



AiF-Forschungsvereinigung
„Energie- und Umwelttechnik“

2017

Innovationsreport

Industrielle Gemeinschaftsforschung

IGF Forschungsvorhabensnummer: 18314 N

Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Abscheidung luftgetragener nanoskaliger Partikel ≥ 5 nm

Laufzeit: 01.10.2014 – 30.06.2017

Beteiligte Forschungsstelle(n):

1. Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.
Bereich Luftreinhaltung & Filtration
2. Universität Duisburg-Essen
Lehrstuhl für Nanopartikel-Prozeßtechnologie

Institut für Energie- und
Umwelttechnik e. V.
Bliersheimer Straße 58 - 60
47229 Duisburg

Bereich Industrielle
Gemeinschaftsforschung
www.iuta.de/igf

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 18314 N

1. Thema

Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Abscheidung luftgetragener nanoskaliger Partikel ≥ 5 nm

2. Berichtszeitraum

01.10.2014 - 30.06.2017

3. Forschungsvereinigung

Umwelttechnik

4. Forschungsstelle(n)

Forschungsstelle 1: Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V.

Forschungsstelle 2: Universität Duisburg-Essen, Institut für Verbrennung und Gasdynamik, Lehrstuhl Nanopartikel-Prozesstechnik

Duisburg, 29.09.2017

Ort, Datum

Dr.-Ing. Christof Asbach (FS 1)

Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Schmidt (FS 2)

Name und Unterschrift aller Projektleiter der Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Forschungsthema.....	5
2	Zusammenfassung.....	5
3	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	6
3.1	Ausgangssituation	6
3.2	Problemstellung.....	7
4	Forschungsziel / Lösungsweg / Ergebnisse	8
4.1	Abscheidung von Nanopartikeln an herkömmlichen Filtermedien.....	9
4.1.1	Modifikation eines Filtermedienprüfstandes nach DIN 1822.....	9
4.1.2	Durchführung der Messung und Messstrategie.....	17
4.1.3	Effizienzbestimmung der Filtermedien mit unterschiedlichen Testaerosolen im Neuzustand.....	33
4.1.4	Filtereffizienz von synthetischen Filtermedien im Neuzustand und nach Entladung gegen Nanopartikeln	57
4.1.5	Filtereffizienzen für nanoskalige Partikel < 100 nm nach Beladung	66
4.2	Abscheidung von Nanopartikeln an Filtermedien mit Nanofaser-Anteil.....	78
4.2.1	Untersuchung von Filtermedien mit integrierten Nanofasern.....	79
4.2.2	Untersuchung von Filtermedien mit anströmseitigen Nanofasern	88
4.2.3	Untersuchung von Filtermedien mit abströmseitigen Nanofasern	104
4.3	Aufrüstung des EN 779 Prüfstandes für Messungen mit Nanopartikeln...	107
4.4	Entwicklung einer Messmethodik zur NP-Abscheidung an Filterkassetten	111
4.4.1	Evaluierung der Prüfaerosole	111
4.4.2	Entwicklung der Messmethodik.....	121
4.4.2.1	Messmethodik zur Bestimmung des Fraktionsabscheidegrades von niedereffizienten Filterkassetten mit polydispersen Partikeln.....	121
4.4.2.2	Messmethodik zur Bestimmung des Fraktionsabscheidegrades von hocheffizienten Filterkassetten mit monodispersen Partikeln	124
4.4.2.3	Bestimmung des Fraktionsabscheidegrades von hocheffizienten Filterkassetten mit quasi-monodispersen Partikeln.....	137
4.5	Untersuchungen an niedrigeffizienten Filterkassetten (RLT).....	138
4.5.1	F7 Filter	138
4.5.1.1	Vergleich F7 Filtermedium mit Filterkassette.....	140
4.5.2	F9 Filter	141
4.5.2.1	Vergleich F9 Filtermedium mit Filterkassette.....	144
4.6	Untersuchungen an hocheffizienten Filtern	144
4.6.1	E10 Filter	144
4.6.2	H13 Filter.....	146

4.6.3	U15 Filter	149
4.7	Modellierung der Nanopartikelabscheidung an konventionellen und neu entwickelten Filtern	153
4.7.1	Modellierung der unterschiedlichen Abscheidebeiträge	153
4.7.2	Modellierung unter Berücksichtigung polydisperser Faserverteilung (Nanofasern)	178
5	Fazit	184
6	Erzielter wirtschaftlicher und wissenschaftlich-technischer Nutzen	189
7	Darstellung der Verwendung der Zuwendung unter besonderer Berücksichtigung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	190
8	Fortgeschriebener, aktualisierter Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	191
9	Literaturverzeichnis	194

1 Forschungsthema

Nanopartikelfiltration - Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Abscheidung luftgetragener nanoskaliger Partikel ≥ 5 nm

2 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes wurde die Effizienz von Filtermedien sowie konfektionierten Filterkassetten unterschiedlicher Filterklassen im Hinblick auf ihre Abscheideeffizienz für Nanopartikel $d_p \geq 5$ nm untersucht. Hierzu wurde ein vorhandener Filtermedienprüfstand um einen zweiten Partikelzähler für simultane Messungen der Roh- und Reingaskonzentrationen erweitert. Des Weiteren wurde die Möglichkeit geschaffen, im Druckbetrieb höhere Volumenströme anzufahren als im Saugbetrieb bislang realisiert werden konnten. Für die Bereitstellung kleiner Partikel wurde ein Grafit-Funken-Generator in den Prüfstand integriert und der vorhandene DMA wurde durch einen Nano-DMA ersetzt, der auch Partikel < 10 nm klassieren kann. Ein ebenfalls vorhandener Prüfstand zur Prüfung konfektionierter Filter für raumluftechnische (RLT) Anlagen gemäß EN779 wurde zunächst so modifiziert, dass ein Eindringen von Fremdpartikeln reduziert wird. Darüber hinaus wurde der Prüfstand um einen neuartigen Nanopartikelgenerator ergänzt, der es erlaubt, die benötigten Nanopartikel in ausreichend hoher Konzentration zur Untersuchung auch sehr hocheffizienter Filter bereitzustellen. Messmethoden zur Überprüfung konfektionierter Filter unterschiedlicher Filterklassen wurden entwickelt und erfolgreich an Filtern der Klassen F7 bis U15 getestet. Untersucht wurden weiterhin sowohl neuartige Filtermedien mit Nanofasern wie auch konventionelle Filtermedien unterschiedlicher Filterklassen. Die entwickelte Messstrategie erlaubt es, den Abscheidegrad der Feinstaub- bis Schwebstaubfilter mit verlässlicher Anzahlstatistik und dadurch guter Reproduzierbarkeit zu erfassen. Es zeigte sich eine überwiegend gute Übereinstimmung der Ergebnisse, die mit Filtermedien und konfektionierten Filtern erhoben wurden. Es konnte ferner gezeigt werden, dass die Beladung von Filtern mit größeren Massen von A2-Teststaub zu einer deutlich erhöhten Abscheidung von Nanopartikeln führt. Vergleichbare Ergebnisse zeigten auch vergleichbar künstlich gealterte Filterkassetten. Geladene synthetische Filter wurden im IPA (Isopropanol)-Bad neutralisiert und wiesen insbesondere im Durchmesserbereich des größten Durchlasses, aber auch für Nanopartikel, einen verringerten Abscheidegrad auf. Die Messwerte wurden mit den Berechnungsergebnissen eines vorhandenen Modells verglichen. Verschiedene Ansätze aus der Literatur zur Erweiterung dieses Modells für Filtermedien mit integrierten, an- oder abströmseitigen Nanofasern wurden gegenübergestellt und ausführlich diskutiert. Um

auch bimodale Faserdurchmesserverteilungen berücksichtigen zu können, wurde das Modell erweitert. Zur Validierung des Modells wurden die verschiedenen Filtermedien mit Hilfe von REM-Aufnahmen analysiert und u. a. Faserdurchmesserverteilungen ermittelt. Das im Rahmen des Projektes entwickelte Filtrationsmodell ist besser geeignet, den Einfluss der Nanofasern auf die Abscheidung zu beschreiben.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

