gekrümmten Bereiche multilobaler Fasern können dabei als Stützstellen für die Staubeinlagerungsschicht dienen. Infolge wird ein tieferes Eindringen der Staubfront verhindert. Die stabilisierende Wirkung der aufgefüllten Strömungstotzonen manifestiert sich auch in einem verringerten Staubdurchtritt durch das Filtermedium. Hat sich erst einmal eine stabile Staubeinlagerungsschicht im Filtermedium ausgebildet, stagniert der Staubdurchtritt.

Die durchgeführten Bestäubungsversuche bestätigten, dass eingelagerter Staub bei Filtermedien bestehend aus multilobalen Fasern sich geringer auf die Entwicklung des Restdruckverlusts auswirkt als bei Filterschichten bestehend aus Fasern mit kreisrundem Querschnitt. Dieses Verhalten ist auf eine teilweise Einlagerung des Staubes in die Strömungstotzonen zurückzuführen.

Bei Filtermedien aus Fasern mit multilobalem Querschnitt, die bei gleichem Flächengewicht und gleichen Fasertiter auf gleiche Luftdurchlässigkeit wie Filtermedien aus Fasern mit kreisrundem Querschnitt gefertigt sind, kompensieren sich teilweise die positiven Phänomene einer Speicherwirkung der Strömungstotzonen und eine erhöhte Staubeinlagerung.

Vergleicht man jedoch das Verhalten des auf eine geringere Luftdurchlässigkeit gefertigten Filtermediums (FM1, multilobal) mit dem betreffenden Filtermedium (FM2,

rund), welches auf höhere Luftdurchlässigkeit gefertigt wurde, jedoch gleiches Flächengewicht besitzt, so kann man für das multilobale Filtermedium trotz höherem Leerdruckverlust und einer höheren Staubeinlagerung eine flachere Entwicklung des Restdruckverlusts feststellen. Der Speichereffekt der Strömungstotzonen überwiegt hierbei. Gleichfalls wurde für das Filtermedium bestehend aus Fasern mit multilobalen Querschnittsformen im Vergleich zum Filtermedium bestehend aus Fasern kreisrunden Querschnitts ein verringerter Staubdurchtritt festgestellt.

#### **7.4 Strömungssituation in einem Nadelfilz**

Analog zum Vergleich der Einzelfaserumströmung von multilobalen Polyimid- Fasern zu Fasern mit kreisrundem Querschnitt soll eine Simulation der Durchströmung eines zweidimensionalen Filzes durchgeführt werden. Zu diesem Zweck werden verschiedene multilobale Fasern zufällig im Simulationsbereich verteilt. Die Daten aus diesen Durchströmungssimulationen sollen mit den Simulationsergebnissen eines Filzes, bei dem an den gleichen Positionen Fasern mit Kreisquerschnitten und gleichen Querschnittsfläche gesetzt werden, verglichen werden (Abbildung 7-23).

Für die Durchströmungssimulation des zweidimensionalen Filzes wird ein größerer Simulationsbereich ( $200 \times 400 \mu\text{m}$ ) als für die Einzelfaserumströmung mit 22 zufällig verteilten Fasern generiert. Die Randbedingungen werden analog zur Einzelfaserumströmung gesetzt (Seite 88).

In der industriellen Praxis entstehen beim Vernadeln tri- bzw. multilobaler Fasern im Vergleich zu Fasern mit Kreisquerschnitten dickere Nadelfilze höherer Porosität, wodurch sich weitere Poren ergeben. Zur näheren Untersuchung des Einflusses der Verdichtung der Faserschichten auf das Strömungsverhalten innerhalb eines Nadelfilzes soll die Faserschicht aus multilobalen Fasermaterial verschieden stark aufgedehnt und zusätzliche Strömungssimulationen für diese Faserschichten durchgeführt werden.

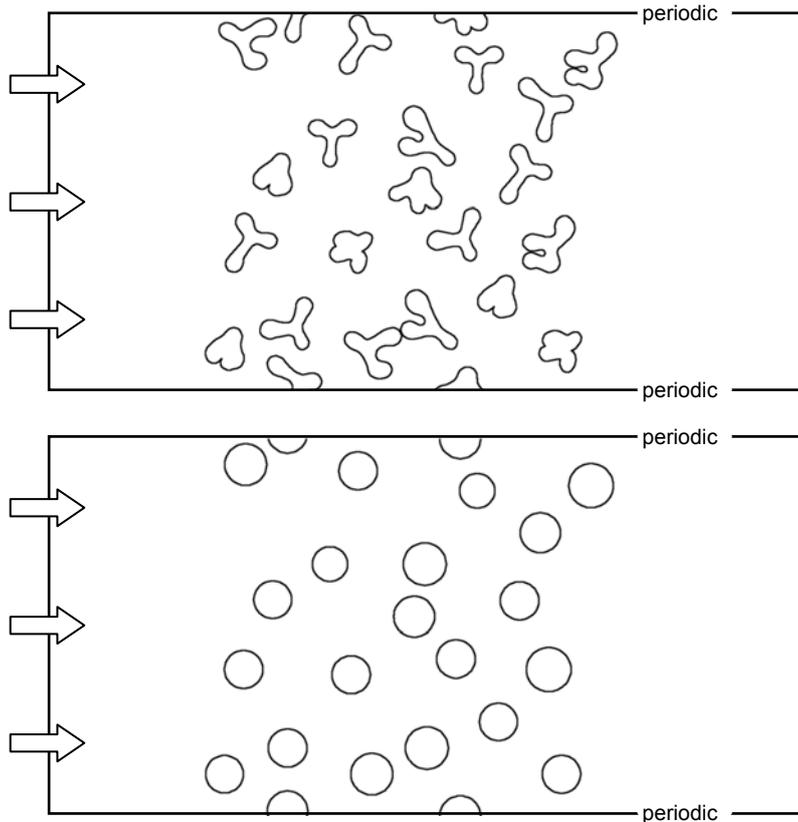


Abbildung 7-23: Struktur des zweidimensionalen Filzes aus multilobalen Fasern (oben) und eines Vergleichsfilzes mit Fasern flächengleicher kreisrunder Querschnitte (unten)

Unter Aufdehnung wird eine Verschiebung der Faserquerschnitte in Durchströmungsrichtung um einen angegebenen Faktor verstanden. Die neuen Faserpositionen im aufgedehnten Simulationsgebiet ergeben sich aus Multiplikation der ursprünglichen Koordinaten mit dem Aufdehnungsfaktor.

$$x_{neu} = c_a \cdot x_{ref} \quad (7-10)$$

$c_a$                       *Aufdehnungsfaktor [-]*

$x_{neu}$                     *neue Koordinate (in Durchströmungsrichtung) des Faserquerschnittes [ $\mu\text{m}$ ]*

$x_{ref}$                     *Ausgangskoordinate (in Durchströmungsrichtung) des Faserquerschnittes [ $\mu\text{m}$ ]*

In Abbildung 7-24 (Seite 106) sind die Ergebnisse aus der Simulation für eine verschieden stark aufgedehnte Faserschicht aus multilobalen Fasern im Vergleich zur Faserschicht mit Kreisquerschnitten dargestellt.

Zur besseren Beurteilung der Simulationsergebnisse sollen die jeweils auftretende höchste Strömungsgeschwindigkeit sowie der Druckverlust der betrachteten Faserschicht in Relation zu den Werten der Faserschicht bestehend aus kreisrunden Fasern angegeben werden.

$$v_{\max,rel} = \frac{v_{\max}}{v_{ref}} \quad (7-11)$$

$v_{\max,rel}$  relative, maximal auftretende Strömungsgeschwindigkeit in der betrachteten Faserschicht (bezogen auf die maximal auftretende Strömungsgeschwindigkeit in der Vergleichsfaserschicht bestehend aus kreisrunden Fasern gleicher Querschnittsflächen) [-]

$v_{\max}$  maximal auftretende Strömungsgeschwindigkeit in der betrachteten Faserschicht [m/s]

$v_{ref}$  maximal auftretende Strömungsgeschwindigkeit in der Vergleichsfaserschicht bestehend aus kreisrunden Fasern gleicher Querschnittsflächen [m/s]

$$\Delta p_{rel} = \frac{\Delta p}{\Delta p_{ref}} \quad (7-12)$$

$\Delta p_{rel}$  relativer Druckverlust der betrachteten Faserschicht (bezogen auf den Druckverlust der Vergleichsfaserschicht bestehend aus kreisrunden Fasern gleicher Querschnittsflächen) [-]

$\Delta p$  Druckverlust der betrachteten Faserschicht [Pa]

$\Delta p_{ref}$  Druckverlust der Vergleichsfaserschicht bestehend aus kreisrunden Fasern gleicher Querschnittsflächen [Pa]

Mit einem Aufdehnungsfaktor von 1,000 besitzt die Faserschicht bestehend aus Fasern multilobalen Querschnitts annähernd die gleiche Porosität wie die Vergleichsfaserschicht bestehend aus flächengleichen Fasern kreisrunden Querschnitts. Die Vergleichsfaserschicht weist hier durch die geringere zweidimensionale Ausdehnung seiner kreisrunden Einzelfaserquerschnitte weitere Poren auf. Durch die weiteren Poren ergibt sich für die Vergleichsfaserschicht bestehend aus Fasern kreisrunden Querschnitts ein geringerer Druckverlust, gleichfalls ist aufgrund der größeren Porenweiten mit einer höheren Partikelpenetration zu rechnen.

