

# Bestimmung der Abscheidewirkung von faserförmigen Filtermedien gegenüber ultrafeinen Partikeln

A. Hellmann, K. Schmidt, S. Ripperger, C. Thelen, C. Möhlmann

**Zusammenfassung** Die Abscheidung gering konzentrierter ultrafeiner Partikel an mikrostrukturierten Medien wurde untersucht. Zunächst wurde eine Reihe verschiedener Filtermedien in ihren Gesamt- und Fraktionsabscheidegraden bewertet. Für ein exemplarisches Filtermedium werden verschiedene Methoden zur Bestimmung der Fraktionsabscheidegrade im Detail dargestellt und miteinander verglichen. Bei diesen Methoden handelt es sich um Messungen mit dem Scanning Mobility Particle Sizer, empirische Ansätze und 3D-Simulationen. Für das bewertete Filtermedium zeigt der direkte Vergleich der Ergebnisse eine gute Übereinstimmung der verwendeten Methoden.

## Determining the separation efficiency of fibrous filter media for ultrafine particles

**Abstract** The paper investigates the separation of ultrafine particles in low concentrations on microstructured media. A series of different filter media are first assessed in terms of their overall and fraction separation rates. For a sample filter medium, the paper presents in detail various methods for determining the fraction separation rates and compares them. The methods employed are measurements with the scanning mobility particle sizer, empirical approaches and 3D simulations. For the assessed filter medium, a direct comparison shows that the results obtained with the methods used concur well.

## 1 Einleitung

Zur Herstellung von Filtern zur Luftfiltration, z. B. für Be- und Entlüftungsanlagen und Atemschutzmasken, werden meist hochwertige Vliesstoffe aus synthetischen Fasern verwendet. Man geht dabei von einer Tiefenfiltration aus, da die Porenabmessungen deutlich größer sind als die abzuscheidenden Partikel. Durch die Kombination mechanischer und elektrostatischer Abscheideeffekte werden bereits mit einlagigen Vliesstoffen zuverlässig feinste Partikel aus der Luft abgetrennt. Überwiegend werden jedoch mehrlagige Filtermedien verwendet – hauptsächlich, um die Standzeit der gut abscheidenden Filterschicht zu verlängern. Die Filtermedien werden in unterschiedlichen Anordnungen und Geometrien eingesetzt. Bei Atemschutzmasken ist nicht nur die Abscheidewirkung des eigentlichen Filtermediums, sondern auch der richtige Sitz ausschlaggebend für die Partikelabscheidung. Auch die eindeutige Bewertung der Abscheidewirkung eines Filters spielt eine wichtige Rolle.

M. Sc. Albert Hellmann, Dr.-Ing. Kilian Schmidt,  
Prof. Dr.-Ing. Siegfried Ripperger,

Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik,  
Technische Universität Kaiserslautern.

Dipl.-Chem. Christoph Thelen,  
Dipl.-Phys. Carsten Möhlmann,

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen  
Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.

Hierzu werden u. a. standardisierte Filtertests verwendet. Je nach Einsatz- und Partikelgrößenbereich wird ein geeignetes Testaerosol erzeugt und unter definierten Bedingungen abgeschieden. Dabei werden über das gesamte Partikelgrößenpektrum unter Verwendung von Partikelgrößenanalysatoren Fraktionsabscheidegrade bestimmt.

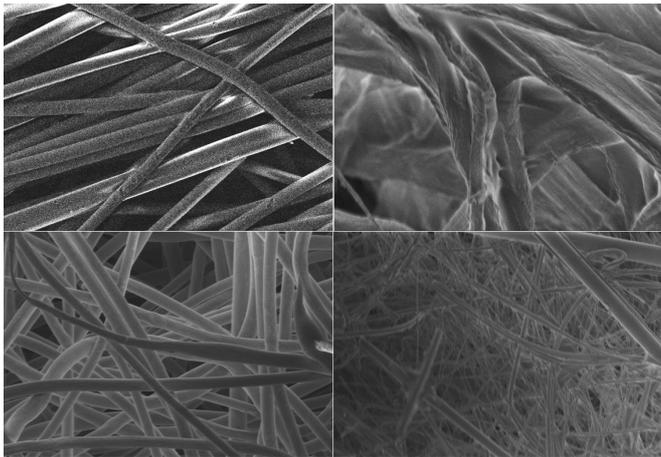
Wie in vielen Bereichen der Verfahrenstechnik besteht auch bei der Partikelabscheidung mit Tiefenfiltern das Ziel, den jeweiligen verfahrenstechnischen Prozess mit den natur- und ingenieurwissenschaftlichen Gesetzen soweit zu erfassen, dass er mathematisch modelliert werden kann. Im Fall der Luftfiltration verfolgt man dabei folgende Ziele:

- schnelle und kostengünstige Entwicklung optimierter Filtermedien,
- Auslegung von Filtern und ihre Anpassung an das jeweilige Separationsproblem,
- Optimierung der Filtration z. B. in Verbindung mit einer Lebenszyklusmodellierung.

In der Literatur sind zahlreiche mathematisch formulierte und physikalisch begründete Modelle zur Tiefenfiltration beschrieben. Sie gehen jedoch alle von vereinfachenden Annahmen aus und erlauben nur innerhalb bestimmter Grenzen eine hinreichend gute Abschätzung der realen Vorgänge. Ein großer Teil der Modelle geht von den Abscheidemechanismen an einer einzelnen Faser des Filtermittels aus und überträgt diese dann unter Berücksichtigung gemittelter Strukturparameter des Filtermittels auf eine Filterfläche. Die tatsächliche Struktur des Filtermittels und die darin stattfindende komplexe Strömung werden nicht berücksichtigt. Für viele Anwendungen werden optimierte Tiefenfilter angeboten, die empirisch über viele Jahre an die jeweilige Anwendung angepasst wurden.

## 2 Partikelabscheidung in faserförmigen Filtermedien

Bei der Tiefenfiltration mit Faservliesen werden Partikel innerhalb einer ungeordneten Faserschicht abgeschieden. Die Packungsdichte bzw. Porosität der Schicht ist in Bezug auf den Druckverlust und damit auf die aufzubringenden Energiekosten zum Betrieb des Filters ein wichtiger Aspekt. Die an den Fasern abgeschiedenen Partikel verursachen eine mehr oder weniger große Verengung der Strömungskanäle im Filtermedium und damit einen Anstieg des Druckverlusts. Gleichzeitig verbessert sich in der Regel auch die Partikelabscheidung. Entspricht der Druckverlust bzw. die Abscheideeffizienz nicht mehr den Prozessanforderungen, wird der Filter ausgetauscht. Bei Tiefenfiltern zur Gasfiltration wird eine Regeneration in der Regel nicht vorgesehen. Für die vielfältigen Anforderungen steht eine große Anzahl von Filtermedien aus verschiedenen Materialien zur Verfügung. Die eindeutige Charakterisierung der Materialeigenschaften und der Struktur eines Filtermittels ist erforderlich, um seine Eignung für einen bestimmten Anwendungsfall abschätzen zu können. In **Bild 1** sind Filtervliese mit unterschiedlichen Strukturen dargestellt.



**Bild 1.** REM-Aufnahmen verschiedener Filtermaterialien mittels Raster-elektronenmikroskopie (REM). Oben links: Polypropylen, oben rechts: Cellulose, unten links: Polyester-Nadelfilz, unten rechts: Glasfaser

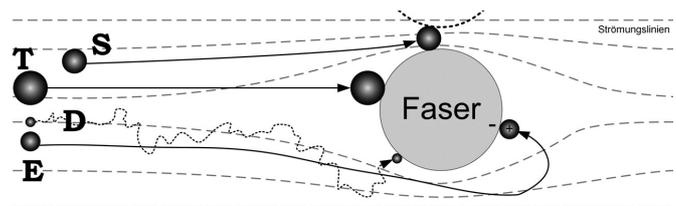
Zur ersten Beurteilung können die vom Hersteller angegebenen Parameter herangezogen werden. Dazu gehören z. B. das Material, die Porosität bzw. das Flächengewicht, die Schichtdicke, die Fadenfeinheit bzw. Fadendurchmesser-Verteilung und die Luftpermeabilität bei einem Testdruck. Zur Angabe von Fraktionsabscheidegraden sind aufwendige experimentelle Untersuchungen notwendig. Abschätzungen hierzu können jedoch auch mit phänomenologischen Berechnungsansätzen auf der Basis von empirischen Gleichungen unter Berücksichtigung der oben genannten Filtermittelparame-ter oder mit numerischen Simulationen vorgenommen werden.