3 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

3.1 Ausgangssituation

Partikelfilter für die allgemeine Raumluftechnik (RLT-Filter) sind aktuell nach DIN EN 779:2012 [1] zu prüfen. Die Einstufung der konfektionierten Feinstaubfilter in die Filterklassen (M5 – F9) erfolgt dabei anhand des mittleren Wirkungsgrades für DEHS-Partikeldurchmesser (Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat) von 0,4 µm, welcher nach Beladungsstufen mit ASHREA-Staub gewichtet ist. Als zusätzliches Klassifizierungskriterium wird der an Medienproben zu ermittelnde Mindestwirkungsgrad nach einer elektrischen Neutralisierung der Medienproben vorgeschrieben. Grund hierfür ist die häufige Verarbeitung von Elektretmedien mit elektrostatisch geladenen Fasern in RLT-Filtern.

In der DIN EN 1822:2011 [2] wird die Prüfung und Bewertung von Schwebstofffiltern (HEPA und ULPA) beschrieben. Die Effizienz wird gemäß der Norm im Bereich um den MPPS (most penetrating particle size) ermittelt. Im Anhang B von Blatt 5 wird auch in dieser Norm Bezug auf mögliche elektrophoretische Abscheidebeiträge genommen.

Die messtechnische Erfassung des Abscheidegrades von Filtern gegenüber Nanopartikeln im Bereich kleiner als ca. 50 nm wird allerdings bislang in keiner normativen Vorschrift berücksichtigt. Jedoch stehen vor allem Nanopartikel < 100 nm durch ihre Lungengängigkeit im Verdacht, gesundheitsschädlich zu sein [3] [4]; so werden etwa 25 % eingeatmeter 10-nm-Partikel in den Alveolen abgeschieden (ICRP, 1994 [5]). Bei der Produktion von Computerchips mittels Extrem UV Lithographie (EUVL) können bereits heute Strukturgrößen von 10 nm erreicht werden [6]. Die Untersuchung der Abscheideeffizienz von Partikeln bis hinunter zu 5 nm ist also sowohl im Hinblick auf den Gesundheits- als auch auf den Produktschutz von hoher Relevanz, insbesondere unter Berücksichtigung der mitunter sehr hohen

Konzentrationen derart kleiner Partikel in der Atmosphäre [7] und der zunehmenden industriellen Produktion von Nanomaterialien.

Die Abscheidung von Partikeln auf Fasern wurde bspw. von Brown [8], Hinds [9] oder auch Lee und Mukund [10] beschrieben. Beim klassischen Filtrationsmodell werden die einzelnen Transportbeiträge der Einzelfaser bei der Berechnung der Gesamteffizienz des Filtermediums mittels semi-empirischer Gleichungen beschrieben. Dabei wird die Einzelfaser entsprechend dem Kuwabara-Modell im Kollektiv benachbarter Fasern betrachtet.

Speziell für die Abscheidung von Nanopartikeln stellen Wang und Otani [11] in einem Review-Artikel fest, dass die Grundlagen der Filtration zwar als gut verstanden gelten, es dennoch zu teilweise erheblichen Unterschieden zwischen Theorie und Experiment kommt. Gründe sieht Wang [12] im „Thermal rebound“, also der Wiederablösung kleinster Partikel unterhalb von 5 nm, und insbesondere im Einfluss elektrostatischer Effekte, „die es noch besser zu quantifizieren und im Modell zu berücksichtigen gilt“.

Aus einem Vorläuferprojekt liegen für elektrostatische Abscheideeffekte experimentell bestätigte Angaben für den Ladungszustand verschiedener Partikel sowie für synthetische Filterfasern vor, die bereits in einem Modell eingebunden sind. Bei den Modellierungen wird der Übergang von der Beschreibung der Transportvorgänge in den Medien hin zu Filterkassetten bereits aktuell untersucht, die Ergebnisse werden im Rahmen dieses Projektes berücksichtigt.

Für das Abscheideverhalten während der Beladung finden sich in der Literatur zwei unterschiedliche Ansätze. Zum einen das Dendriten-Modell, bei dem die Partikel bevorzugt an bereits abgeschiedenen Partikeln haften bleiben, zum anderen das Faserwachstums-Modell, bei dem von einer Vergrößerung des Faserdurchmessers durch abgeschiedene Partikel ausgegangen wird [13].

3.2 Problemstellung

Die gesundheitsschädliche Wirkung von Schwebstaub, insbesondere mit Partikeldurchmessern $< 10 \mu\text{m}$, ist inzwischen zweifelsfrei nachgewiesen [14] [15], [16]. Weitere Studien [17] [18] [19] [20] schlussfolgern, dass mit abnehmender Größe der inhalierten Partikel die gesundheitlichen Effekte aufgrund der zunehmenden spezifischen Oberfläche steigen. Das bedeutet, dass insbesondere nanoskalige Partikel zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen, wie z. B. inflammatorischen Effekten, führen können. Um diese Partikel aus der Außenluft oder aus der Abluft

technischer Prozesse zu entfernen, sind Filter unterschiedlicher Qualitäten im Einsatz. Die Klassifizierung dieser Filter wird anhand von normativen Regeln festgelegt. Allerdings zielen diese Normen in erster Linie auf die Retention gegenüber Partikeln > 100 nm ab. Eine Pflicht bzw. eine Empfehlung zum Nachweis der Effizienz gegenüber Nanopartikeln, auch bei zunehmender Staubbeladung, ist in diesen Regelwerken nicht formuliert. Der Aspekt des Filtrationsverhaltens von z. B. Filtern für raumluftechnische Anlagen (RLT-Filter) oder hocheffizienten Filtern für Reinraumanwendungen (HEPA oder ULPA) gegenüber nanoskaligen Partikeln steht bislang nicht im Fokus der normativen Bemühungen. Dies hat auf internationaler Ebene zu einer Zusammenarbeit von ISO und CEN und zu einem Untersuchungsprogramm/Mandat durch das CEN/TC 195 geführt. In dem zugehörigen Call for Tender heißt es: "...Development of a test method to measure the efficiency of air filtration media against spherical nanomaterials in the 3-30 nm size range."