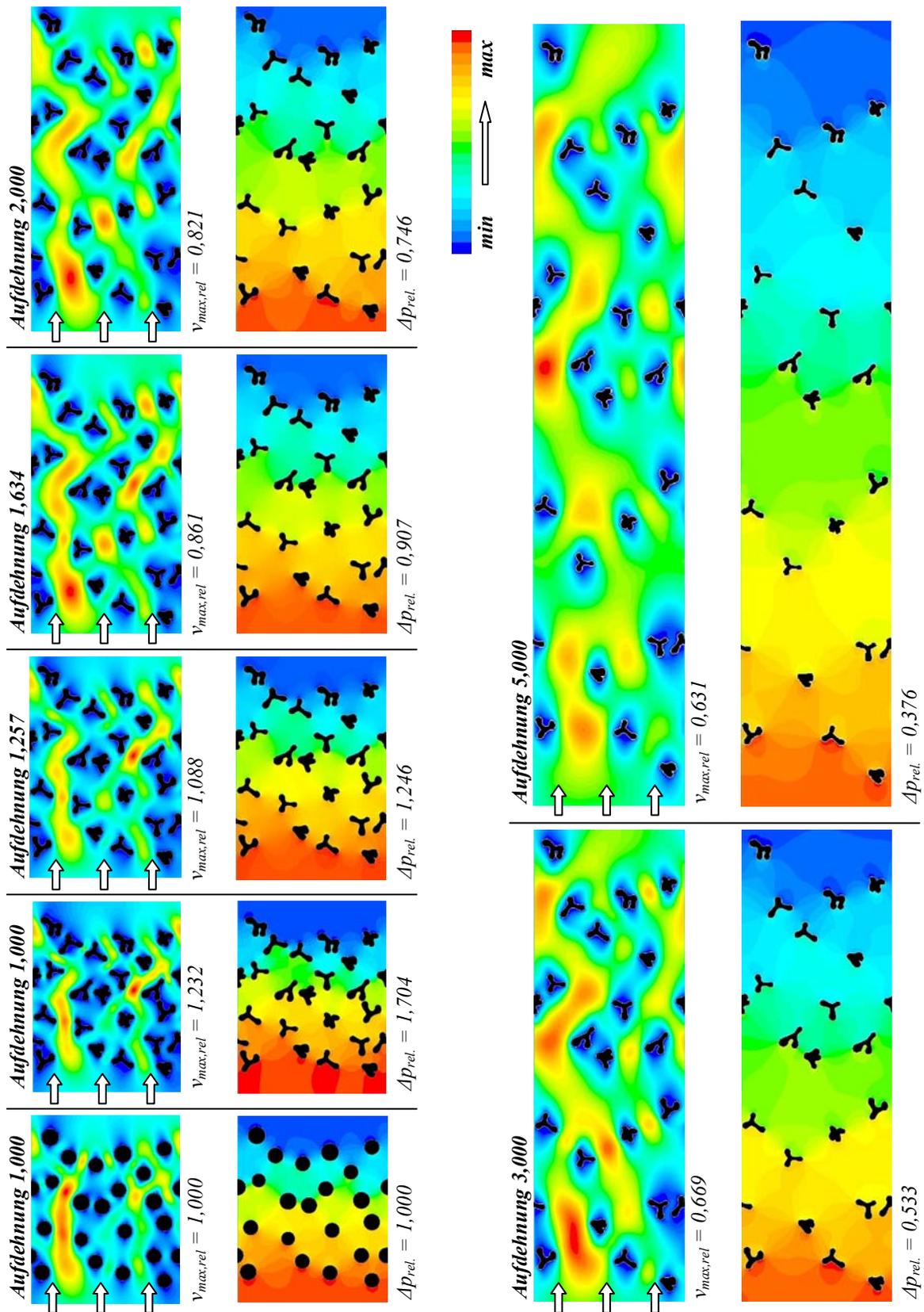


Abbildung 7-24: Geschwindigkeits- und Druckprofile für verschieden stark aufgedehnte Faserschichten multilobaler Fasern im Vergleich zu einer Faserschicht bestehend aus flächengleichen Fasern kreisrunden Querschnitts

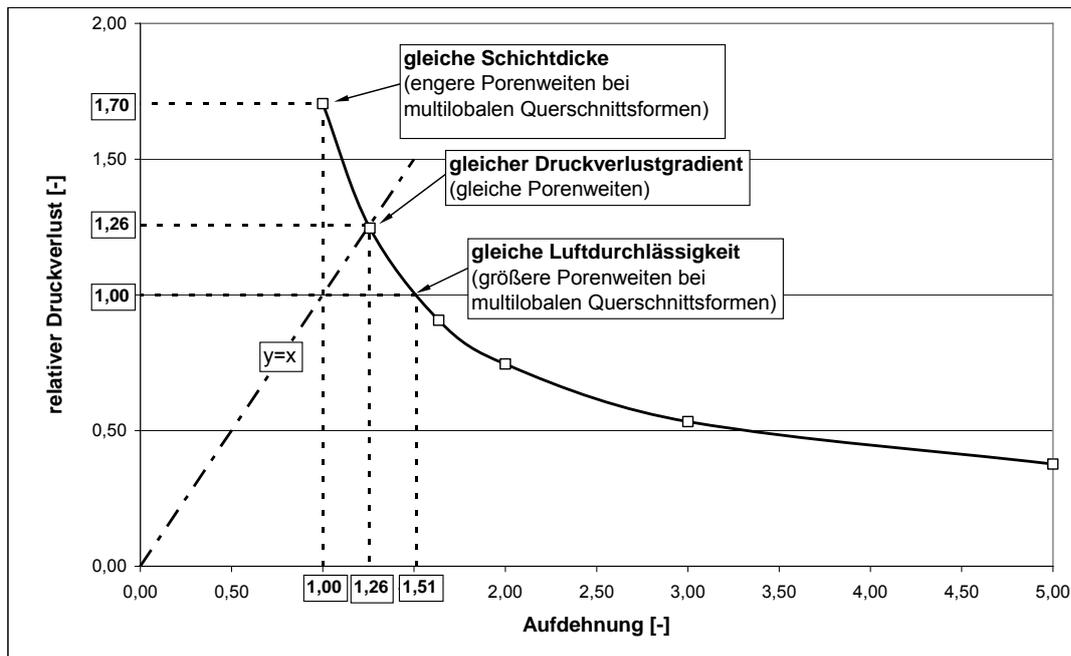


Abbildung 7-25: relativer Druckverlust der Faserschicht bestehend aus Fasern multilobalen Querschnitts (bezogen auf den Druckverlust der Vergleichsfaserschicht kreisrunder Fasern) in Abhängigkeit von der Faserschicht-Aufdehnung

Der Einfluss der Aufdehnung auf den relativen Druckverlust ist in Abbildung 7-25 dargestellt. Mit Aufdehnen der Faserschicht reduzieren sich sukzessive die internen Strömungsgeschwindigkeiten. Der Druckverlust über die Faserschicht sinkt. Für eine unendlich aufgedehnte Faserschicht würden sich die Anströmgeschwindigkeiten der einzelnen Fasern auf die Filterflächenbelastung der betrachteten Faserschicht reduzieren. In einen solchen hypothetischen Fall würden ungestörte Einzelfaserumströmungen vorliegen. Der Druckverlust einer solchen Schicht würde sich in Analogie zu Gleichung (7-8) (Seite 91) aus der Summe der Kraftwirkungen auf die Einzelfasern bezogen auf die Anströmflächen ergeben.

Betrachtet man die Abhängigkeit des relativen Druckverlustes von der Schicht-Aufdehnung genauer, so kann zwischen drei Sonderfällen unterschieden werden:

### Gleiche Schichtdicke

Bei gleicher Schichtdicke ergeben sich für Faserschichten aus multilobalem Fasermaterial aufgrund der größeren projizierten Faserdurchmesser sowie höherer

innerer Strömungsgeschwindigkeiten auch höhere Werte für den Leerdruckverlust im Vergleich zur Referenzfaserschicht aus flächengleichen Fasern kreisrunden Querschnitts. Die Schicht aus multilobalem Fasermaterial verfügt jedoch bei gleicher Schichtdicke über engere Poren, wodurch es bei einer Staubbeaufschlagung zu einer geringeren Staubeinlagerung sowie zu einem geringeren Staubdurchtritt kommt. Die mittlere Reingasstaubkonzentration sinkt.

### **Gleicher Druckverlustgradient**

Dehnt man den Modellfilz in Durchströmungsrichtung auf sinkt der Durchströmungswiderstand der Faserschicht. Ein gleich großer Druckverlustgradient über die Faserschicht ist dann erreicht, wenn sich pro Schichtdicke ein gleich großer (hoher) Druckabfall ergibt. Es ergeben sich für die Schicht aus Fasern multilobalen Querschnitts durchschnittlich gleich große Porenweiten wie bei der Vergleichsfaserschicht aus Fasern kreisrunden Querschnitts. Der Unterschied der dickeren Faserschicht aus multilobalen Fasern zur Vergleichsfaserschicht mit Fasern kreisrunden Querschnitts besteht nun darin, dass neben den Poren auch die Strömungstotzonen als zusätzliches Partikelspeichervolumen zur Verfügung stehen. Lagert sich in beiden Filzen eine gewisse Menge an Staub ein, so ist bei dem Filz mit Fasern kreisrunden Querschnitts, aufgrund des geringeren Speichervermögens, ein größerer Anstieg des Restdruckverlusts zu erwarten.

### **Gleicher Leerdruckverlust**

Um gleiche Luftdurchlässigkeit bei der Faserschicht aus multilobalen Fasern und bei der Vergleichsschicht bestehend aus Fasern kreisrunden Querschnitts zu erhalten, muss die Faserschicht aus multilobalen Fasern um 51 % (Abbildung 7-25) aufgedehnt werden. Vergleicht man den mittels Strömungssimulation erhaltenen Wert der Aufdehnung von 1,51, bei dem man eine gleiche Luftdurchlässigkeit für die Faserschicht aus multilobalen Fasern im Vergleich zur Faserschicht aus Fasern kreisrunden Querschnitts erhält, mit dem Verhältnis der vermessenen Dicken der untersuchten Nadelfilze gleicher Luftdurchlässigkeit von 1,53 (siehe Tabelle 7-1,

Seite 85), so zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Simulationsergebnissen und der Filtermittelprüfung.

Bei gleicher Luftdurchlässigkeit besitzt die Faserschicht aus multilobalen Fasern weitere Poren als die Vergleichsfaserschicht bestehend aus runden Fasern mit gleicher Querschnittsfläche. Aufgrund der weiteren Poren kann Staub bei gleicher Luftdurchlässigkeit in die Faserschicht aus multilobalem Fasermaterial bevorzugt während der Filtrationseingangsphase leichter eindringen. Bei Filtermedien die aus multilobalem Fasermaterial gefertigt sind, kommt es aus diesem Grund zu höheren Reststaubmassen. Die Oberflächenfiltrationsversuche haben deutlich gezeigt (siehe Abbildung 7-22, Seite 101), dass der negative Einfluss einer erhöhten Staubeinlagerung auf den Restdruckverlust durch den Speichereffekt der Strömungstotzonen egalisiert wird.

Empfehlung: Aufgrund der Simulationsergebnisse und deren Bestätigung durch entsprechende Filtermittelprüfungen sind Nadelfilze bestehend aus Fasern mit multilobalen Querschnittsformen auf geringere Luftdurchlässigkeiten als vergleichbare Nadelfilze aus Fasern kreisrunden Querschnitts zu fertigen. Wird derselbe Druckverlustgradient wie bei einem Vergleichsnadelfilz bestehend aus Fasern kreisrunden Querschnitts zumindest in den oberflächennahen Faserschichten eingehalten, erhält man Nadelfilze die anströmseitig über vergleichbare Porengrößen verfügen, jedoch zusätzlich den Speichereffekt der Strömungstotzonen zur Staubeinlagerung nützen können.

In den vorangegangenen Kapiteln wurde der Einfluss multilobaler Faserquerschnittsformen auf den Aufbau eines Nadelfilzes, das Staubeinlagerungsverhalten und damit verbunden auf die Restdruckverlustentwicklung eingegangen. Es stellt sich nun die Frage, ob multilobal geformtes Fasermaterial auch einen positiven Effekt auf die Partikelabscheidung zeigt. Dazu sollen in Analogie zu Fraktionsabscheidungsgradmessungen an Tiefenfiltermedien Tiefenfiltrationsversuche an einem dafür adaptierten Filtermittelprüfstand durchgeführt werden.

## 7.5 Tiefenfiltrationsversuche

Bei Filterprüfungen nach VDI Richtlinie 3926 wird die Reingasstaubkonzentration gravimetrisch mittels Auswägen des während des Versuchs an einem Absolutfilter gesammelten Staubs bestimmt. Die dabei bestimmte Reingasstaubkonzentration entspricht dabei einer mittleren Staubkonzentration während der Einlaufphase eines Filtermediums. Bei dieser Bestimmungsmethode gehen Informationen über die Größenverteilung des in das Reingas gelangenden Staubs verloren. Des Weiteren kann nicht zwischen direkter Partikelpenetration von Staubpartikeln und indirekter Penetration, welche durch ein Loslösen bereits abgeschiedenen Staubs ausgelöst wird, unterschieden werden. Um den Einfluss multilobaler Faserquerschnittsformen auf die Partikelabscheidung besser bewerten zu können, wurden an unbestaubten Filtermedien die Fraktionsabscheidegrade mit Hilfe eines Streulichtpartikelzählers gemessen. Für die Fraktionsabscheidegradmessungen wurde der VDI 3926 Typ 2 Filtermittelprüfstand, wie in Abbildung 7-26 schematisch dargestellt, adaptiert.