### 3 Phänomenologischer Berechnungsansatz

Ausgangspunkt sind die Abscheidemechanismen an einer einzelnen Faser. In der Regel werden vier dominierende Abscheidemechanismen unterschieden: die Diffusion  $D$ , der Sperreffekt  $S$  (Interzeption), die Trägheitsabscheidung  $T$  und der elektrostatische Effekt  $E$ . **Bild 2** veranschaulicht diese Abscheidemechanismen. Sie bewirken einen Transport der Partikel an eine Faser. Bei einer Berührung kann man besonders bei ultrafeinen Partikeln davon ausgehen, dass sie aufgrund der Haftkräfte (Van-der-Waals-Kraft, elektrostatische Kraftwirkung) an der Faser abgeschieden werden. Die Bewegung ultrafeiner Partikel ( $d_p < 100$  nm) wird wesentlich von der Brownschen Molekularbewegung beeinflusst. Dadurch weichen die Trajektorien der Partikel von den Stromlinien der Gasströmung ab, sodass eine Impaktion an einer Faser oder an bereits abgeschiedenen Partikeln erfolgen kann. Die Abweichung der Partikelbewegung von den Stromlinien verstärkt sich mit steigender Temperatur. Die Abscheidung wird darüber hinaus durch eine lange Verweilzeit im Filtermedium bzw. durch eine geringe Gasgeschwindigkeit verbessert. Diesen Abscheidemechanismus bezeichnet man als Diffusion.

Ein Partikel, das den Stromlinien folgt, kann aufgrund seiner Ausdehnung die Oberfläche einer Faser berühren und dort abgeschieden werden, da die Faser quasi den Weg versperrt. Dieser Mechanismus wird daher auch als Sperreffekt (Interzeption) bezeichnet.

Ein Partikel mit großer Masse, z. B. infolge einer hohen Dichte oder Partikelgröße, kann den Stromlinien bei der Umströmung infolge der Trägheit nicht folgen und wird da-



**Bild 2.** Schematische Darstellung der wirkenden Abscheidemechanismen nach [3].

durch auf die Faser treffen und abgeschieden. In diesem Fall spricht man vom Trägheitseffekt. Eine hohe Gas- bzw. Anströmgeschwindigkeit begünstigt diesen Effekt.

Eine anziehende elektrostatische Kraft wirkt, wenn die Partikel gegenüber dem Filtermaterial bzw. der Faser einen entgegengesetzten Ladungszustand aufweisen. Die Kraftwirkung nimmt mit steigender Ladungsdifferenz zu. Bei den vorgestellten Untersuchungen wurden nur ungeladene Filtermedien verwendet, sodass elektrostatische Abscheideeffekte nicht berücksichtigt werden mussten.

Der Wirkungsbereich der Abscheidemechanismen ist stark von der Partikelgröße abhängig. Partikel mit einem ultrafeinen Durchmesser  $< 0,1$   $\mu\text{m}$  werden hauptsächlich durch Diffusion abgeschieden. Bei Partikeln im Größenbereich von  $0,1$  bis  $0,5$   $\mu\text{m}$  tritt eine Überlagerung von Diffusion und Sperreffekt auf. Exemplarisch wird dies in **Bild 3** dargestellt. Die Abscheidung von Partikeln  $> 0,4$   $\mu\text{m}$  wird durch den Sperreffekt und die Trägheit dominiert. Im Bereich von  $100$  bis  $500$  nm wird mit Filtervliesen meist eine geringe Abscheidewirkung erzielt. Die Partikelgröße im Minimum der Trennkurve wird auch als Most Penetrating Particle Size (MPPS) bezeichnet. An diesem Punkt wird die geringste Anzahl von Partikeln zurückgehalten. Insbesondere um die Abscheidung in diesem Bereich zu verbessern, werden häufig elektrostatisch ausgerüstete Fasern eingesetzt.