Die Übertragbarkeit der Filtrationseigenschaften von flachen Filtermedien auf die von Filterkassetten ist allerdings fraglich, da, wie Mouret et al. [21] gezeigt haben, selbst kleine Löcher in Filtermedien, wie sie bei der Verarbeitung zu konfektionierten Filtern auftreten können, erhebliche Effizienzeinbußen hinsichtlich der Abscheidung von nanoskaligen Partikel zur Folge haben.

Das wesentliche Ziel des Projektes war daher, unterschiedliche Filter auf ihre Abscheideleistung gegenüber nanoskaligen Partikeln (≥ 5 nm) zu untersuchen. Hierzu kamen Filter unterschiedlicher Klassen (zwischen F7 und U15) sowohl als Flachmedien als auch als konfektionierte Filterkassetten zum Einsatz, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu prüfen. Eine im Projekt entwickelte innovative Methodik erlaubt es, den Fraktionsabscheidegrad für Nanopartikel auch an hocheffizienten (HEPA oder ULPA) Filterkassetten zu bestimmen. Parallel erfolgte die Modellierung der Transportvorgänge zum besseren Prozessverständnis und zur Bewertung der unterschiedlichen Abscheidebeiträge.

4 Forschungsziel / Lösungsweg / Ergebnisse

Primäres Forschungsziel des Projektes war die experimentelle und theoretische Bestimmung der Abscheideleistung von Filtern mit sehr unterschiedlicher Effizienz für luftgetragene Nanopartikel (≥ 5 nm). Hierzu wurden im Vorhaben zunächst Filter aus Synthetik- wie auch Glasfasern mit unterschiedlichen Testaerosolen geprüft: Das waren typische Filter für raumluftechnische (RLT) Anlagen (z. B. Filterklassen F7 bis E10) sowie hocheffiziente HEPA und ULPA Filter (Filterklassen H13 bis U15), die z. B. bei der Versorgung von Renräumen eingesetzt werden. Zur Überprüfung der

Übertragbarkeit wurden sämtliche Untersuchungen sowohl an Ronden aus Flachmedien als auch an Filterkassetten durchgeführt. Die Messung der Fraktionsabscheidegrade an HEPA und ULPA Filterronden (DIN EN 1822-3) und die Messung an Filterkassetten (DIN EN 1822-5) wird für den Partikelgrößenbereich des MPPS bereits beschrieben. Für die experimentelle Bestimmung des Fraktionsabscheidegrades von Nanopartikeln werden aktuell Partikelgeneratoren und Versuchsabläufe erprobt. Im Rahmen des Projektes wurde speziell auch für die Filterelemente ein neuartiger Aerosolgenerator zur Bereitstellung der benötigten Testaerosole eingesetzt und eine entsprechende Mess- und Datenauswertemethodik entwickelt.

Ziel der Modellierung war ein verbessertes Verständnis der Transportprozesse von nanoskaligen Partikeln im Filter, insbesondere bei neuartigen Medien mit integrierten Nanofasern. Die übergeordnete Zielsetzung des Projektes war dabei, mit den zu entwickelnden praxisorientierten Prüfmethode und mit den Erkenntnissen aus der Modellierung einen Beitrag zur Weiterentwicklung bzw. Optimierung der Filter zu leisten.

4.1 Abscheidung von Nanopartikeln an herkömmlichen Filtermedien

4.1.1 Modifikation eines Filtermedienprüfstandes nach DIN 1822

Der an der Forschungsstelle 2 (Universität Duisburg-Essen) vorhandene Filterprüfstand für Flachfiltermedien wurde zunächst so modifiziert, dass Filterronden normkonform nach DIN EN 1822-3 getestet werden können. Zusätzlich wurde eine Aerosolbereitstellungsquelle integriert, die es ermöglicht, die Retention von Flachmedien auch gegenüber Nanopartikeln ($d_p \geq 5 \text{ nm}$) zu untersuchen. Im Folgenden wird der modifizierte Prüfaufbau vorgestellt und die erarbeitete Messstrategie dargelegt.

Die Bestimmung der Retentionskurven von HEPA- bzw. ULPA-Medien sowie die Bestimmung des fraktionellen Abscheidegrades für Nanopartikel, speziell für Medien ab der HEPA-Klasse, stellen eine besondere Herausforderung an die Messstrategie dar. Dies ergibt sich zum einen aus der deutlich gesteigerten Abscheidewahrscheinlichkeit von Nanopartikeln aufgrund von Diffusionsabscheidung an Filterfasern, zum anderen durch die generell hohe Abscheideleistung von Schwebstofffiltern. Beispielsweise hat ein ULPA-Medium der Reinheitsklasse U15 einen maximalen Penetrationswert von 0,0005 % im Bereich der Partikelgröße im Abscheideminimum (MPPS). Die Penetration im Partikelgrößenbereich der Nanopartikel wird deswegen weitaus geringer sein. Für Messungen hat dies zur

Folge, dass auf der Reingasseite von sehr geringen Partikelkonzentrationen auszugehen ist.