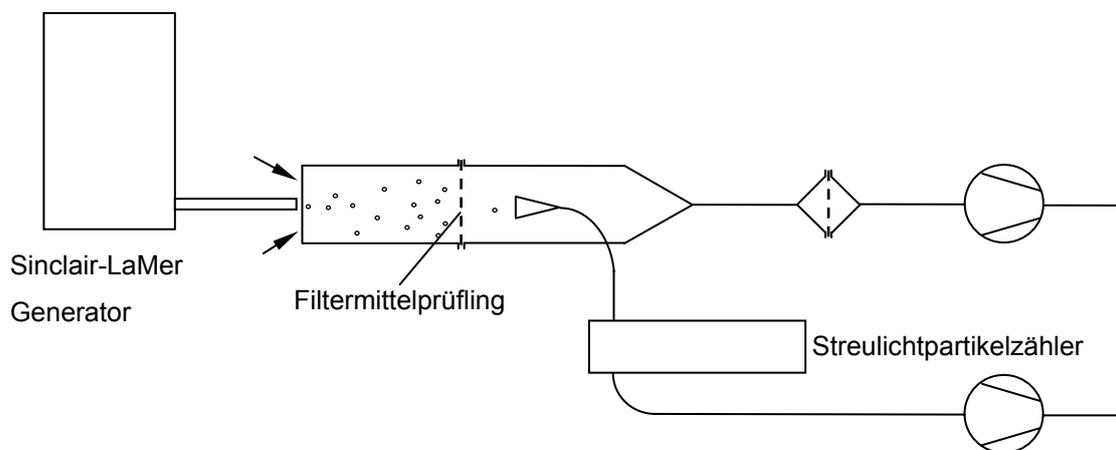


Abbildung 7-26: für Tiefenfiltrationsversuche adaptierter VDI 3926 Typ 2 Prüfstand zur Messung von Fraktionsabscheidegraden von Filtermedien

Um den Einfluss elektrostatischer Ladungen möglichst gering zu halten fand anstelle des in VDI Richtlinie 3926 vorgeschlagenen Bürstendosierers ein Sinclair-LaMer Generator Einsatz. Dieses Gerät verdampft eine einstellbare Menge einer schwer flüchtigen, ölartigen Substanz (Di-2-Ethylhexyl-Sebacat, DEHS) und kondensiert diese an einer vorgegebenen Anzahl von NaCl- Kondensationskeimen. Dadurch ist es möglich ein annähernd monodisperses Aerosol mit einstellbarer Tropfengröße

herzustellen. Kondensationsaerosole sind aufgrund des Herstellungsprinzips nahezu vollständig elektrostatisch ungeladen, wodurch etwaige elektrostatische Wechselwirkungen zwischen Fasermaterial und Aerosol vernachlässigt werden können. Die sich ergebenden Abscheidegrade hängen demnach hauptsächlich von der Struktur der eingesetzten Filtermedien ab. Einmal abgeschiedene Tröpfchen benetzen die Faseroberfläche und werden unter der Bedingung einer geringen Beladung des Filtermediums mit Testaerosol sich auch nicht wieder von den Fasern abblasen. Mit Hilfe dieser Überlegungen kann der Haftanteil nach Gleichung (3-2) (Seite 10) näherungsweise 1 angenommen werden. Die Partikelanzahlkonzentration wurde über eine Teilstromentnahme mit Hilfe eines Streulichtpartikelzählers sowohl im Reingas  $c_{\text{rein}}(x)$  als auch im Rohgas  $c_{\text{roh}}(x)$  gemessen. Für die Penetration  $P(x)$  bzw. den Fraktionsabscheidegrad  $T(x)$  und die gemessenen Partikelanzahlkonzentrationen gilt folgender Zusammenhang:

$$P(x) = 1 - T(x) = \frac{c_{N,\text{rein}}(x)}{c_{N,\text{roh}}(x)} \quad (7-13)$$

$P(x)$	<i>Penetration als Funktion der Partikelgröße <math>x</math> [-]</i>
$T(x)$	<i>Fraktionsabscheidegrad [-]</i>
$c_{N,\text{rein}}(x)$	<i>Partikelanzahlkonzentration im Reingas [<math>m^{-3}</math>]</i>
$c_{N,\text{roh}}(x)$	<i>Partikelanzahlkonzentration im Rohgas [<math>m^{-3}</math>]</i>
$x$	<i>Partikelgröße [<math>\mu m</math>]</i>

### **Penetrationsmessungen an unbestaubten Filtermedien**

Als erstes sollen die Penetrationen  $P(x)$  in Abhängigkeit der Partikelgröße für das Filtermedienpaar FM3 (multilobal) und FM4 (rund) (Tabelle 5-1 Seite 43), welches auf gleiche Luftdurchlässigkeit gefertigt wurde, verglichen werden (Abbildung 7-27). Im Bereich des Abscheideminimums zeigen beide Filtermedien erhöhte Penetrationen. In diesem Partikelgrößenbereich steht bei einem nahezu ungeladenen Tröpfchenaerosol hauptsächlich der Sperreffekt als relativ schwacher Abscheidemechanismus zur Verfügung.

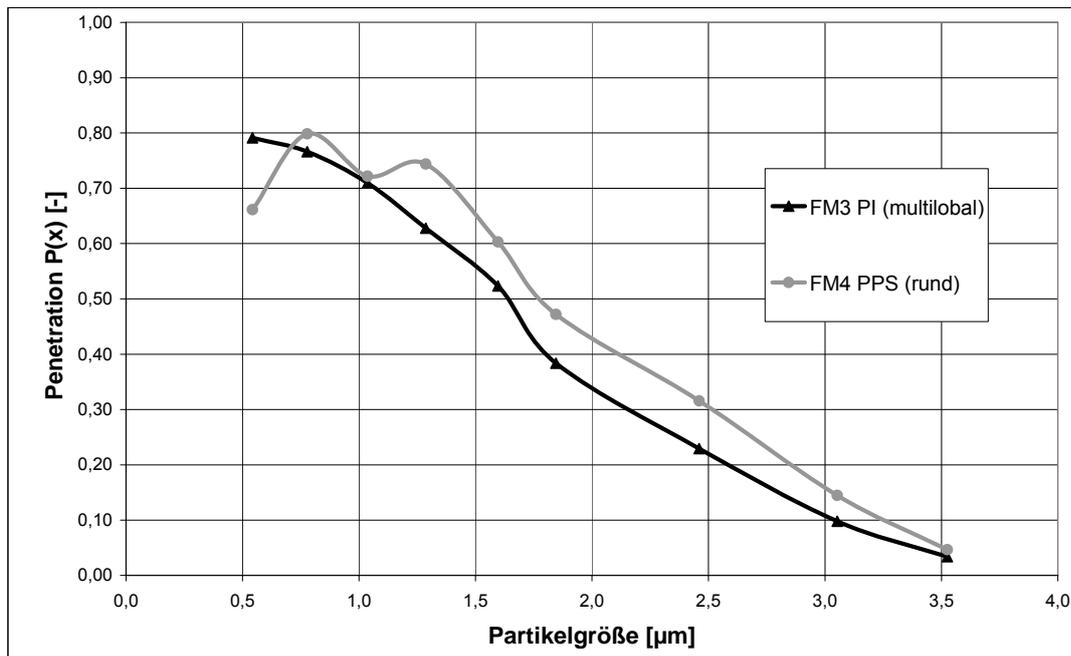


Abbildung 7-27: Penetration durch die unbestaubten Filtermedien FM3 PI (multilobal) und FM4 PPS (rund) in Abhängigkeit von der Partikelgröße

Bei größeren Partikeln ist eine Verbesserung der Abscheidung feststellbar, der Trägheitseffekt wird vorherrschend. Es zeigt sich, dass hier das Filtermedium aus multilobalem Fasermaterial mit zunehmender Partikelgröße besser abscheidet als das Filtermedium bestehend aus Fasern kreisrunden Querschnitts.

Dieses Verhalten kann deutlicher dargestellt werden, indem man die Penetrationen  $P(x)$  für beide Medien ins Verhältnis setzt (Abbildung 7-28, nächste Seite). Bei gleicher Luftdurchlässigkeit besitzt FM3 PI (multilobal), wie im vorherigen Kapitel beschrieben, größere Poren im Vergleich zu Filtermedium FM4 PPS (rund) (siehe auch Tabelle 5-2, Seite 44). Da hier hauptsächlich der Sperreffekt zum Tragen kommt ist das Filtermedium mit den kleineren Poren FM4 (rund) natürlich im Vorteil. Es zeigt sich jedoch, dass die Trägheitsabscheidung stärker durch das multilobal geformte Fasermaterial mit zunehmender Partikelgröße bei FM3 PI (multilobal) unterstützt wird. Trotz der größeren Porenweiten überwiegt die verstärkte Trägheitsabscheidung bei Filtermedium FM3 (multilobal).

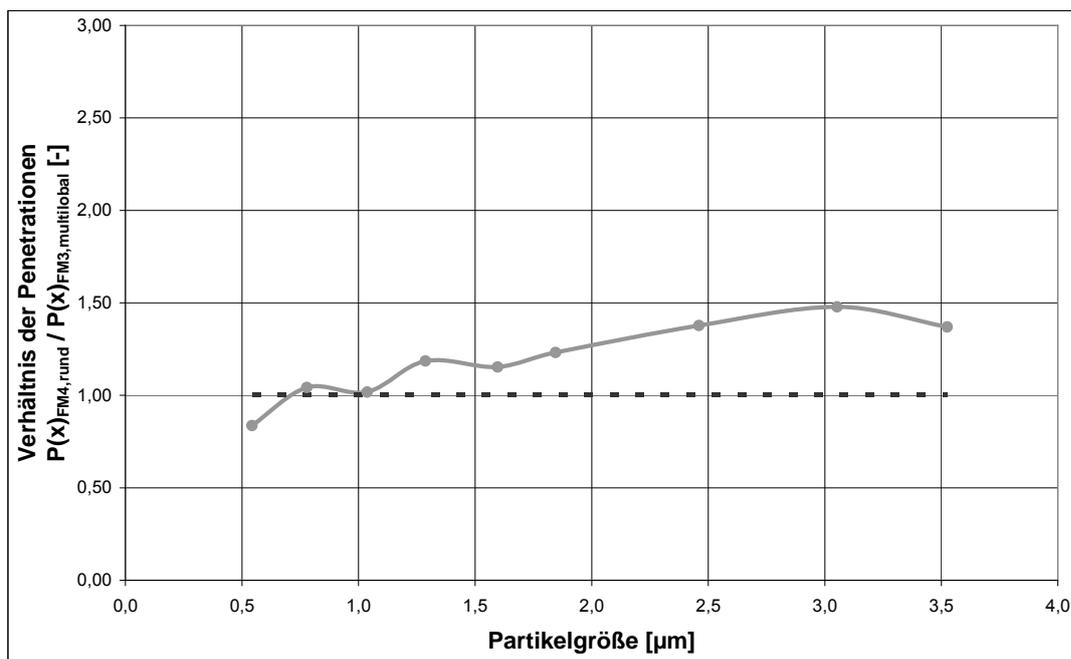


Abbildung 7-28: Verhältnis der Penetrationen der unbestaubten Filtermedien FM3 PI (multilobal) und FM4 PPS (rund) in Abhängigkeit von der Partikelgröße

Eine mögliche Erklärung für die verstärkte Trägheitsabscheidung im untersuchten Partikelgrößenbereich könnte ein Hineinschießen der Aerosoltröpfchen in die Strömungstotzonen sein. Befindet sich einmal ein Aerosoltröpfchen bzw. Staubteilchen im Bereich niedriger Strömungsgeschwindigkeit (Totzonen) ist die Wahrscheinlichkeit (aufgrund der längeren Verweilzeit) größer mit der Kollektoroberfläche in Berührung zu treten und damit abgeschieden zu werden.