Die einzelnen Abscheidemechanismen wurden in aufwendigen experimentellen Untersuchungen u. a. an Einzelfasern bestimmt. Durch Anwendung der Dimensionsanalyse und Ähnlichkeitslehre wurden die Ergebnisse unter Verwendung von dimensionslosen Kenngrößen beschrieben (siehe [1]). Unter Berücksichtigung eines Strukturparameters für die Faserdichte bzw. Porosität und die Filtermitteldicke können daraus Fraktionsabscheidegrade für unterschiedliche Anströmgeschwindigkeiten bestimmt werden. Die im Folgenden angewendeten Berechnungsgleichungen werden in [1] beschrieben und gehen auf *Kirch* und *Stechkina* zurück.

### 4 Berechnung mit numerischer 3D-Simulation

Ausgangspunkt für eine numerische Strömungssimulation ist die möglichst originalgetreue dreidimensionale Generierung der geometrischen Struktur eines Tiefenfiltermediums. Der Strukturgenerator DNSlab generiert die Struktur auf der Grundlage einer virtuellen Packung aus Fasern, deren Größenverteilung derjenigen von realen Fasern ähnelt. Außerdem wird die Struktur so generiert, dass deren Strukturparameter, wie z. B. Porosität, Flächengewicht und Sehnenlängenverteilung, der realen Struktur entsprechen. Der Strukturgenerierungsprozess garantiert die Einhaltung dieser Parameter in gewissen Schranken. Mit der Software lassen sich auch Mikrostrukturen auf der Basis dreidimensionaler Bilddaten, wie sie z. B. die Mikro-

Computertomografie ( $\mu$ -CT) liefert, simulieren. DNSlab verwendet ein gleichmäßiges Rechengitter aus kubischen Zellen (Voxel). Ein Nebenprodukt der Strömungsberechnung ist u. a. ein Wert für die Permeabilität des Materials.

Die generierten Strukturen des Filtermittels sind die Basis der darauf aufbauenden Strömungssimulation. Zur numerischen Lösung der Stokes-Brinkmann-Gleichung wird der durchströmte Raum durch ein äquidistant strukturiertes Gitter diskretisiert. Mit der Strömungssimulation kann u. a. der Druckabfall bzw. die Permeabilität berechnet werden.

Die Lagrangesche Beschreibung der Partikelbewegung berücksichtigt Partikel-Fluid-Reibung, Partikelträgheit und den Einfluss der Brownschen Molekularbewegung. Die Partikel können dabei auch mit den Kollektorelementen, z. B. Faser oder abgeschiedene Partikel, kollidieren. Bei den folgenden Berechnungen wurde angenommen, dass ein Partikel bei einer Berührung mit einer Faser haften bleibt. Auch der Siebeffekt wird bei einer Interaktion mehrerer Fasern mit einem Partikel berücksichtigt. Angelagerte Partikel können erfasst werden und durch eine modifizierte Geometrie im nächsten Iterationsschritt berücksichtigt werden. Bei den folgenden Ergebnissen wurden Abscheidegrade an unbeladenen Filtermitteln berechnet, sodass diese Möglichkeit nicht berücksichtigt wurde.

Außerdem wurden nur ungeladene Filtermedien verwendet, sodass elektrostatische Abscheideeffekt nicht berücksichtigt werden mussten.

### 5 Eigene experimentelle Untersuchungen

Im Hinblick auf das Abscheideverhalten von ultrafeinen Partikeln wurden neun Filtermedien untersucht. Die von den Herstellern dazu angegebenen Parameter sind in der **Tabelle** aufgeführt.