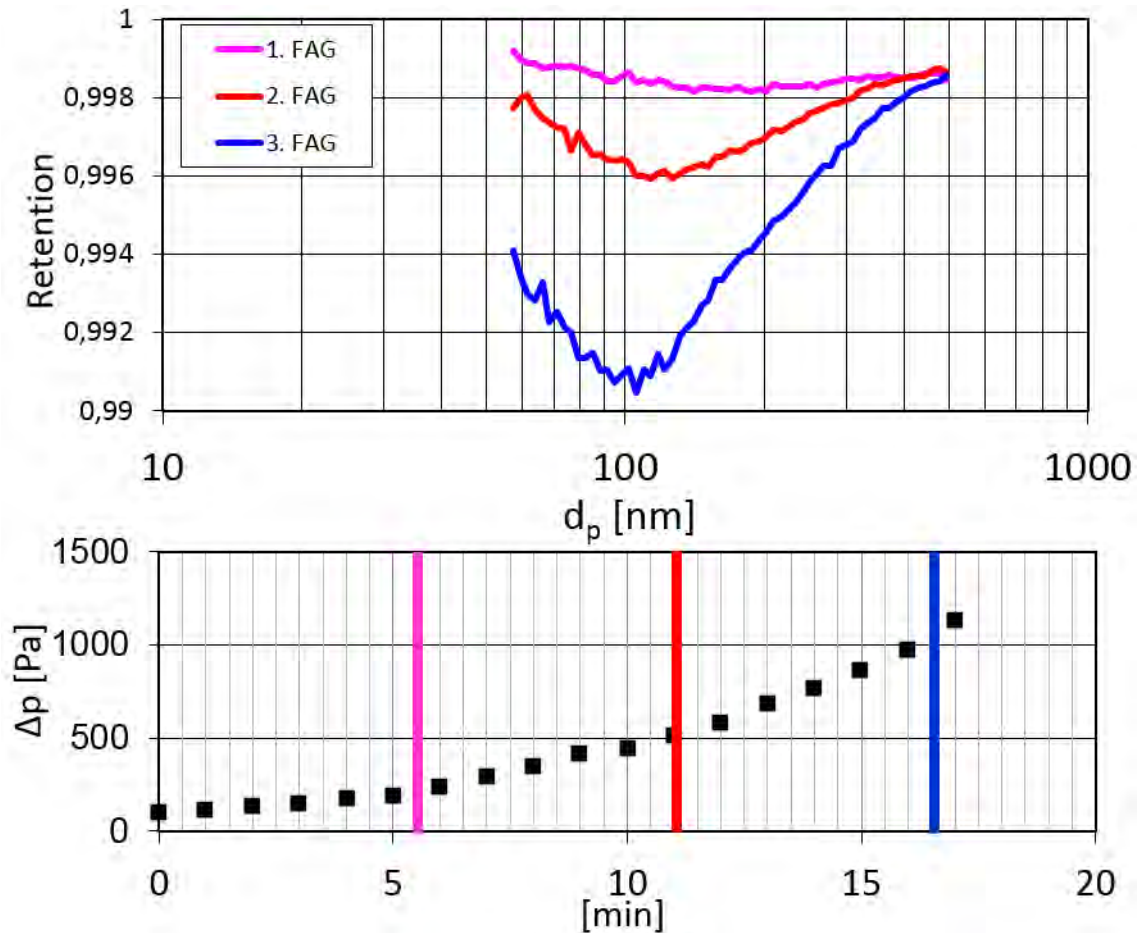


Abbildung 4.1-1: Druckverlustanstieg während FAG-Bestimmung

Um Filtertests von Schwebstofffiltern in einer angemessenen Zeit durchführen zu können, muss eine ausreichend hohe Konzentration an Partikeln gewährleistet sein. Jedoch birgt dies das Risiko, dass die Beaufschlagung mit dem Testaerosol das Medium verändert und somit nicht der Neuzustand des Mediums aufgenommen werden kann. Die DIN EN 1822:2011-1 weist im Abschnitt 7.4.5 darauf hin, dass bei Filtertests sowohl mono- als auch polydisperse Prüfaerosole zulässig sind. In Abbildung 4.1-1 sind Fraktionsabscheidegrade zu sehen, die bei Verwendung eines polydispersen Prüfaerosols mit einem Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) gemessen wurden. Dargestellt ist ein Negativbeispiel einer nicht repräsentativen Messung. Zu sehen ist das Ergebnis einer polydispersen Messung (3 Wiederholungen) an einer Filterrunde der Filterklasse E12. Während das Filtermedium mit dem Testaerosol durchströmt wurde, wurden drei Reingasmessungen durchgeführt, aus denen in chronologischer Reihenfolge die drei Retentionen (1. FAG bis 3. FAG) berechnet wurden (obere Abbildung). In dem unteren Diagramm ist der zeitliche Verlauf des Druckverlustes während dieser Messungen aufgetragen. Zur

Orientierung sind jeweils die farblichen Balken zu den Zeitpunkten dargestellt, an denen die passende Retentionsmessung abgeschlossen war.

Ersichtlich ist, dass der Retentionswert für alle Größenklassen mit der Zeit sukzessive abnimmt. Dies lässt auf eine nicht repräsentative Messung schließen, da durch die fortlaufende Beaufschlagung mit Testaerosol eine zunehmende Anzahl von Partikeln den Filter penetrieren. Die Verringerung der Retention ist dabei mit abnehmender Partikelgröße ausgeprägter. Eine mögliche Ursache für dieses Verhalten könnte in der verringerten Porosität des Mediums liegen, da das Medium mit DEHS benetzt wird. Durch die verringerte Porosität ergibt sich eine erhöhte Geschwindigkeit für die Partikel bei der Penetration durch das Medium. Die verringerte Penetrationszeit würde auch die Abnahme der Diffusionsabscheidung erklären. Darüber hinaus ist ein dramatischer Druckverlustanstieg während der 17 min Messzeit ersichtlich, in denen sich der Druckverlust vom Anfangs- bis zum Endwert mehr als verzehnfacht.

Die Problematik der ungewollten Medienbeladung während der Messung kann durch eine monodisperse Bereitstellung des Testaerosols verringert werden. Hierbei wird einem polydispersen Aerosolstrom ein Teilvolumenstrom mit Partikeln einer Mobilitätsklasse entnommen. Die Klassierung der Partikel erfolgt über die elektrische Mobilität in einem DMA (Differential Mobility Analyzer). Durch Einstellung der Spannung der Innenelektrode des DMA bzw. der korrelierenden elektrischen Mobilitätsklasse kann gezielt eine monodisperse, genauer gesagt monomobile, Partikelfraktion zum Filtertest entnommen werden. Durch die Klassierung werden um Größenordnungen geringere Partikelkonzentrationen auf das zu prüfende Filtermedium geführt, so dass nur eine sehr geringe Beladung des Mediums durch das Prüfaerosol erfolgt. Mit dieser Methode kann die Messung solange erfolgen, bis eine statistisch notwendige Anzahl von Zählereignissen detektiert wurde. Gleichzeitig bleibt der Neuzustand des Mediums weitgehend gewährleistet, was durch einen konstanten Druckverlust über dem Medium während der Messung dokumentiert wird.

Sofern der Effizienztest eines Filtermediums mit monodispersen Partikeln durchgeführt werden soll, ist laut DIN EN 1822-3 der Betrieb mit einer abströmseitig angebrachten Pumpe (Saugbetrieb) oder mit einem geregelten Druckluftbetrieb von der Anströmseite her denkbar. Der Vorteil des Saugbetriebes ist laut DIN, dass die Klassierung der Partikel im differentiellen Mobilitätsanalysator (DMA) unabhängig von der Druckdifferenz des Mediums erfolgen kann. Hingegen hat der Druckbetrieb den Vorteil, dass etwaige Undichtigkeiten im Prüfsystem das Messergebnis nicht beeinflussen. Da Undichtigkeiten und damit verbundene Fehlpartikel, die in den Prüfaufbau eingesaugt werden könnten, eine große Fehlerquelle für

Retentionsmessungen darstellen, wurde der Filtermedienprüfstand auf Druckbetrieb umgerüstet. Speziell bei Messungen mit niedriger Reingaskonzentration, wie beispielsweise bei Schwebstofffiltern, oder bei Retentionsmessungen mit Nanopartikeln können diese Fehlpartikel durch Überdruck im Prüfsystem nahezu ausgeschlossen werden.