Das Ergebnis aus den Fraktionsabscheidegradmessungen für das Filtermedienpaar FM1 PI (multilobal) und FM2 PPS (rund) (Tabelle 5-1, Seite 43), welche annähernd gleich große Poren besitzen (Tabelle 5-2, Seite 44), ist in Abbildung 7-29 (nächste Seite) dargestellt.

Aufgrund der annähernd gleichen Porengröße starten beide Filtermedien im Bereich des Abscheideminimums von Filtermedien bei 0,5 µm mit annähernd dem gleichen Wert für den Fraktionsabscheidegrad. Auch hier zeigt sich, dass das Medium aus multilobalem Fasermaterial mit zunehmender Partikelgröße besser abscheidet, als das Medium bestehend aus kreisrunden Fasern. Das Verhältnis der Penetrationen für FM1 und FM2 ist in Abbildung 7-30 (nächste Seite) dargestellt.

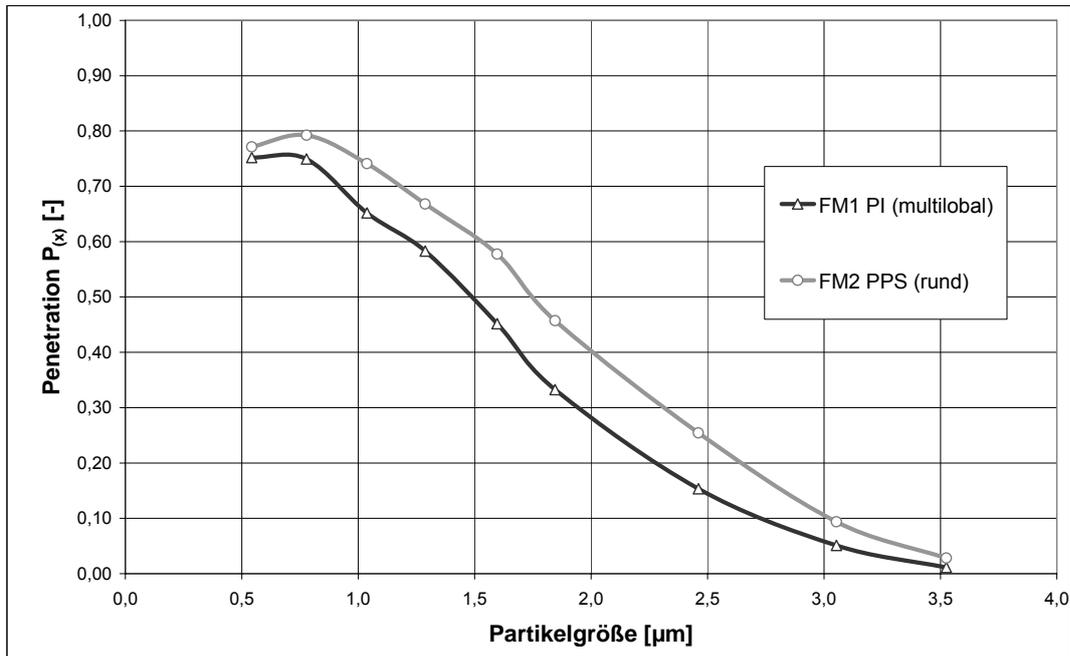


Abbildung 7-29: Penetration durch die unbestaubten Filtermedien FM1 PI (multilobal) und FM2 PPS (rund) in Abhängigkeit von der Partikelgröße

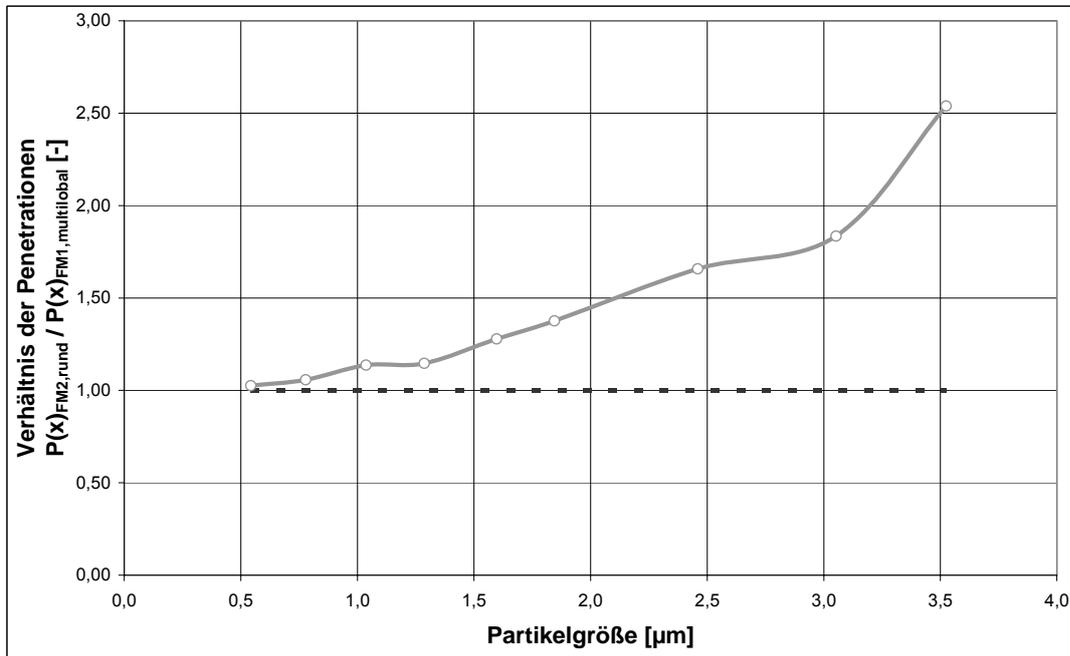


Abbildung 7-30: Verhältnis der Penetrationen der unbestaubten Filtermedien FM1 PI (multilobal) und FM2 PPS (rund) in Abhängigkeit von der Partikelgröße

Aus Abbildung 7-30 ist ersichtlich, dass das Verhältnis  $P(x)_{\text{FM2,rund}}/P(x)_{\text{FM1,multilobal}}$  mit wachsender Tröpfchengröße noch stärker ansteigt als bei dem Filtermedienpaar

gleicher Luftdurchlässigkeit (FM3 und FM4). Da bei beiden Filtermedien die Teilchen gleichlange Wege zur Faseroberfläche zurückzulegen haben, wirkt sich die erhöhte Trägheitsabscheidung bei multilobalem Fasermaterial deutlich aus. Es zeigt sich, dass Filtermedien bestehend aus Fasern mit multilobalen Querschnitten besser Staub im untersuchten Partikelgrößenbereich abscheiden als vergleichbare Nadel-  
filze bestehend aus Fasern kreisrunden Querschnitts.

### **Penetrationsmessungen an bestaubten Filtermedien**

Während des Einsatzes von Abreinigungsfiltermedien bildet sich in den oberflächennahen Faserschichten eine Staubeinlagerungsschicht aus, wodurch sich der Abscheidegrad eines Filtermediums verbessert. Der Partikeldurchtritt durch das Filtermedium sinkt. Dabei kommt es jeweils unmittelbar nach der Regeneration des Filtermediums zu einem vermehrten Staubdurchtritt. Es ist nun von Interesse, ob der Vorteil einer verstärkten Trägheitsabscheidung bei Filtermedien bestehend aus Fasern multilobalen Querschnitts im Vergleich zu einem Filtermedium bestehend aus Fasern kreisrunden Querschnitts im zeitlichen Verlauf erhalten bleibt. Dazu wurden in einer Versuchsreihe an Filtermittelproben von FM3 PI (multilobal) und FM4 PPS (rund) Filtrationsversuche nach verschiedenen Zyklenzahlen (1, 2, 3, 5, 10, 20 u. 100), jeweils nach der Abreinigung, abgebrochen. Danach wurde mit Hilfe des zu einem Tiefenfilterprüfstandes umgebauten Filtermittelprüfstandes (siehe Abbildung 7-26, Seite 110) die Penetrationskurven gemessen. In Abbildung 7-31 (nächste Seite) sind die Ergebnisse für die Penetrationsmessungen von bestaubten Filtermedien zusammengefasst.

Die bestaubten Filtermedien zeigen mit zunehmender Zyklenzahl einen deutlich reduzierten Partikeldurchtritt im Vergleich zu den unbestaubten Filtermedien. Durch die Ausbildung einer oberflächennahen Verstopfungsschicht, die offensichtlich auch nach der Druckstoßabreinigung der Filtermedien erhalten bleibt, wird ein weiteres Eindringen von Staub reduziert. Aus diesem Grund sinkt der Anteil an feinen Partikeln die durch direkte Penetration das Filtermedium durchwandern. Infolge verbessert sich die Staubabscheidung des Filtermediums. Das Verhältnis der Penetrationen von FM4 PPS (rund) zu FM3 PI (multilobal) ist in Abbildung 7-32 (nächste Seite) dargestellt.

## Einfluss multilobaler Faserquerschnittsformen auf die Struktur und das Filtrationsverhalten von Abreinigungsfiltermedien

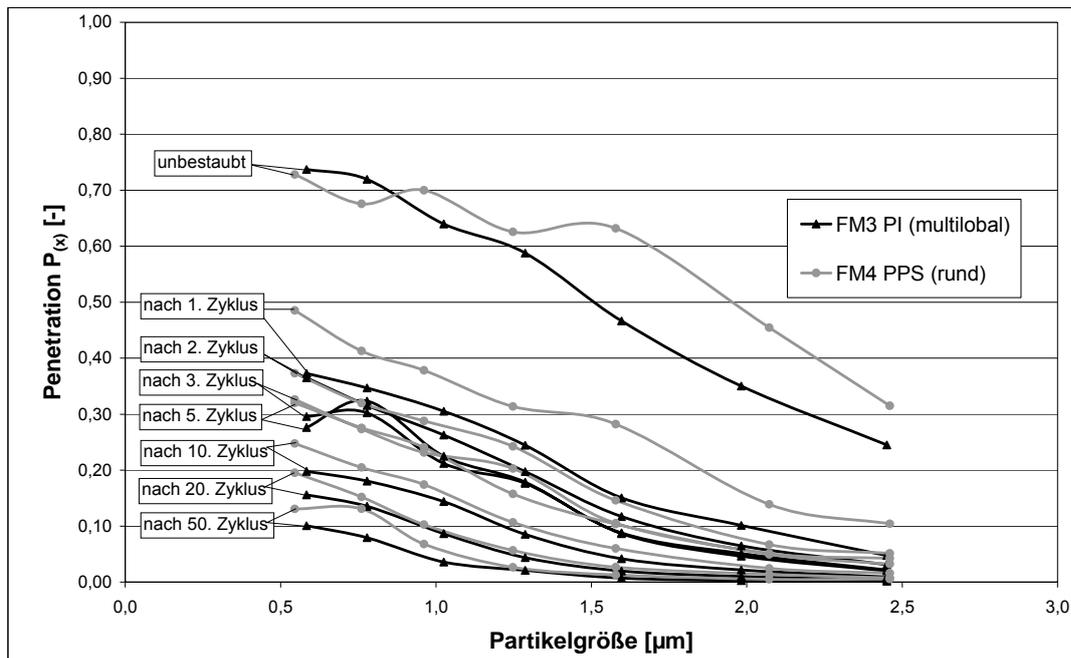


Abbildung 7-31: Penetration durch die bestaubten Filtermedien FM3 PI (multilobal) und FM4 PPS (rund) in Abhängigkeit von der Partikelgröße und der Zyklanzahl