Zur Ermittlung der Abscheidung wurden die Filtermedien mit einem NaCl-Aerosol beaufschlagt. Der dazu notwendige Luftstrom wurde aus dem bestehenden Druckluftnetz entnommen. Da u. a. auch ultrafeine Partikel gemessen werden sollten, wurden diese über vorgeschaltete Vorfilter, Ölabscheider, Adsorber und High Efficiency Particulate Airfilter (HEPA) gereinigt. Anschließend erfolgt die Partikelgenerierung mittels Düse in einem Zerstäuber (Eigenbau, Technische Universität Kaiserslautern). Das auf diese Weise erzeugte Aerosol wurde mit einem weiteren Luftstrom verdünnt. Das Verdünnungsverhältnis wurde über einen Flowmeter (Model 4043, Fa. TSI) eingestellt. Das Gas wird dann durch einen Diffusionstrockner geleitet und auf eine relative Feuchte  $< 20\%$  getrocknet. Danach werden innerhalb der Versuchsmessstrecke Feuchtigkeit, Temperatur und Volumenstrom gemessen. Die gemessene Partikelgrößenverteilung ist in **Bild 4** dargestellt; sie wurde mit einem Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS, Modell 3934, Fa. TSI) ermittelt.

Das jeweilige Filtermedium wird mit diesem Aerosol und einem Volumenstrom von  $7\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  beaufschlagt. Die freie Filterfläche im verwendeten Filterhalter hat einen Durchmesser von  $90\text{ mm}$ . Jeweils vor und hinter dem Filterhalter

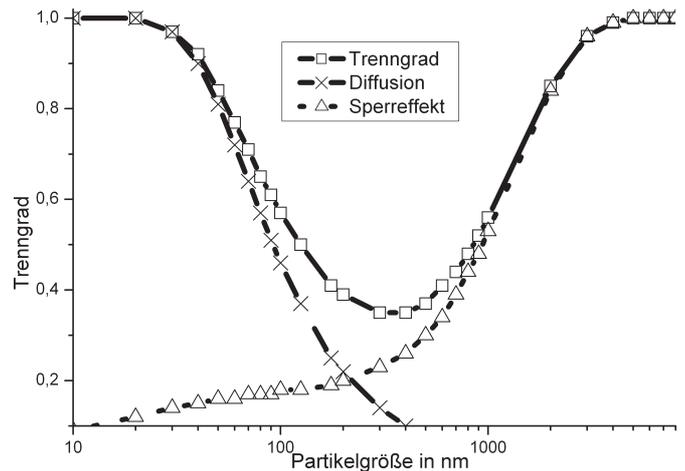


Bild 3. Beispiel des Fraktionsabscheidegrades durch Diffusion, Sperreffekt und deren Kombination mit Abscheidelücke nach [3].

Angaben zu den untersuchten Filtermedien (Herstellerangaben).

Nr.	Filtermaterial	Luftdurchlässigkeit bei 200 Pa in $\text{l}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	Flächengewicht in $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$
1	Polypropylen	1550	138
2	Mikro-Glasfaserfilterpapier	24	83
3	Spinnvlies	275	120
4	Polyester-Nadelfilz	144	400
5	Zellstoff	117	80
6	Vliesstoff	150	240
7	Glasfaser	24	77
8	Cellulose	125	120
9	Polyester Spunbond	42	260

werden die Partikelanzahlkonzentrationen und die Partikelgrößenverteilung mittels SMPS gemessen. Der Probenahmestrom des Messgerätes beträgt  $0,3\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  und entspricht dem „Low Flow Modus“ des Condensation Particle Counters (CPC, Modell 3022A, Fa. TSI). Im Anschluss an den Versuchsaufbau werden alle Partikel in einem Endfilter abgeschieden. **Bild 5** zeigt das vereinfachte Fließbild des Versuchsaufbaus.