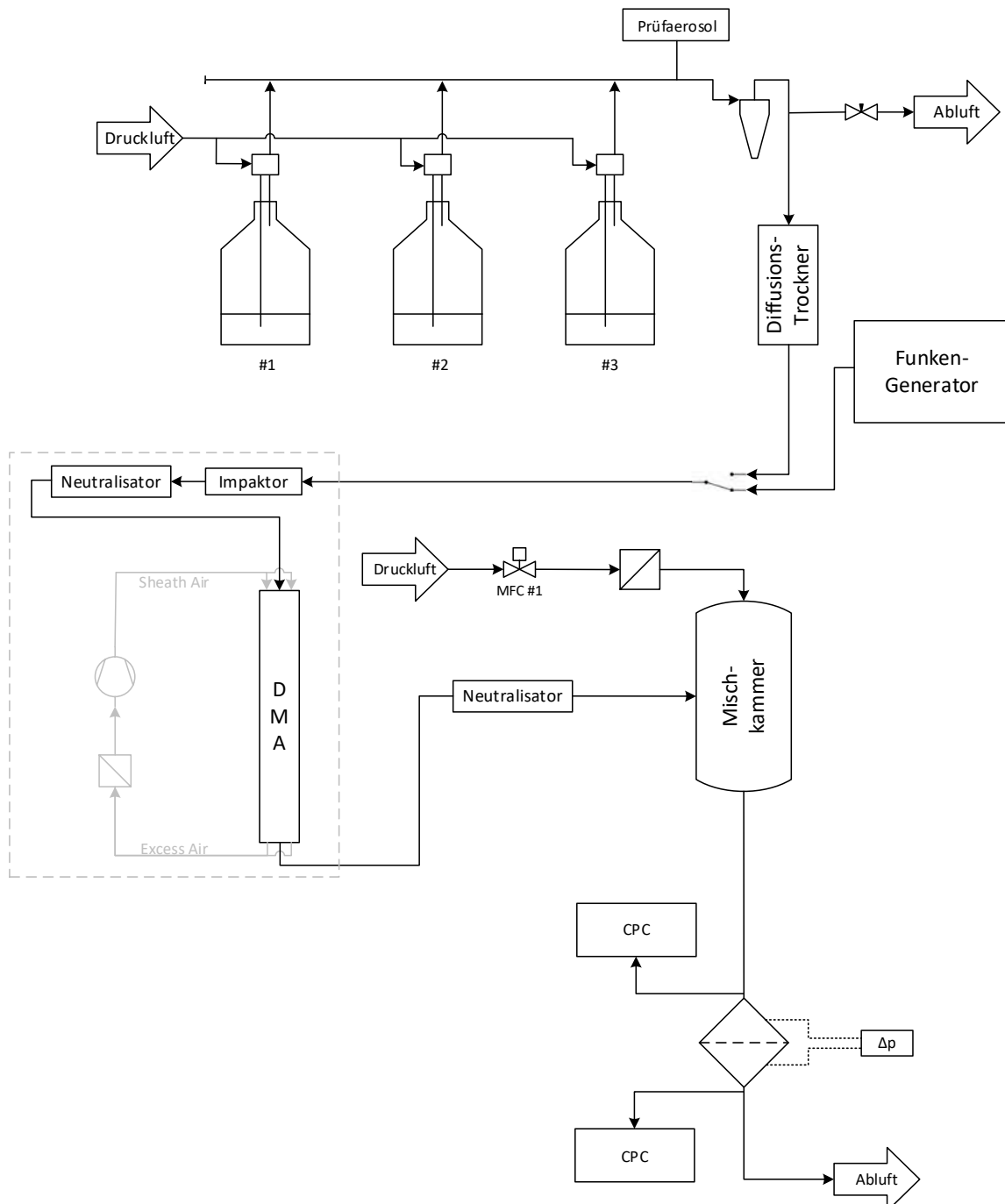


Abbildung 4.1-2: Fließbild des Prüfaufbaus für Retentionsmessung mit monomobilen Partikeln

Zur Überprüfung wurde regelmäßig die Nullzählrate der verwendeten Kondensationskeimezähler sowie das Prüfaerosol untersucht. Die Ergebnisse der Überprüfungsmessungen werden in dem nächsten Abschnitt *Messstrategie* näher diskutiert.

In der Abbildung 4.1-2 wird der Aufbau des Filtermedienprüfstandes schematisch gezeigt. Dieser kann in die Teilbereiche Aerosolgenerierung, -konditionierung sowie Filtertest unterteilt werden.

Je nach gewünschtem Partikelgrößenbereich wird ein Generator mit geeignetem Ausgangsmaterial verwendet und ein definierter Volumenstrom bereitgestellt. Das polydisperse Aerosol wird konditioniert und mit Hilfe eines DMA klassiert. Dann liegt ein konstanter Volumenstrom mit monodispersen Partikeln vor, der in einer Mischkammer mit gefilterter Druckluft vermischt und dem Probenhalter zugeführt wird. Im Bereich „Filtertest“ wird ein planares Filtermedium in einen Halter eingespannt, die Partikelkonzentration zeitgleich an- sowie abströmseitig erfasst und der Abscheidegrad berechnet.

- **Aerosolgenerierung**

Als Bereitstellungsquelle für die Aerosolgenerierung werden drei einzeln zuschaltbare Zerstäuber (3076, TSI) oder ein Funkenentladungsgenerator (GFG 1000 bzw. 3000, Palas) verwendet. Die drei Zerstäuber sind mit reinem Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS) oder mit Isopropanol (IPA) verdünntem DEHS befüllt und werden unter Verwendung von Druckluft betrieben. Sofern das DEHS verdünnt vorliegt, wird das Aerosol durch einen Diffusionstrockner geleitet, der zur Verdampfung des Lösemittels beiträgt, so dass kleinere Partikel erzeugt werden. Mit Hilfe der Zerstäuber können so Partikel im Größenbereich von ca. 40 bis 500 nm generiert werden.

Um Aerosole mit kleinerem Modaldurchmesser zu erhalten, wird ein Funkenentladungsgenerator verwendet. In diesem wird an zwei elektrisch leitfähige Elektroden mit geringem Abstand zueinander eine hohe, hochfrequente Spannung angelegt. Es kommt zu Überschlägen zwischen den Elektroden. Durch die Funkenentladung sublimiert ein Teil des verwendeten Elektrodenmaterials. Durch homogene Nukleation entstehen so zunächst kleine Primärpartikel, die aufgrund der hohen Anzahlkonzentration zu größeren Partikeln agglomerieren. Durch Variation der Funkenentladungsfrequenz und des Gasvolumenstroms (das verwendete Trägergas ist Argon) können die Anzahlkonzentration und die Partikelgröße verändert werden. Das Elektrodenmaterial selbst beeinflusst ebenfalls die Partikelgröße, so dass sich mit dem verwendeten Generator Feststoffaerosole im Größenbereich von 3 bis 50 nm herstellen lassen. Die normierten Anzahlkonzentrationen der bereitgestellten Aerosole sind in Abbildung 4.1-3 dargestellt.

Mit den zur Verfügung stehenden Elektroden ist es somit möglich, die Penetration von Nanopartikeln gegenüber Flachfiltermedien im angegebenen

Partikelgrößenbereich von 5 bis 50 nm zu testen. In Abbildung 4.1-3 sind für diesen Größenbereich Kupfer- und Silberpartikel als normierte Anzahlverteilung dargestellt. Der Partikelgrößenbereich des MPPS kann konventionell durch Zerstäubung von DEHS in Atomizern (3076, TSI) erreicht werden. Die Graphen der normierten Verteilungen von reinem und mit Isopropanol verdünntem DEHS werden ebenfalls in der Abbildung gezeigt.