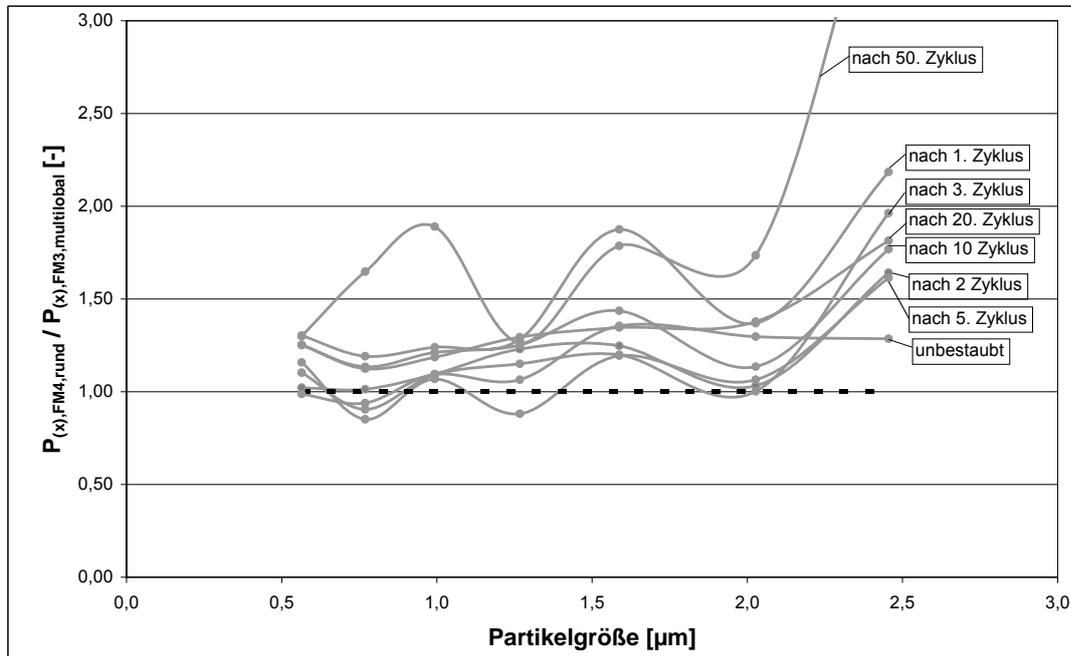


Abbildung 7-32: Verhältnis der Penetrationen der bestaubten Filtermedien FM3 PI (multilobal) und FM4 PPS (rund) in Abhängigkeit von der Partikelgröße und der Zyklanzahl

Auch bei den bestaubten Filtermedien zeigt sich eine geringere Penetration mit Zunahme der Partikelgröße beim Filtermedium FM3 bestehend aus PI- Fasern mit

multilobalen Faserquerschnitten gegenüber dem PPS-Filtermedium FM4 aus kreisrundem Fasermaterial gleicher Luftdurchlässigkeit und gleicher Flächenmasse. Die Untersuchungen zeigen, dass auch im bestaubten Zustand ein verstärkter Trägheitseffekt beim Filtermedium aus multilobalem Fasermaterial im Vergleich zum Filtermedium bestehend aus Fasern kreisrunden Querschnitts im untersuchten Partikelgrößenbereich erhalten bleibt.

Im Kapitel *Einfluss multilobaler Faserquerschnittsformen auf die Struktur und das Filtrationsverhalten von Abreinigungsfiltermedien* (Seite 76) wurde zunächst auf die Entstehung und Form multilobaler Faserquerschnitte eingegangen. Multilobale Faserformen besitzen durch ihre gelappten Querschnittsformen im Durchschnitt um ca. 30 % dickere Faserdurchmesser als Fasern mit flächengleichem Kreisquerschnitt. In theoretischen Überlegungen konnte der Einfluss eines größeren Faserdurchmessers auf die Struktur eines Nadelfilzes abgeschätzt werden.

Mit Hilfe von Strömungssimulationen konnten die Unterschiede im Umströmungsfeld multilobaler Fasern im Vergleich zu Fasern mit kreisrundem Querschnitt visualisiert werden. Dabei ergaben sich bei der Umströmung von Fasern mit gelappten (multilobalen) Querschnitten im Vergleich zu Fasern mit kreisrunden Querschnitten größere Bereiche sehr niedriger Strömungsgeschwindigkeit die als Strömungstotzonen bezeichnet wurden. In Strömungssimulationen sowie in Filtermitteltests konnte gezeigt werden, dass in diese strömungsberuhigte Zonen während der Filtration eingelagerter Staub sich aufgrund der dort herrschenden geringen Strömungsgeschwindigkeiten unmaßgeblich auf den Restdruckverlust auswirkt.

Des Weiteren konnten mittels 2D-Simulationen das Durchströmungsverhalten verschieden verdichteter Schichten aus multilobalem Fasermaterial mit Schichten aus Fasern mit kreisrundem Querschnitt verglichen werden.

In Tiefenfiltrationsversuchen wurden die Effekte der sich ergebenden Filtermittelstrukturen auf die Partikelabscheidemechanismen untersucht. Es zeigt sich dabei eine verstärkte Trägheitsabscheidung bei Filtermedien bestehend aus multilobalem Fasermaterial im Vergleich zu Filtermedien bestehend aus Fasern kreisrunden Querschnitts.

## **8 Diskussion der durchgeführten Arbeiten und Ausblick für weiterführende Untersuchungen**

### **Weiterentwicklung der Methode zur Erfassung der Oberflächenstruktur von Abreinigungsfiltermedien mittels Bildanalyse**

Zur Strukturanalyse von oberflächenbehandelten textilen Filtermedien, wurde eine auf Durchlichtmikroskopie basierende Bildanalysemethode entwickelt. Im Durchlicht erscheinen Poren durch die Staub in das Filtermedium eindringen kann, im Vergleich an der Filtermitteloberfläche sich befindlichen Fasern, heller. Durch Binarisierung wird das Farbbild in ein Schwarzweißbild umgewandelt um damit zwischen Poren und den sie begrenzenden Fasern besser unterscheiden zu können. Infolge werden sowohl die Oberflächenporosität als auch die dazugehörige Porengrößenverteilung erfasst. Zusätzlich zu den Porendurchmessern wird die Tiefenverteilung der Poren bildoptisch vermessen. Mit Hilfe der entwickelten durchlichtmikroskopischen Messmethode können Strukturparameter zur Beschreibung des von außen einsehbaren oberflächennahen Porensystems ermittelt werden.

Stellt man den Ergebnissen aus der Strukturanalyse die Ergebnisse aus Filtermittelprüfungen zur Oberflächenfiltration an einem Filtermittelprüfstand nach VDI 3926 Typ 2 gegenüber, ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der mittleren Reingasstaubkonzentration und der effektiven Oberflächenporosität. Die effektive Oberflächenporosität ergibt sich aus der Summe der Poren mit Durchmessern größer als ein Blockadedurchmesser, bezogen auf die GesamtfILTERfläche. Unter Blockadedurchmesser wird jener Porendurchmesser verstanden, unter dem es zu keinem Staubburchtritt durch die Pore kommt. Dies kann durch eine schnelle Ausbildung von Staubrücken über den Poren während der Filtration bzw. ein Verstopftbleiben kleinerer Poren trotz Abreinigung erklärt werden. Die effektive Oberflächenporosität kann als offene Durchtrittsfläche für den Staub angesehen werden.

Der Blockadedurchmesser wird über eine iterative Regressionsrechnung ermittelt. Unter Voraussetzung gleicher Versuchsbedingungen und unter Verwendung des gleichen Teststaubs ergibt sich für verschiedene, oberflächenbehandelte, textile

Filtermedien annähernd der gleiche Wert für den Blockadedurchmesser. Damit kann die Abhängigkeit der Reingasstaubkonzentration von der effektiven Oberflächenporosität, die mittels des Blockadedurchmessers berechnet wird, und einer Staubdurchtrittskonstanten beschrieben werden. Weiters kann mit Hilfe einer Porentiefenverteilungsmessung und der ermittelten Oberflächenporosität ein sogenanntes Porenvolumenäquivalent ermittelt werden. Es konnte gezeigt werden, dass sich für die gewählten Testbedingungen ein linearer Zusammenhang zwischen Porenvolumenäquivalent und eingelagerter Staubmasse ergibt. Es kann somit jeweils mit einer linearen Beziehung, welche die gegebenen Testbedingungen widerspiegelt, der Staubdurchtritt und das Staubeinlagerungsvermögen in Abhängigkeit von den bildanalytisch gewonnenen Kenngrößen für unterschiedlich oberflächenbehandelte textile Filtermedien vergleichsweise abgeschätzt werden.

### **Einfluss elektrostatischer Ladungen des Fasermaterials auf das Staubabscheideverhalten textiler Abreinigungsfiltermedien**

Um den Einfluss elektrostatischer Ladungen des Fasermaterials von Nadelfilzen auf das Abscheideverhalten bezüglich eingelagerter Staubmasse, Restdruckverlust und sich ergebende Reingasstaubkonzentration abschätzen zu können, wurde versucht den Ladungszustand der Fasern zu erhöhen. Ziel der durchgeführten Versuche war es abzuklären, ob es dabei zu einem strukturell andersartigen Aufbau des Partikel-Faser-Layers an der Anströmseite des Filtermediums mit Auswirkung auf den sich einstellenden Restdruckverlust kommt und wie sich ein erhöhter Ladungszustand auf die Reingasstaubkonzentration auswirkt.

Dazu wurden Bestäubungsversuche an gleichartigen Filtermedien durchgeführt. Als erster Schritt erfolgte eine Aufladung der Filtermedien mit Hilfe einer im Zuge des Forschungsprojekts entwickelten Aufladeapparatur. Mittels Kondensatormessmethode konnte an aus den Prüflingen herauspräparierten Fasern eine Erhöhung des Ladungszustandes der geladenen Filtermedien durch Vergleich mit Fasern aus ungeladenen Medien nachgewiesen werden. Zusätzlich wurde zur Dokumentation des Ladevorganges der während des Aufladens von den Entladungsspitzen emittierte Strom (Koronastrom) aufgezeichnet. Aus dem Verlauf des Koronastromes lässt sich auf eine Veränderung des Ladungszustandes der Filtermedien schließen.

Dadurch ist es möglich neben der Kondensatormessmethode ein zerstörungsfreies qualitatives Verfahren zu Bewertung des Ladungserfolges der geladenen Filtermedien einzusetzen. Je nach Ladbarkeit des Mediums kommt es anfänglich zu einer Erhöhung des Koronastromes (bis zum Vierfachen des Leerlaufstromes ohne Filtermedium), welcher bis auf einen stationären Wert, der einer maximalen Aufladung des Materials bei den gewählten Versuchsbedingungen (Anzahl der Sprühelektroden, Abstand der Sprühelektroden zur Niederschlagselektrode und angelegte Spannung) entspricht, abfällt. Es zeigte sich bei gut ladbaren Fasermaterialien ein ausgeprägter Verlauf der Stromkurve im Vergleich zu schlecht ladbaren Fasermaterialien, bei denen sich der Koronastrom kaum änderte. Die untersuchten Fasermaterialien (PI, PPS und PES) zeigen ein stark von einander abweichendes Ladeverhalten. Während bei PES- Nadelfilzen kaum eine Veränderung im Stromfluss zu verzeichnen ist (kaum ladbar), stellt sich bei Polyimid-Nadelfilzen ein merklich höherer Koronastrom (ladbar) ein als es dem Stromfluss ohne Filtermedium entspricht. Die stärkste Ladeaktivität zeigen PPS-Nadelfilze während des Ladevorganges (gut ladbar).