In **Bild 6** sind die Gesamtpenetrationen der einzelnen Filtermedien dargestellt. Man erkennt deutliche Unterschiede. Die mit den Filtermitteln gemessenen Fraktionsabscheidegrade sind in **Bild 7** dargestellt. Dabei ist auf der Abszisse der

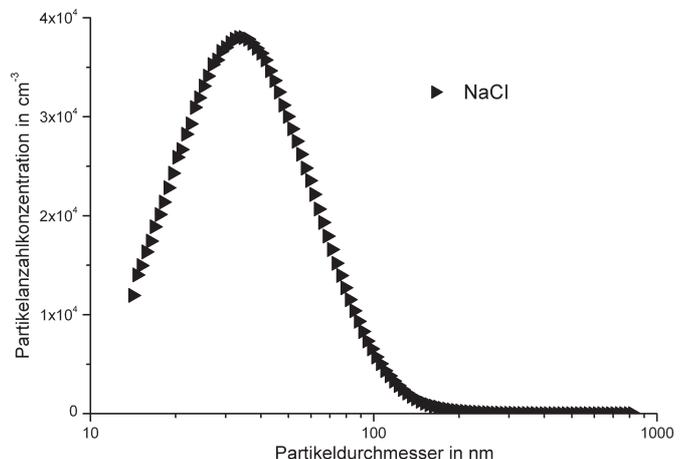


Bild 4. Gemessene Partikelgrößenverteilung von NaCl-Aerosol.

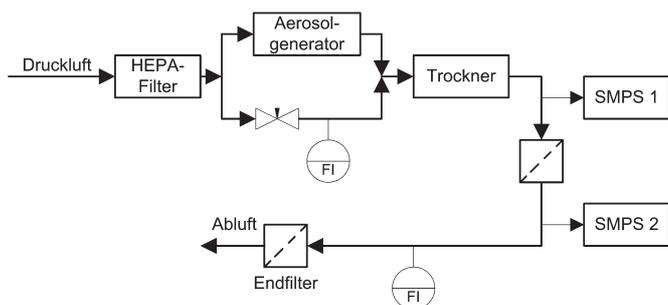


Bild 5. Schematischer Versuchsaufbau. FI: Volumenstrommessung

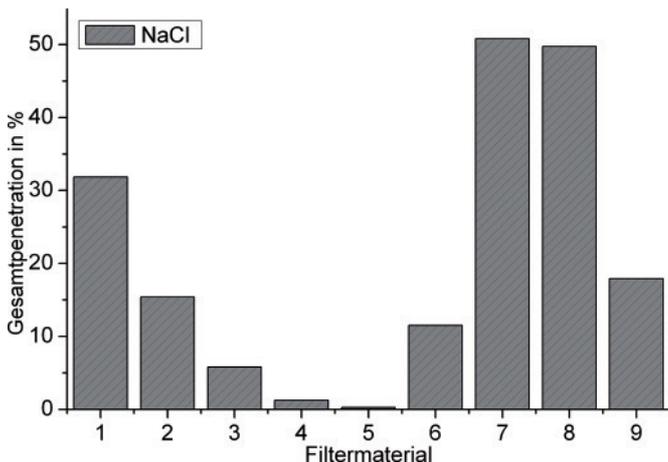


Bild 6. Vergleich der Gesamtpenetrationen unterschiedlicher Filtermaterialien für ein submikrones NaCl-Aerosol.

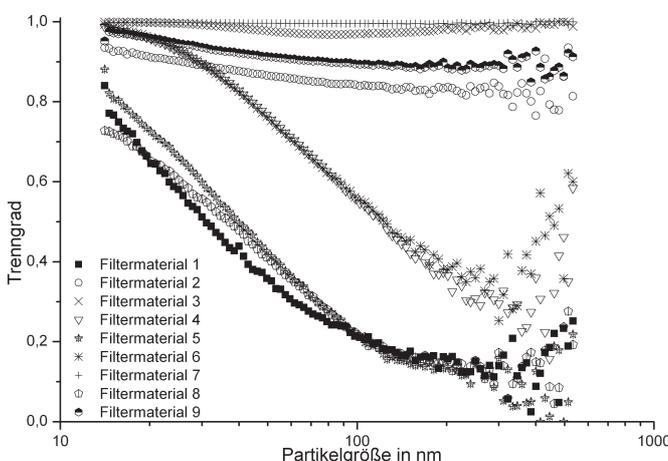


Bild 7. Vergleich der Abscheidegrade unterschiedlicher Filtermaterialien mit NaCl-Aerosol.

elektrische Mobilitätsdurchmesser und auf der Ordinate der Trenngrad aufgetragen. Die MPPS liegt wie zuvor angegeben im Bereich von 100 bis 500 nm. Im Partikelgrößenbereich von > 300 nm werden sehr wenige Partikel vermessen, was eine starke Streuung des gemessenen Trenngrades verursacht.