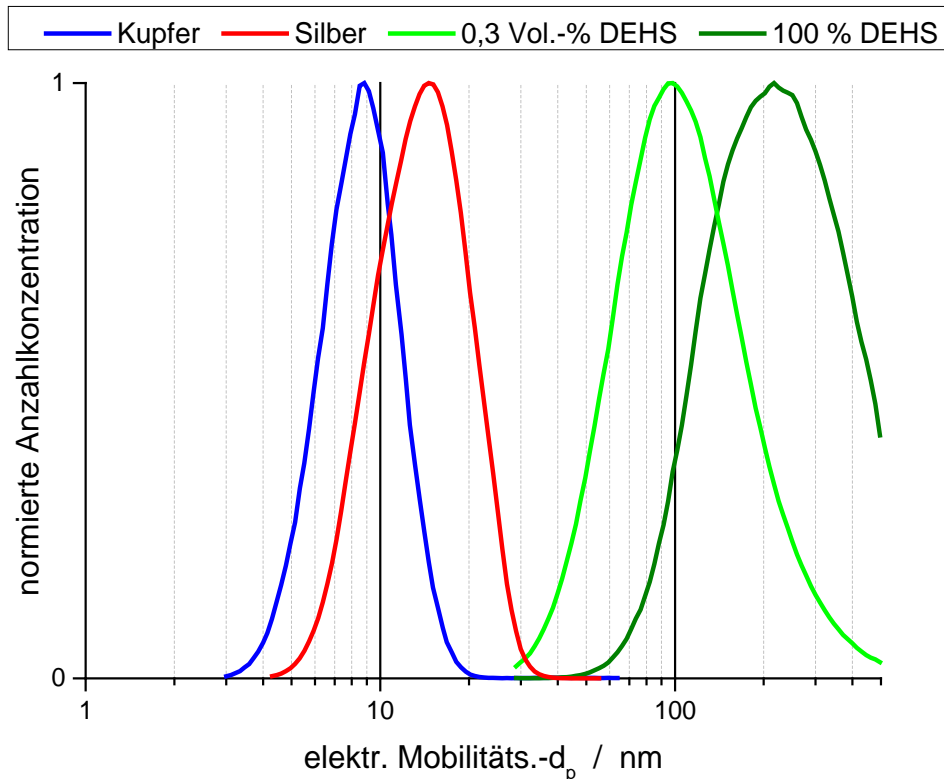


Abbildung 4.1-3: normierte Anzahlverteilung der Testaerosole

- **Aerosolkonditionierung**

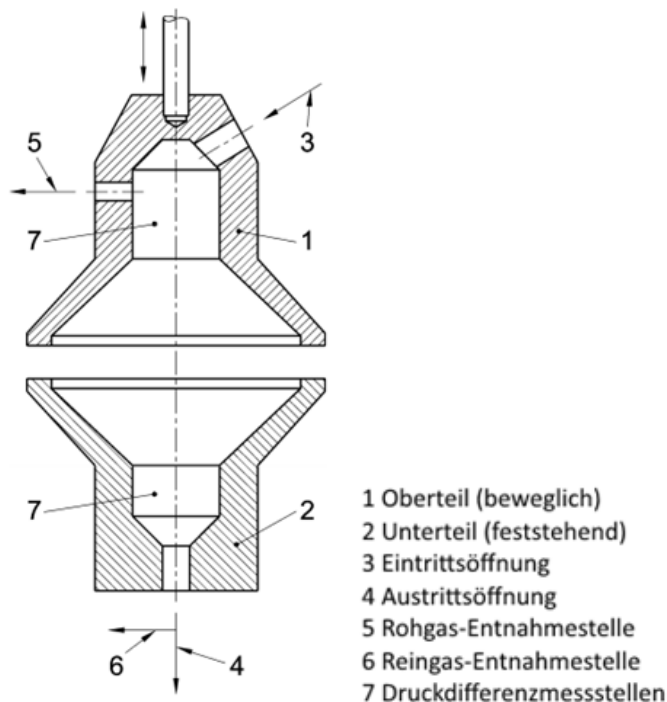
Das erzeugte polydisperse Aerosol liegt je nach Bereitstellungsquelle bei unterschiedlichen Volumenströmen vor. Um einen vorgegebenen Volumenstrom zu erhalten, wird durch ein Nadelventil an einer Gabelung der geforderte Volumenstrom eingestellt und das restliche Aerosol der Abluft zugeführt. Danach wird das Prüfaerosol durch einen Impaktor geleitet, um größere Partikel ($d_p > 600$ nm) abzuscheiden. Anschließend wird das Aerosol in einem Neutralisator in einen definierten Ladungszustand überführt. Nach Neutralisation wird das Aerosol mit partikelfreier Schleierluft im Verhältnis 1:10 im DMA klassiert. Durch Kenntnis der Volumenströme, der Geometrie des DMA und des Aerosolladungszustandes lässt sich durch Einstellen einer definierten Spannung im DMA eine Mobilitätsklasse aus

dem polydispersen Aerosol heraus klassieren.

Das quasimonodisperse Aerosol wird im Anschluss durch einen zweiten Neutralisator geführt. Dieser ist nach DIN EN 1822-3 notwendig, um das Aerosol ein zweites Mal zu neutralisieren. Auf diesen Zusammenhang wird im Unterkapitel *Einfluss des Aerosolladungszustandes auf den Abscheidegrad* in Kapitel 4.1.4 detaillierter eingegangen. Anschließend wird das monodisperse Aerosol in einer Mischkammer mit gefilterter Druckluft verdünnt, so dass sich der gewünschte Gesamtvolumenstrom ergibt. Dieser wird dann von der Mischkammer zur Prüffilteraufnahme geleitet.

- **Filtertest**

In den Abbildung 4.1-4 und Abbildung 4.1-5 ist die Prüffilteraufnahme für Medien dargestellt, welche in Anlehnung an die DIN EN 1822-3 entworfen wurde. Durch die pneumatische Ansteuerung ist gewährleistet, dass die Prüflingsronden immer mit demselben Anpressdruck eingespannt werden. Mit dieser Filterhalterung wird eine durchströmbare Fläche von $A = 100 \text{ cm}^2$ realisiert.



**Abbildung 4.1-4: Prüffilteraufnahme nach
DIN EN 1822 Blatt 3**



**Abbildung 4.1-5: Prüffilteraufnahme
des Filtermedienprüfstandes**

Zur Kontrolle des Differenzdruckes über dem Prüfling ist eine Druckmessdose an die Prüffilteraufnahme angeschlossen. Die Berechnung des Fraktionsabscheidegrades erfolgt durch zeitgleiche Detektion der roh- und reingasseitigen Partikelanzahlkonzentrationen mit zwei Kondensationskeimzählern (CPC). Der vom rohgasseitigen CPC entnommene Prüfvolumenstrom wird durch die Zugabe von

partikelfreier Mischluft ausgeglichen, so dass der gewünschte Gesamtvolumenstrom über dem Prüfling erhalten bleibt. Sofern dies nicht beachtet wird, ergibt sich folglich eine zu geringe Mediengeschwindigkeit.