Aus den Bestäubungsversuchen ergeben sich für geladene Filtermittel im Vergleich zu Filtermedien im nicht aufgeladenen Zustand nahezu deckungsgleiche Verläufe der Druckverlustkurven. Man erhält nahezu gleiche Werte für den Restdruckverlust und nur um ca. 2% höhere Staubeinlagerungen. Da es zu keiner merklichen Veränderung im Restdruckverlustverhalten kommt, ist auf eine ähnliche Ausbildung des PF-Layers im Vergleich zu einem Filtermedium im Ausgangsladungszustand zu schließen. Aus den Untersuchungen geht hervor, dass damit ein erhöhter Ladungszustand des Fasermaterials einen eher untergeordneten Effekt auf die Struktur der Staubeinlagerungsschicht ausübt. Dieses Verhalten ist darauf zurückzuführen, dass die großen im PF-Layer eingelagerten Staubmengen zu einer relativ raschen Kompensation bzw. Abschirmung der Ladungen durch eingelagerte Partikel führen.

Für die sich einstellende mittlere Reingasstaubkonzentration ergibt sich ein konträres Bild. Die Menge an Staub die bei einem Nadelfilz ins Reingas gelangt ist im Vergleich zur abgeschiedenen bzw. im PF-Layer eingelagerten Staubmasse außerordentlich gering. Dabei können Partikel entweder direkt durch Poren in der Staubeinlagerungsschicht ins Reingas gelangen oder es können sich bereits im

Filtermedium abgeschiedene Partikel wieder von den Fasern ablösen, in tiefer liegende Faserschichten und dort durch Tiefenfiltrationsmechanismen erneut abgeschieden werden. Durch den Ladeprozess werden auch diese tiefer gelegenen Faserschichten elektrostatisch aufgeladen und können als nachgeschaltetes Tiefenfiltermedium fungieren. Vergleicht man die mittlere Reingasstaubkonzentration der geladenen Nadelfilze mit der von ungeladenen Nadelfilzen, ergibt sich eine zum Teil deutliche Reduktion der mittleren Reingasstaubkonzentration (bis um den Faktor 7). Der verbesserte Reingaswert ist auf eine elektrostatisch verstärkte Tiefenfiltration der genannten Faserschichten des Filtermediums zurückzuführen.

### **Einfluss multilobaler Faserquerschnittsformen auf die Struktur und das Filtrationsverhalten von Abreinigungsfiltermedien**

Bei der Umströmung von Fasern mit gelappten (multilobalen) Querschnitten wie sie bei Polyimid- Fasern anzutreffen sind ergeben sich im Vergleich zu Fasern mit kreisrunden Querschnitten (bzw. aus Polyphenylensulfid) größere Bereiche sehr niedriger Strömungsgeschwindigkeit die als Strömungstotzonen bezeichnet werden können. Der in diese Bereiche während der Filtration eingelagerte Staub wirkt sich aufgrund der dort herrschenden geringen Strömungsgeschwindigkeiten nur schwach auf den Restdruckverlust aus.

Füllt man modellhaft diese strömungsberuhigten Zonen mit Staub auf und berechnet die Umströmungsprofile neu, erhöht sich die Kraftwirkung auf die Faser und damit der Druckverlust nur marginal. Diese Bereiche können somit als Speicherbereiche der Fasern, in welche sich Staub ohne einen wesentlichen Einfluss auf den Durchströmungswiderstand einlagern kann, aufgefasst werden. Bei Fasern mit Kreisquerschnitten bilden sich ebenfalls Strömungstotzonen aus, die jedoch im Vergleich zu Fasern multilobalen Querschnitts wesentlich kleiner sind. Dadurch kann lediglich eine geringere Staubmenge, ohne wesentlichen Einfluss auf den Umströmungswiderstand zu nehmen, eingelagert werden.

Diese Bereiche konnten mittels Computersimulation nachgebildet werden und der Effekt der Staubeinlagerung in diese Bereiche auf die Kraftwirkung auf eine Einzelfaser und somit der Einfluss auf den Druckverlust abgeschätzt werden. Es zeigt sich, dass eine gleich große Menge an angelagertem Staub bei Fasern mit

multilobalen Querschnitten zu einer geringeren Erhöhung der Kraftwirkung auf die Fasern führt als bei Fasern mit kreisförmigen Querschnitten.

Der Vergleich mit Fasern flächengleichen Kreisquerschnitts ergibt für die Einzelfaserumströmung von gelappten Fasern, aufgrund der größeren projizierten Anströmdurchmesser, proportional höhere Widerstandskräfte.

Weiters konnte durch Messungen des Leerdruckverlusts an den untersuchten Nadelfilzproben in Abhängigkeit von der Filterflächenbelastung und mittels durchgeführter Durchströmungssimulationen gezeigt werden, dass bei PI- Nadelfilzen die aus Fasern mit multilobalen Querschnitten aufgebaut und dadurch dicker sind, sich ähnliche Werte für den Durchströmungswiderstand ergeben, wie für die dünneren PPS- Vergleichsfilze mit runden Faserquerschnitten.

### **Einfluss der Faserform auf die Partikelabscheidung**

Zur Untersuchung des Einflusses der Faserform auf die Partikelabscheidung und auf die wirksamen Abscheidemechanismen sowie zur Verifizierung der Simulationsergebnisse wurden zusätzlich Abscheidegradmessungen in Analogie zu Tiefenfiltrationsmessungen durchgeführt. Für die Versuche wurde ein Filtermittelprüfstand nach VDI 3926 Typ 2 wie folgt adaptiert. Als neue Aerosolquelle fand anstelle des konventionellen Staubdosierers (Bürstendosierer) ein Sinclair-LaMer Generator Einsatz. Damit ist es möglich ein nahezu monodisperses Aerosol mit einstellbarer Partikelgröße (0,5 - 8  $\mu\text{m}$ ) bereitzustellen. Anstelle der Ermittlung einer mittleren Reingasstaubkonzentration durch Auswägen der an einem Absolutfilter abgeschiedenen Staubmasse wurden die Partikelanzahlkonzentrationen mit Hilfe eines Streulichtpartikelzählers sowohl im Rohgas als auch im Reingas bestimmt. Aus dem Verhältnis der Reingasanzahlkonzentration zur Rohgasanzahlkonzentration kann für verschiedene Partikelgrößen die jeweilige Partikelpenetration berechnet werden.

Zuerst wurden die Partikelpenetrationen von unbestaubten Nadelfilzen untersucht. Bei den Messungen zeigten die Nadelfilze aus multilobalem Fasermaterial mit zunehmender Partikelgröße einen geringeren Partikeldurchtritt als die untersuchten Filtermedien bestehend aus Fasern kreisrunden Querschnitts. Da für größere Partikel der dominante Abscheidemechanismus der Trägheitseffekt ist, kann

angenommen werden, dass dieser für multilobale Faserformen früher einsetzt als bei vergleichbaren Filtermedien bestehend aus Fasern kreisrunden Querschnitts.

Für bestaubte Filtermedien zeigen die Testergebnisse einen deutlich reduzierten Partikeldurchtritt. Durch die Ausbildung einer oberflächennahen Verstopfungsschicht, die auch nach der Druckstoßabreinigung der Filtermedien erhalten bleibt, wird ein weiteres Eindringen von Staub in das Filtermedium reduziert. Aus diesem Grund sinkt der Anteil an Partikel die durch direkte Penetration das Filtermedium durchwandern. Auch bei den bestaubten Filtermedien wurde eine geringere Penetration mit Ansteigen der Partikelgröße bei einem Filtermedium bestehend aus PI-Fasern mit multilobalen Faserquerschnitten gegenüber einem PPS- Filtermedium mit kreisrundem Fasermaterial gleicher Luftdurchlässigkeit und gleicher Flächenmasse gefunden. Die Untersuchungen zeigen, dass auch im bestaubten Zustand der Trägheitseffekt stärker von multilobalem Fasermaterial unterstützt wird als von kreisrundem Fasermaterial.

#### **Ausblick für weiterführende Arbeiten**

Einen weiteren wichtigen Aspekt für das Betriebsverhalten von Abreinigungsfiltermedien stellt ihr Langzeitverhalten dar. Zielsetzung einer weitergehenden Grundlagenforschung könnte eine systematische Untersuchung der bei der Alterung von textilen Filtermedien auftretenden Phänomene mittels einer eigens konzipierten Alterungskammer sein.

### Zusammenfassung

Das Betriebsverhalten von Abreinigungsfiltermedien hinsichtlich der sich entwickelnden Reingasstaubkonzentration, des Staubeinlagerungsverhaltens und des sich infolge einstellenden Restdruckverlustes wird durch eine Vielzahl von Einflussgrößen bestimmt. Zu den Einflussgrößen zählen u. a. die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Staubes und des Trägergases, die Eigenschaften des Filtermediums, der apparative Aufbau des Filters sowie die Art der Abreinigung. Unter den Eigenschaften des Filtermediums, welche das Filtrations- bzw. Abreinigungsverhalten nachhaltig bestimmen können, sind u.a. der elektrostatische Ladungszustand und die Querschnittsform des eingesetzten Fasermaterials zu nennen.

In der vorliegenden Forschungsarbeit konnte gezeigt werden, dass ein erhöhter Faserladungszustand sich hauptsächlich auf die Partikelabscheidung jedoch kaum auf Staubeinlagerung und Restdruckverlustentwicklung auswirkt. Der geringe Einfluss auf Staubeinlagerung und Restdruckverlustentwicklung ist auf eine rasche Kompensation bzw. Abschirmung von elektrostatischen Faserladungen in der Staubeinlagerungsschicht erklärbar. Für den Staub im Reingas sind hingegen jene Partikel, welche die Staubeinlagerungsschicht passieren, verantwortlich. Da elektrostatische Faserladungen unterhalb der Staubeinlagerungsschicht weder kompensiert noch durch abgeschiedenes Partikelmaterial abgeschirmt sind, können jene Staubteilchen, welche die Staubeinlagerungsschicht passieren, verstärkt durch elektrostatische Effekte abgeschieden werden.

Das Abscheide- und Regenerationsverhalten von textilen Abreinigungsfiltermedien wird neben dem elektrostatischen Ladungszustand des Fasermaterials von der Struktur oberflächennaher Faserschichten mitbestimmt, wobei den Poren als interne Staubsammelräume und den porenbegrenzenden Fasern als Staubpartikelkollektorenflächen besondere Bedeutung zukommt.

Die oberflächennahe Porenstruktur eines Abreinigungsfiltermediums kann mit Hilfe bildanalytisch gewonnener Strukturparameter beschrieben werden. So kann bei gegebenen Prüfbedingungen die Staubeinlagerung eines Filtermediums mit Hilfe

eines sogenannten Porenvolumenäquivalents, welches an den unbestaubten Filtermedien bestimmt wird, beschrieben werden. Dabei zeigen Filtermedien mit einem großen Porenvolumenäquivalent eine proportional höhere Staubeinlagerung in Vergleich zu Filtermedien mit kleinem Porenvolumenäquivalent.

Mit Hilfe der Bestimmung eines Porendurchmessers (Blockadedurchmesser) unter dem der Staubdurchtritt vernachlässigbar ist, kann aus der Porengrößenverteilung eine reduzierte Oberflächenporosität bestimmt werden. Es zeigte sich wiederum ein linearer Zusammenhang zwischen mittlerer Reingasstaubkonzentration und reduzierter Oberflächenporosität.

Multilobale Faserquerschnittsformen wirken sich nicht nur unmittelbar auf die Strömungsverhältnisse im Bereich jeder einzelnen Filtermittelfaser und damit auf die Partikelabscheidung aus, sondern auch auf die Struktur des gesamten Filtermediums. So weisen Filtermedien bestehend aus Polyimid-Fasern multilobalen Querschnitts eine um ca. 50 % höhere Schichtdicke auf als vergleichbare Filtermedien bestehend aus Fasern kreisrunden Querschnitts mit gleicher Flächenmasse, gleicher Faserquerschnittsfläche und gleicher Luftdurchlässigkeit.