## 6 Berechnung des Fraktionsabscheidegrades von Filtermittel 1

Für Filtermittel 1 wurde neben der messtechnischen Methode die Trennkurve auch mit phänomenologischen Modellgleichungen und numerischer Simulation bestimmt. Filtermittel 1 wurde ausgewählt, da in Abhängigkeit von der Partikelgröße eine starke Veränderung des Trenngrades zwischen 70 und 20 % auftritt. Filtermedien mit einem Abscheidegrad unter 30 oder über 70 % sind weniger gut geeignet, da die eventuell ermittelten Unterschiede zwischen den gemessenen und berechneten Ergebnissen schwieriger zu erkennen sind. Weiterhin wurde das Filtermedium mit der einfachsten Geometrie verwendet. Es weist eine sehr enge Faserdurchmesser- und Faserlänge-Verteilung im Größenbereich 25 bis 35 µm auf.

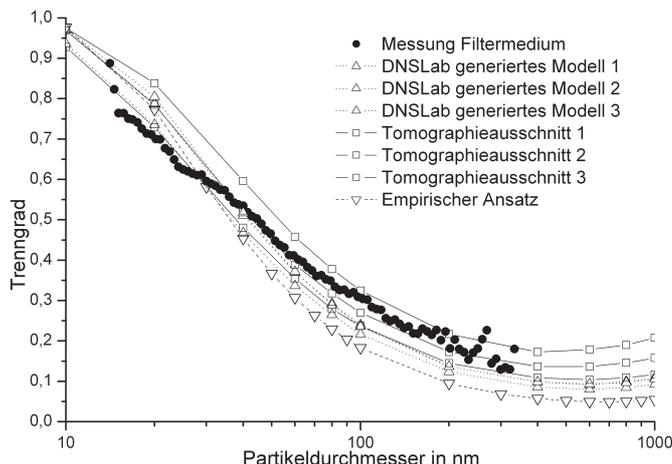


Bild 8. Vergleich der Messung, Simulation und Approximation des Trenngrads bzw. Fraktionsabscheidegrads.

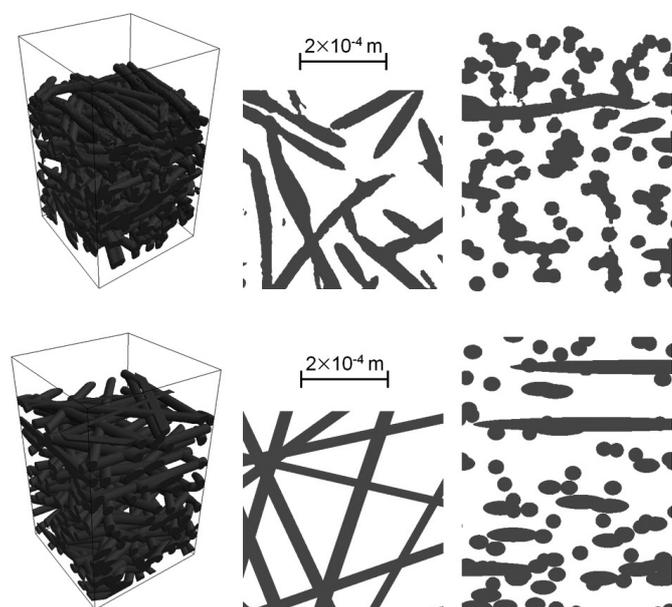


Bild 9. 3D-Modell der Tomografie (oben, links) und des generierten Filtermediums (unten, links), Ansicht von oben (Mitte), Seitenansicht (rechts).