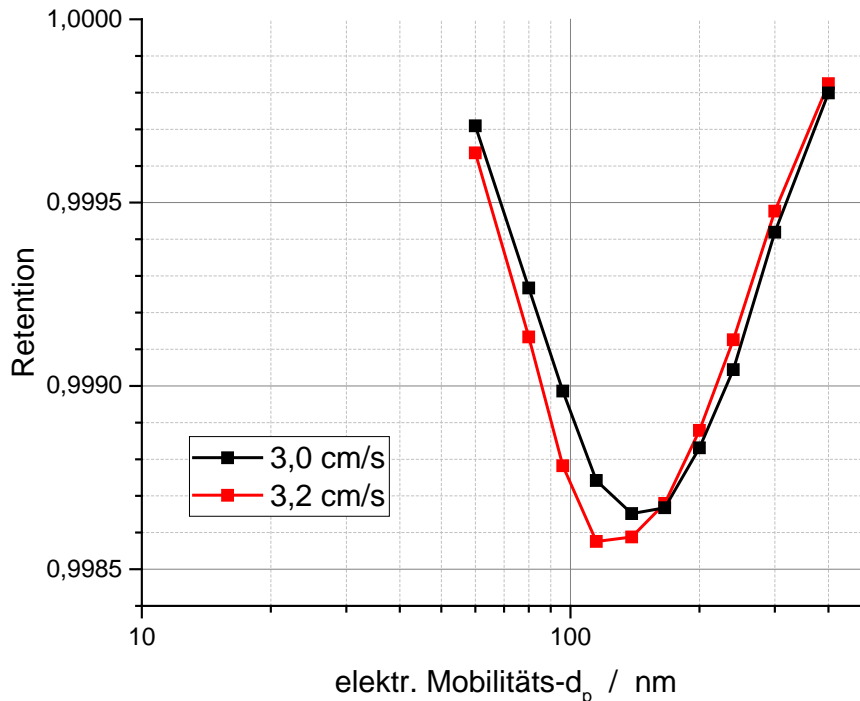


Abbildung 4.1-6: FAG Einfluss der Anströmgeschwindigkeit

Abbildung 4.1-6 verdeutlicht den Einfluss auf die Abscheidung der um nur 0,2 cm/s verringerten Anströmgeschwindigkeit. Dabei ist der Abscheidegrad (Retention) über dem elektrischen Mobilitätsdurchmesser aufgetragen. Die schwarze Kurve zeigt hierbei den Fraktionsabscheidegrad bei einer Mediengeschwindigkeit von 3 cm/s und die rote Kurve jenen bei 3,2 cm/s. Vergleicht man die Minima im MPPS – Most Penetrating Particle Size – dann ist sowohl eine Verringerung von 99,865 % auf etwa 99,858 % als auch eine Verschiebung des Durchmessers erkennbar.

Der Theorie entsprechend wird die Abscheideleistung bei höheren Geschwindigkeiten verschlechtert und die MPPS-Lage verschiebt sich hin zu kleineren Partikelgrößen, was exakt beobachtet werden kann. Dies zeigt die Relevanz der Kenntnis aller vorhandenen Volumenströme im Prüfsystem, und es zeigt ebenso die Genauigkeit des Filtermedienprüfstandes. Mit dem in diesem Kapitel vorgestellten Umbau des Filtermedienprüfstandes sind Messungen der Filterklassen F7 bis U15 gegenüber Nanopartikeln und DEHS im Größenbereich des MPPS messbar.

4.1.2 Durchführung der Messung und Messstrategie

In diesem Kapitel wird die Durchführung der Messung und die Messstrategie vorgestellt und diskutiert. Dabei wird auf die Abscheidegradmessung mit monodispersen und polydispersen Testpartikeln sowie deren Erzeugung eingegangen und deren Vor- und Nachteile diskutiert. Des Weiteren werden die Zähleffizienz von Kondensationskeimzähler für Nanopartikel und die Diffusionsverluste im Prüfaufbau untersucht und als Fehlerquellen diskutiert.

- **Durchmesserbereich/Randbedingungen**

Die Abscheidegradkurven der Filterrunden werden in diesem Projekt in Anlehnung an DIN EN 1822-3 durch logarithmisch annähernd äquidistante Stützstellen gebildet. In der Norm sind bei diesem Vorgehen mindestens sechs Durchmesser gefordert. Im Rahmen dieses Projektes wurden folgende Durchmesser für die Bildung der Retentionskurve gewählt: Für den Bereich der Nanopartikel die Durchmesser 5, 7, 10, 17, 30, und 45 nm. Diese Partikelgrößen werden durch den Funkenentladungsgenerator mit dem Partikelmaterialien Silber und Kupfer bereitgestellt. Um den bisher normrelevanten Bereich des MPPS darzustellen, wurden die Durchmesser 60, 80, 96, 116, 138, 166, 200, 240, 300, 400 und 500 nm gewählt. Hierfür werden DEHS-Partikel aus Zerstäubungsprozessen verwendet.

Ziel dieser Messreihen ist es, Fraktionsabscheidegradkurven (FAG) der Medien ohne strukturverändernde Beladung durch das Testaerosol zu erhalten. Als Indikator hierfür wird der Druckverlustanstieg während einer Testmessung herangezogen, der geringer als 10 % des Anfangsdruckverlustes sein soll. Zusätzlich wurden alle getesteten Filterrunden vor, nach und zum Teil zwischen den Effizienzmessungen gewogen.

Allgemein werden bei den Tests die Effizienzen jeweils von kleinen hin zu größeren Partikeldurchmessern bestimmt, um mögliche Beladungseffekte zu minimieren, da die Abscheidung von großen Partikeln relevanter für den Druckverlustanstieg ist. Der Volumenstrom im Filtermedienprüfstand ergibt sich für Medientests aus Herstellerangaben der dazugehörigen konfektionierten Filterelemente. In einigen Fällen musste hierzu die Filterfläche händisch nachgemessen werden, was ggf. zu zusätzlichen Unsicherheiten geführt haben kann. Die Filterelemente sind mit einem Nennvolumenstrom gekennzeichnet, bei dem sie einer definierten Filterklasse entsprechen sollen. Aus dem ausgewiesenen Volumenstrom und der effektiven Filterfläche wird die Geschwindigkeit berechnet, bei der die Flachmedien getestet werden. Dies erlaubt einen Vergleich der Abscheidegrade von Flachmedien und ver-

arbeiteten Filterelementen.

- **Monodisperse Verteilung und Mehrfachladungseffekte**

Um monodisperse Partikel für die Messung zu erhalten, muss, wie bereits erwähnt, das Aerosol durch einen ersten Neutralisator ins Ladungsgleichgewicht überführt, um im DMA klassiert zu werden. Da im DMA nur die Partikel den Austrittsspalt und anschließend den Filterhalter erreichen, die eine bestimmte elektrische Mobilität haben, trägt jedes Partikel nach der Klassierung mindestens eine Elementarladung.

Die Durchführung eines Filtertests mit einem geladenen Aerosol in dieser Form spiegelt keine realitätsnahen Bedingungen wider. Um Messungen nach DIN EN 1822-3 durchführen zu können, wurde ein weiterer Neutralisator erworben, welcher nach der Aerosolbereitstellung in den Messaufbau installiert wurde. Dieser Neutralisator überführt das Testaerosol erneut in ein definiertes Ladungsgleichgewicht, so dass Filtertests mit einer realitätsnahen Aufladung durchgeführt werden können. Durch Ein- oder Ausschalten dieses zusätzlichen Neutralisators ist es möglich, diesen Einfluss genauer zu quantifizieren. Die Ergebnisse dieser Vergleichstests sind in Kapitel 4.1.3 gezeigt und dienen als Grundlage für die Modellierung in Kapitel 4.7.