Bei der Umströmung von Polyimid-Fasern mit multilobalen Querschnitten ergeben sich im Vergleich zu Fasern mit kreisrunden Querschnitten größere Bereiche sehr niedriger Strömungsgeschwindigkeit, die als Strömungstotzonen bezeichnet werden können. Der in diese Bereiche während der Filtration eingelagerte Staub wirkt sich aufgrund der dort herrschenden geringen Strömungsgeschwindigkeiten nur schwach auf den Restdruckverlust aus. Diese Bereiche können somit als Speicherbereiche der Fasern, in welche sich Staub ohne einen wesentlichen Einfluss auf den Durchströmungswiderstand einlagern kann, aufgefasst werden. Bei Fasern mit Kreisquerschnitten bilden sich ebenfalls Strömungstotzonen aus, die jedoch im Vergleich zu Fasern multilobalen Querschnitts wesentlich kleiner sind. Dadurch kann lediglich eine geringere Staubmenge, ohne wesentlichen Einfluss auf den Umströmungswiderstand zu nehmen, eingelagert werden.

Vergleicht man die Partikelabscheidung von Filtermedien bestehend aus Fasern mit multilobalen Faserformen mit Filtermedien bestehend aus Fasern kreisrunden Querschnitts so zeigt sich eine Verstärkung der Trägheitsabscheidung bei den Filtermedien bestehend aus Fasern mit multilobalen Querschnittsformen. Dieses

Verhalten kann mit einem Hineinschießen der Partikel in die Strömungstotzonen um multilobal geformte Faserquerschnitte erklärt werden. Befindet sich das abzuschneidende Partikel erstmals in einer Strömungstotzone ist aufgrund der reduzierten Strömungsgeschwindigkeit mit einer erhöhten Abscheidewahrscheinlichkeit in Vergleich zu einer Faser mit kreisförmigen Querschnitt zu rechnen.

Zusammenfassend kann für eine Verbesserung des Betriebsverhaltens hinsichtlich der sich entwickelnden Reingasstaubkonzentration, des Staubeinlagerungsverhaltens und des sich infolge einstellenden Restdruckverlustes, der Einsatz von leicht geladenen, multilobal geformten Polyimid-Fasermaterial empfohlen werden.

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Faserwerkstoffe für Abreinigungsfilter, Auswahl aus [13] .....	22
Tabelle 5-1: untersuchte Filtermedien .....	43
Tabelle 5-2: Strukturparameter der untersuchten Filtermedien .....	44
Tabelle 5-3: Prüfparameter für die Filtermitteltests in Anlehnung an VDI 3926 Typ 2 [34].....	48
Tabelle 6-1: Ladeparameter .....	66
Tabelle 6-2: Ergebnisse zu den Filtermitteltests geladener Filtermedien .....	72
Tabelle 7-1: Einfluss multilobaler Faserquerschnittsformen auf die Dicke eines Nadelfilzes im Vergleich zu Fasern kreisrunden Querschnitts .....	85

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Modell der senkrecht angeströmten zylindrischen Einzelfaser .....	8
Abbildung 3-2: Darstellung der Abscheidemechanismen im Filtermittellinneren .....	11
Abbildung 3-3: verschiedene Phasen der Filtration bei Abreinigungsfiltermedien ....	13
Abbildung 3-4: Betriebsverhalten eines Abreinigungsfiltermediums (schematisch)..	14
Abbildung 4-1: schematischer Aufbau eines Nadelfilzes .....	16
Abbildung 4-2: Mischen und Faservereinzelung in der Wolferei.....	17
Abbildung 4-3: Krempelaggregate .....	18
Abbildung 4-4: Haupttrommel mit Arbeiter-Wender Walzenpaar .....	18
Abbildung 4-5: Tafeln von Faserfloren und Vernadeln des Vlieses .....	19
Abbildung 4-6: Nadeln mit mitgenommenen Fasern beim Durchstechen der Grundplatte einer Nadelmaschine .....	19
Abbildung 4-7: Wasserstrahltechnik (schematische Darstellung).....	20
Abbildung 4-8: Kraft-Dehnungsdiagramm eines Zugversuchs nach DIN 53857.....	26
Abbildung 5-1: oberflächennahe Poren in einem Filtermedium .....	31
Abbildung 5-2: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Oberflächenporosität mittels Durchlichtmikroskopie .....	32
Abbildung 5-3: Umwandlung eines Farbbildes in ein Schwarzweißbild und elliptische Porenapproximation .....	33
Abbildung 5-4: Porenflächendichteverteilung eines Filtermediums .....	36
Abbildung 5-5: Bestimmung der Porentiefen .....	39
Abbildung 5-6: Porentiefenanzahlsummenverteilung (schematisch) eines Nadelfilze .....	40
Abbildung 5-7: Modellporen der analysierten Filtermedien FM1 bis FM7 .....	45
Abbildung 5-8: Porenflächendichteverteilungen $q_2(d_{h,i})$ der untersuchten Filtermedien FM1 bis FM7 .....	46
Abbildung 5-9: Filtermittelprüfstand nach VDI 3926 (Typ 2) .....	47
Abbildung 5-10: Zusammenhang zwischen Reststaubmasse und Porenvolumenäquivalent für die untersuchten Filtermedien FM1 bis FM7 .....	49
Abbildung 5-11: Zusammenhang zwischen der mittleren Reingasstaubkonzentration über 100 Filtrationszyklen und dem mittleren hydraulischen Porendurchmesser der untersuchten Filtermedium FM1 bis FM7 .....	51
Abbildung 5-12: Bestimmung der reduzierten Oberflächenporosität .....	52
Abbildung 5-13: Regressionskoeffizient für die Zuordnung $c_{Reingas} = k_{Emission} \cdot E_{0,red}$ in Abhängigkeit vom gewählten Wert für den Blockadedurchmesser $d_b$ .....	54

Abbildung 5-14: mittlere Reingasstaubkonzentration über 100 Filtrationszyklen in Abhängigkeit von der reduzierten Oberflächenporosität für die untersuchten Filtermedien FM1 bis FM7 .....	55
Abbildung 6-1: verschiedene elektrostatische Wechselwirkungskräfte zwischen Partikeln und Filtermittelfasern.....	58
Abbildung 6-2: Prinzip der Kondensatormessmethode.....	59
Abbildung 6-3: wirkende Kräfte auf eine geladene Faser im Kondensatorspalt.....	60
Abbildung 6-4: homogenes elektrostatisches Feld in einem Plattenkondensator .....	61
Abbildung 6-5: Linienladungsdichteverteilung eines mittels Koronaentladung aufgeladenen Filtermediums.....	64
Abbildung 6-6: Konstruktion und Versuchsaufbau der eingesetzten Aufladeapparatur.....	65
Abbildung 6-7: Verlauf des Koronastromes während der Aufladung unterschiedlicher Nadelfilze .....	67
Abbildung 6-8: Messeinrichtung für Faserladungen (schematisch) .....	69
Abbildung 6-9: lokale Linienladungsdichte entlang einer vermessenen Einzelfaser. 70	
Abbildung 6-10: Linienladungsdichteverteilung eines geladenen Filtermediums und eines Filtermediums im Ausgangsladungszustand (FM4 PPS/PPS) .....	71
Abbildung 6-11: Staubeinlagerung in ein Oberflächenfiltermedium .....	73
Abbildung 6-12: Partikelabscheidung unterhalb der Staubeinlagerungsschicht .....	74
Abbildung 7-1: chemische Struktur von Polyimid.....	77
Abbildung 7-2: Entstehung eines multilobalen Faserquerschnittes .....	77
Abbildung 7-3: Querschnittsformen multilobaler Polyimid-Fasern .....	77
Abbildung 7-4: sich kreuzende Fasern; mit Kreisquerschnitt (links); mit multilobalen Querschnitt (rechts) .....	78
Abbildung 7-5: projizierte Faserdurchmesser für zwei verschiedene Drehwinkel .....	79
Abbildung 7-6: Vergrößerung des mittleren Faserdurchmessers für verschiedene multilobale Querschnittsformen im Vergleich zu flächengleichen Kreisquerschnitten .....	81
Abbildung 7-7: Dickenzunahme einer Faserschicht durch Vergrößerung der Faserdurchmesser bei horizontal ausgerichteten Fasern.....	82
Abbildung 7-8: Dickenzunahme einer Faserschicht durch größere projizierte Faserdurchmesser bei Fasern in Wirrlage.....	83
Abbildung 7-9: multilobale Faserquerschnitte im Vergleich zu einem Kreisquerschnitt gleicher Fläche .....	88
Abbildung 7-10: Simulationsbereich und Randbedingungen für ein Fasergitter .....	88

Abbildung 7-11: Geschwindigkeits- und Druckprofil für ein Fasergitter .....	90
Abbildung 7-12: auf eine multilobale Faser wirkende Druck- und Schubkräfte infolge der Umströmung .....	91
Abbildung 7-13: Zusammenhang zwischen dem Druckabfall an einem Fasergitter und den auf die einzelnen Fasern wirkenden Strömungskräften .....	91
Abbildung 7-14: Vergleichskreisquerschnitte gleicher Fläche (links); mit gleichem projiziertem Faserdurchmessers (rechts) .....	92
Abbildung 7-15: Darstellung der Simulationsergebnisse für verschiedene Anströmrichtungen im Polardiagramm .....	93
Abbildung 7-16: Kraftwirkung auf multilobale Fasern im Vergleich zu Fasern mit kreisrundem Querschnitt und gleicher Querschnittsfläche .....	94
Abbildung 7-17: Kraftwirkung auf multilobale Fasern im Vergleich zu Fasern mit kreisrundem Querschnitt und gleichen projizierten Durchmessern ....	94
Abbildung 7-18: unterschiedlich geformte Strömungstozonen um eine multilobale Faser und um eine flächengleiche Faser kreisrunden Querschnitts bei gleicher Anströmgeschwindigkeit .....	95
Abbildung 7-19: Veränderung der Strömungskräfte durch sukzessives Auffüllen der Strömungstozonen für einen multilobalen und einen flächengleichen, kreisrunden Faserquerschnitt bei gleicher Anströmgeschwindigkeit .....	97
Abbildung 7-20: Veränderung der Strömungskräfte durch sukzessives Auffüllen der Strömungstozonen für einen multilobalen und einen flächengleichen, kreisrunden Faserquerschnitt bei gleicher Luftdurchlässigkeit der durchströmten Faserschicht..	99
Abbildung 7-21: Ergebnisse der Bestäubungsversuche für FM3 (multilobal) und FM4 (rund) bei gleichem Flächengewicht, gleicher Luftdurchlässigkeit und gleichem Fasertiter .....	100
Abbildung 7-22: Ergebnisse der Bestäubungsversuche für FM1 (multilobal) und FM2 (rund) bei gleichem Flächengewicht, gleichem Fasertiter jedoch verringerter Luftdurchlässigkeit von FM1 gegenüber FM2 .....	101
Abbildung 7-23: Struktur des zweidimensionalen Filzes aus multilobalen Fasern und eines Vergleichsfilzes mit Fasern flächengleicher kreisrunder Querschnitte ...	104
Abbildung 7-24: Geschwindigkeits- und Druckprofile für verschieden stark aufgedehnte Faserschichten multilobaler Fasern im Vergleich zu einer Faserschicht bestehend aus flächengleichen Fasern kreisrunden Querschnitts .....	106
Abbildung 7-25: relativer Druckverlust der Faserschicht bestehend aus Fasern multilobalen Querschnitts (bezogen auf den Druckverlust der Vergleichsfaserschicht kreisrunder Fasern) in Abhängigkeit von der Faserschicht-Aufdehnung .....	107
Abbildung 7-26: für Tiefenfiltrationsversuche adaptierter VDI 3926 Typ 2 Prüfstand zur Messung von Fraktionsabscheidegraden von Filtermedien .....	110