Die mit den Modellgleichungen von [1] ermittelte Trennkurve ist in Bild 8 unter der Bezeichnung „Empirischer Ansatz“ eingetragen. Hierbei wird von zylindrischen Fasern mit einem Durchmesser von 32 µm ausgegangen. Für die direkte numerische Simulation (DNS) der Partikelabscheidung mithilfe eines 3D-Modells der Mikroporenstruktur des Filtermediums wird die Eigenentwicklung DNSlab verwendet [2]. Dabei wird zunächst das Geschwindigkeitsprofil berechnet. In einem zweiten Schritt wird die Partikelabscheidung simuliert.

### ● Empirischer Ansatz

Die mit den Modellgleichungen von [1] ermittelte Trennkurve ist in Bild 8 unter der Bezeichnung „Empirischer Ansatz“ eingetragen. Hierbei wird von zylindrischen Fasern mit einem Durchmesser von 32 µm ausgegangen.

### ● Simulationsansatz

Für die direkte numerische Simulation (DNS) der Partikelabscheidung mithilfe eines 3D-Modells der Mikroporenstruktur des Filtermediums wird die Eigenentwicklung DNSlab verwendet [2]. Dabei wird zunächst das Geschwindigkeitsprofil berechnet. In einem zweiten Schritt wird die Partikelabscheidung simuliert.

Für Filtermedium 1 wurde eine Tomografie angefertigt. Drei verschiedene Tomografieausschnitte wurden für die Simulation mit dem DNSlab ausgewählt. Damit wurde jeweils die Trennkurve durch Simulation der Strömung und Partikelabscheidung berechnet. Die Ergebnisse sind in Bild 8 dargestellt.

Außerdem wurden mit dem in DNSlab integrierten Strukturgenerator durch Vorgabe einer Faserdurchmesserverteilung und der Porosität zugehörige Faserstrukturen generiert.

In Bild 9 sind ein Tomografieausschnitt und ein mit DNSlab generiertes Modell vergleichend dargestellt. Diese generierten Strukturen zeichnen sich entsprechend der Vorgabe durch ungekrümmte Fasern mit einem kreisrunden und konstanten Querschnitt über die jeweilige gesamte Faserlänge aus. Mit dem jeweils gleichen Parametersatz wurden drei verschiedene Strukturen mit zufällig angeordneten Fasern generiert. Diese sind in Bild 8 mit Modell 1 bis 3 gekennzeichnet. Auch die damit durch Simulation der Strömung und Partikelabscheidung berechneten Trennkurven sind in Bild 8 aufgetragen.

Der Vergleich der gemessenen mit den berechneten bzw. durch Simulation gewonnenen Ergebnissen zeigt eine gute Übereinstimmung. Dabei muss berücksichtigt werden, dass das Messergebnis an einer Filterfläche von ca. 6 400 mm<sup>2</sup>

ermittelt wurde, während bei der Simulation ein Ausschnitt von jeweils 0,25 mm<sup>2</sup> berechnet wird. Die bei der Simulation ermittelten Unterschiede zwischen den Tomografieausschnitten bzw. Modellen können auch im Realen innerhalb einer Probe zwischen einzelnen Probenausschnitten auftreten.

### Literatur

- [1] *Shaw, D. T.*: Fundamentals of aerosol science. New York: John Wiley and Sons 1978.
- [2] *Schmidt, K.*: Dreidimensionale Modellierung von Filtermedien und Simulation der Partikelabscheidung auf der Mikroskala. Dissertation Technische Universität Kaiserslautern 2011.
- [3] *Hellmann, A.; Ripperger, S.; Müller, K. W.; Berges, M.; Möhlmann, C.*: Abscheideverhalten von ultrafeinen Stäuben und Nanopartikeln an Atemschutzmasken. In: *Kirchner, C.-J.; Stadeler, M.; Scholle, H.-C.* (Hrsg.): 18. Erfurter Tage der Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe, Mannheim, und der Friedrich-Schiller-Universität. Prävention von arbeitsbedingten Gesundheitsgefahren und Erkrankungen, S. 137-141. Jena: Bussert & Stadeler 2012.