Abbildung 7-27: Penetration durch die unbestaubten Filtermedien  
FM3 PI (multilobal) und FM4 PPS (rund) in Abhängigkeit von der Partikelgröße .. 112

Abbildung 7-28: Verhältnis der Penetrationen der unbestaubten Filtermedien  
FM3 PI (multilobal) und FM4 PPS (rund) in Abhängigkeit von der Partikelgröße ... 113

Abbildung 7-29: Penetration durch die unbestaubten Filtermedien  
FM1 PI (multilobal) und FM2 PPS (rund) in Abhängigkeit von der Partikelgröße ... 114

Abbildung 7-30: Verhältnis der Penetrationen der unbestaubten Filtermedien  
FM1 PI (multilobal) und FM2 PPS (rund) in Abhängigkeit von der Partikelgröße ... 114

Abbildung 7-31: Penetration durch die bestaubten Filtermedien FM3 PI (multilobal)  
und FM4 PPS (rund) in Abhängigkeit von der Partikelgröße und der Zyklenanzahl 116

Abbildung 7-32: Verhältnis der Penetrationen der bestaubten  
Filtermedien FM3 PI (multilobal) und FM4 PPS (rund) in Abhängigkeit  
von der Partikelgröße und der Zyklenzahl ..... 116

## Literaturverzeichnis

- [1] Schmidt, E.: „Elektrische Beeinflussung der Partikelabscheidung in Oberflächenfiltern“, Hochschulschrift Karlsruhe, Univ., Diss., (1991), 6-17
- [2] Koschutnig, W.: „Untersuchung zur Emissionsbildung durch Wiederaufwirbelung von Straßenstaub und Charakterisierung der Oberflächenbehandlung textiler Filtermittel für die industrielle Feinstaubabscheidung“, Dissertation, TU Wien, (2007)
- [3] Löffler, F.: „Staubabscheiden“, Georg Thieme Verlag Stuttgart New York, (1988)
- [4] Höflinger, W.: „Mechanische Verfahrenstechnik I“, Vorlesungsskriptum, Institut für Verfahrens-, Brennstoff- und Umwelttechnik, TU Wien
- [5] Höflinger, W.: „Mechanische Verfahrenstechnik II“, Vorlesungsskriptum, Institut für Verfahrens-, Brennstoff- und Umwelttechnik, TU Wien
- [6] Höflinger, W.: „Entstaubungstechnik“, Vorlesungsskriptum, Institut für Verfahrens-, Brennstoff- und Umwelttechnik, TU Wien
- [7] Van Turnhout, J.: „The Use of Polymers for Electrets“, Journal of Electrostatics, 1 (1975), 147-163
- [8] Van Turnhout, J.; Adamse, J.W.C.; Hoeneveld, W.J.: „Electret filters for high-efficiency air cleaning“, Journal of Electrostatics, 8 (1980), 369-379
- [9] De Haan, P. H.; Van Turnhout, J.; Wapenaar, K. E. D.: „Fibrous and granular filters with electrically enhanced dust capturing efficiency“, Proc. 5th Intern. Symp. Electrets, Heidelberg 1985, 756-765
- [10] de Haan, P. H.; Van Turnhout, J.; Wapenaar, K. E. D.: „Fibrous and granular filters with electrically enhanced dust capturing efficiency“, IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. EI-21 No.3, June 1986, 465-470
- [11] Löffler, F.; Dietrich, H.; Flatt, W.: „Staubabscheiden mit Schlauchfiltern und Taschenfiltern“, Friedr. Vieweg & Sohn Braunschweig / Wiesbaden, 1984
- [12] Albrecht, W.; Fuchs, H.; Kittelmann, W.: „Vliesstoffe, Rohstoffe, Herstellung, Anwendung, Eigenschaften, Prüfung“, WILEY-VCH, ISBN 3-527-29535-6, 2000
- [13] VDI Richtlinie 3677 Blatt 1: „Filternde Abscheider - Oberflächenfilter“, VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 6, Juli 1997

- [14] DIN 60001: „Textile Faserwerkstoffe; Faser- und Herstellungsformen“, (1987), 8-59
- [15] International Standard ISO 2076: „Textiles – Man-made fibres-Generic names“, Ref. number ISO 2076:1999(E), 1999
- [16] DIN EN ISO 9073-2: „Textilien; Prüfverfahren für Vliesstoffe“ Teil 2 „Bestimmung der Dicke“ (1997)
- [17] DIN EN ISO 9237: „Textilien – Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von textilen Flächengebilden“, Dez. 1995
- [18] DIN 53857-1: „Prüfung von Textilien; Einfacher Streifen-Zugversuch an textilen Flächengebilden, Gewebe und Webbänder“, Sep. 1979
- [19] Kaspar, G.: „The Kinetics of Dust Filtration“, Plenary Lecture, FILTECH 2007, Wiesbaden, (2007)
- [20] Mauschitz, G.: „Particle deposition in the depth of nonwoven dust filter media and its effect on filter clogging“, FILTECH 2007, Wiesbaden, (2007), 8 Seiten
- [21] Rud, H.; Mauschitz, G.; Hoeflinger, W.: „Transmitted-light microscopy – a new method for surface structure analysis of cleanable non-woven dust filter media“, Proceedings EMChIE V, 3 - 5 Mai 2006, Wien, Österreich, 1177 - 1184.
- [22] Rud, H.: „Verfahren zur experimentellen Ermittlung der Faserladung“, Diplomarbeit, (2004) TU Wien
- [23] Sessler, G. M.: „Electrets“, Topics in Applied Physics, Vol. 33, ISBN 3-540-0957-5, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, (1980)
- [24] Gerhard- Mulhaupt, R.: „Ladungs- und Polarisationserscheinungen in Hochpolymer- Elektretfolien“, Darmstädter Dissertationen D17, (1984)
- [25] Baumgartner, H.: „Elektretfaserschichten für die Aerosolfiltration – Untersuchungen zum Faserladungszustand und zur Abscheidecharakteristik“, VDI- Berichte Nr. 146, (1987)
- [26] Weitzenkamp, L. A.: „Measurement of Fibre Potentials in a Scanning Electron Microscope“, Journal of Scientific Instruments (Journal of Physics) 1969 Series 2 Volume 2, 561-564
- [27] Walsh, D. C.; Stenhouse, J. I. T.: „Parameters Affecting the Loading Behaviour and Degradation of Electrically Active Filter Materials“, Aerosol Science and Technology, Vol. 29, Number 5, November 1998, 419-432

- [28] Myers, D. L.; Arnold, B. D.; Hillenbrand, J.; Sessler, G. M.: „Electret Charged Air Filtration Media: Understanding the Synergy of Media Structure and Charge Distribution in a Commercial HVAC Filtration Media”, FILTECH EUROPA (2003), II 82 - II 91
- [29] Mauschitz, G.; Koschutnig, W.; Rud, H.; Hoeflinger, W.: „Analysis of the clogging behaviour of thermally finished non-woven dust filter media by optically detected porosity parameters”, Proceedings FILTECH Europa 2005, 11 - 13 October 2005, Düsseldorf, Deutschland, II20 – II28.
- [30] Hoeflinger, W.; Mauschitz, G.; Koschutnig W.: „Investigation of the Porosity Situation Near the Outer Surface of Thermally Finished Needle Felts”, Proceedings EMChIE2003, CHEMICAL INDUSTRY AND ENVIRONMENT IV, 12 - 14 February 2003, Las Palmas Gran Canaria, Spanien, 33 - 42
- [31] Sockel, H.: „Strömungslehre“, Vorlesungsskriptum, Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung, TU Wien
- [32] Hoeflinger, W.; Mauschitz, G.; Koschutnig W.: „Cleaning Behaviour of Textile Filter Media”, Proceedings of European Conference on Filtration and Separation, 24 - 26 June 2002, Gothenburg, Schweden, 114 - 123
- [33] Koschutnig, W.; Mauschitz, G.; Hoeflinger, W.: „Analyse der Restverstopfung an verschiedenen oberflächenbehandelten textilen Staubfiltermedien“, Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, 66 (2006) Nr. 4 – April, 158 - 164.
- [34] VDI Richtlinie 3926 Blatt 1: „Prüfung von Filtermedien für Abreinigungsfilter“, VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 6, 1994
- [35] Sessler, G. M.: „Electrets”, Topics in Applied Physics, Vol. 33, ISBN 3-540-0957-5, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, (1980)
- [36] Van Turnhout, J.; Hoeneveld, W.J.; Adamse, J.W.C.; van Rosen, L. M.: „Electret filters for high-efficiency air cleaning”, IEEE Transactions on industry applications, Vol.IA-17,NO.2, march/april 1981, 240-248
- [37] Baumgartner, H.; Löffler, F.; Umhauer, H.: „The collection performance of deep-bed Electret filters”, Proc. 5th Intern. Symp. Electrets, Heidelberg (1985), 772-777
- [38] Muhr, W.: „Theoretische und experimentelle Untersuchung der Partikelabscheidung in Faserfiltern durch Feld- und Trägheitskräfte“, Hochschulschrift Karlsruhe, Univ., Diss., (1976)

- [39] Baumgartner, H.; Löffler, F.; Umhauer, H.: „Deep-bed electret filters: The determination of single fiber charge and collection efficiency“, IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. EI-21 No.3, June 1986, 477-486
- [40] Weinrotter, K.: „Die thermostabile, schwerentflammbare Polyimidfaser P84 als Asbestersatz“, Lenzinger Berichte, Heft 64, Jänner 1988, 24-28
- [41] Firmeninformation Inspec Fibres, (2005)
- [42] Raynor, P. C.: „Flow Field and Drag for Elliptical Filter Fibers“, Aerosol Science and Technology 36, (2002), 1118-1127
- [43] Rohrbach, P. et al: „Shaped Fibers in Filtration“, Air Filtration Conference, (1999), Minneapolis, Proceedings 155 -162
- [44] Wagner, W.: „Strömung und Druckverlust“, Vogel Verlag, (2001)

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name: Dipl.-Ing. Heimo Rud  
Adresse: Stadtgraben 4/4  
3390 Melk  
Geburtsdatum/-ort: 08.03.1975, 9814 Mühldorf  
Familienstand: verheiratet

## Ausbildung

10/2004-11/2008 Doktoratstudium der technischen Wissenschaften an der TU Wien,  
Dissertationsgebiet Maschinenbau  
Dissertation: Einfluss von Ladung und Faserquerschnittsform  
auf das Filtrationsverhalten abreinigbarer Polyimid- Nadelfilze  
10/1996-06/2004 Studium Verfahrenstechnik an der TU Wien,  
Studienzweig Chemieingenieurwesen  
Diplomarbeit: Verfahren zur experimentellen  
Ermittlung der Faserladung  
10/1995-8/1996 Präsenzdienst  
09/1990-06/1995 HTL für Maschinenbau Klagenfurt

## Beruflicher Werdegang

Seit 08/2007 Entwicklungsingenieur bei Voith Paper GmbH;  
Bereich Prozessentwicklung Karton und Verpackung  
03/2004-07/2007 Projektassistent am Institut für Verfahrenstechnik Umwelttechnik und  
Technische Biowissenschaften; Forschungsbereich Mechanische  
Verfahrenstechnik und Luftreinhaltetechnik

Melk, im November 2008