Zur Überprüfung des bereitgestellten Testaerosols wurden Messungen mit einem nach der Klassierung geschalteten Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) durchgeführt, um den Durchmesser der klassierten Partikel sowie die geometrische Standardabweichung der Partikelgrößenverteilung zu erfassen. Die Testaerosole (hier Silbernanopartikel) sind in Abbildung 4.1-7 als normierte Anzahlkonzentration über der Partikelgröße dargestellt. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der über die Spannung am Klassierer berechneten Partikelgrößen (Legende) und der mit einem SMPS gemessenen Partikelgrößen. Die geringe Abweichung der Messergebnisse kann durch die begrenzte Auflösung des SMPS mit 64 Größenklassen pro Dekade erklärt werden. Die geometrische Standardabweichung der jeweiligen Größenverteilungen beträgt stets $\sigma < 1,2$, so dass die Bereitstellung als quasimonodispers anzusehen ist.

Eine genauere Untersuchung der quasimonodispersen Anzahlverteilung wird beispielhaft an Silbernanopartikeln mit einem Modaldurchmesser von 38,5 nm gezeigt (Abbildung 4.1-8). In der Größenverteilung ist ein geringfügiges Vorkommen an größeren (55,2 nm) und kleineren Partikeln (26,9 nm) zu erkennen. Nachfolgend wird die Ursache hierfür erläutert sowie ein möglicher Einfluss auf die Retention eines Filtermediums diskutiert.

Die erhöhte Anzahlkonzentration der kleineren Partikel kann durch Mehrfachaufladung der Partikel im zweiten Neutralisator erklärt werden. In Abbildung 4.1-9 ist die Auswirkung von ein- und mehrfach geladenen Partikeln auf deren Durchmesser bei einer SMPS-Messung visualisiert. In dem Diagramm ist die elektrische Mobilität über dem Partikeldurchmesser aufgetragen. Die horizontale, rot gestrichelte Gerade zeigt die Mobilität, die durch die Spannung am Klassierer eingestellt wird.

Ein Partikel mit einer Elementarladung, welcher durch die Klassierung im DMA einen physikalischen Durchmesser von 38,5 nm besitzt, hat eine geringfügige Wahrscheinlichkeit, im nachgeschalteten Neutralisator eine zweite Elementarladung zu erhalten (Punkt 2 in Abbildung 4.1-9). Dies erhöht seine Mobilität, daher wird er im SMPS als kleinerer Partikel mit einem Durchmesser von 26,9 nm detektiert (Punkt 1 in Abbildung 4.1-9). Da dieses Partikel jedoch einen physischen Durchmesser von 38,5 nm besitzt, muss keine Korrektur für die Retention erfolgen.

Bereitstellung monodisperser Nanopartikel

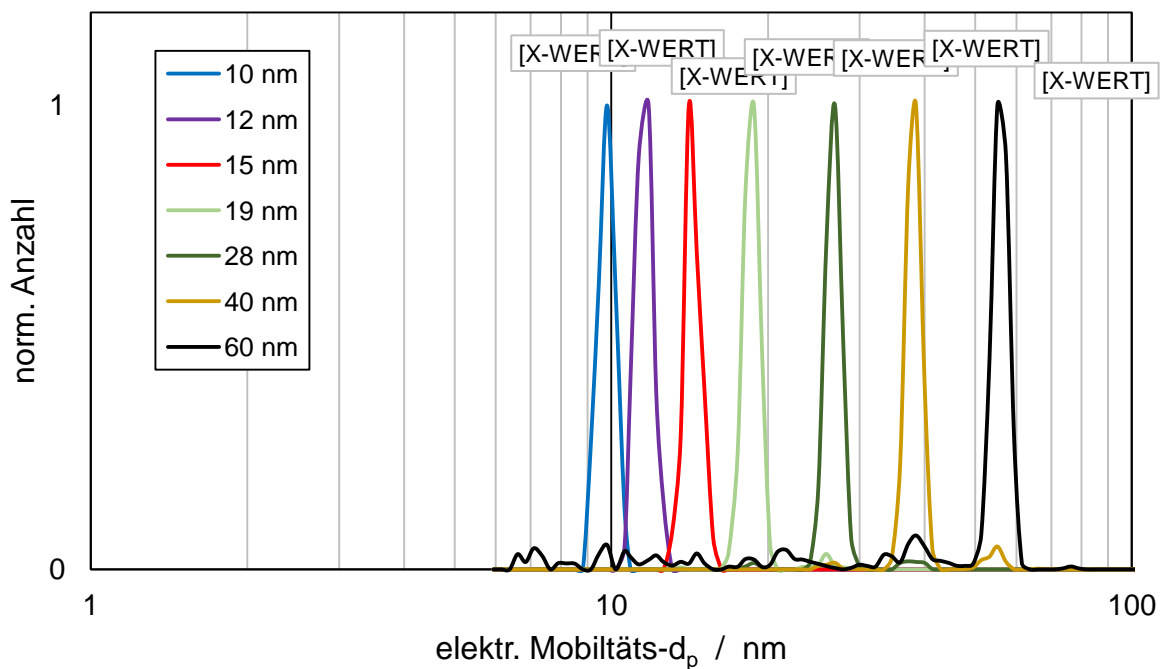


Abbildung 4.1-7: SMPS-Messung monodisperser Silbernanopartikel

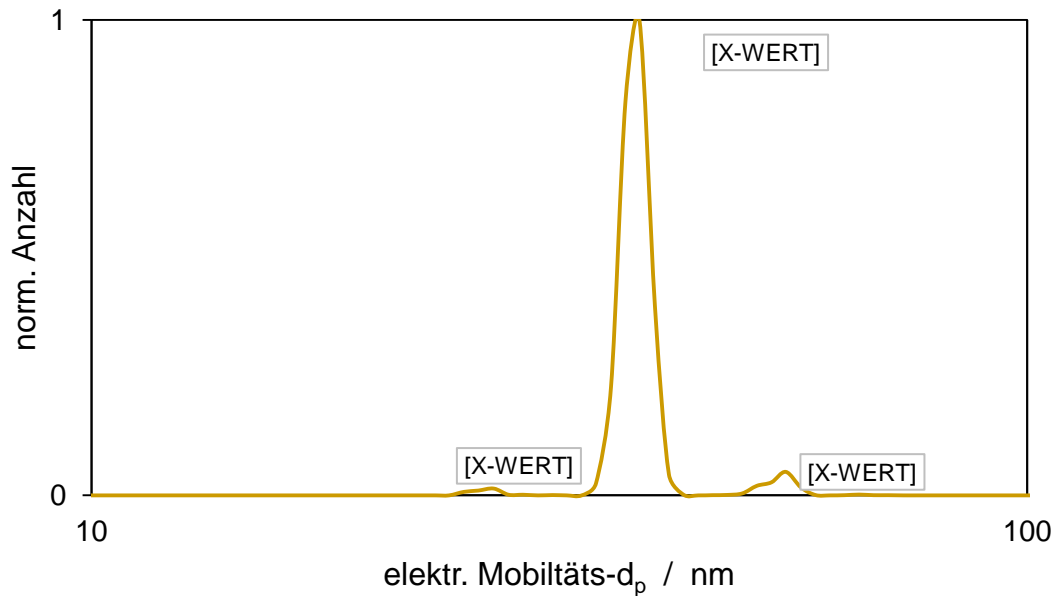


Abbildung 4.1-8: Mehrfachladungen bei monomobilen Partikeln

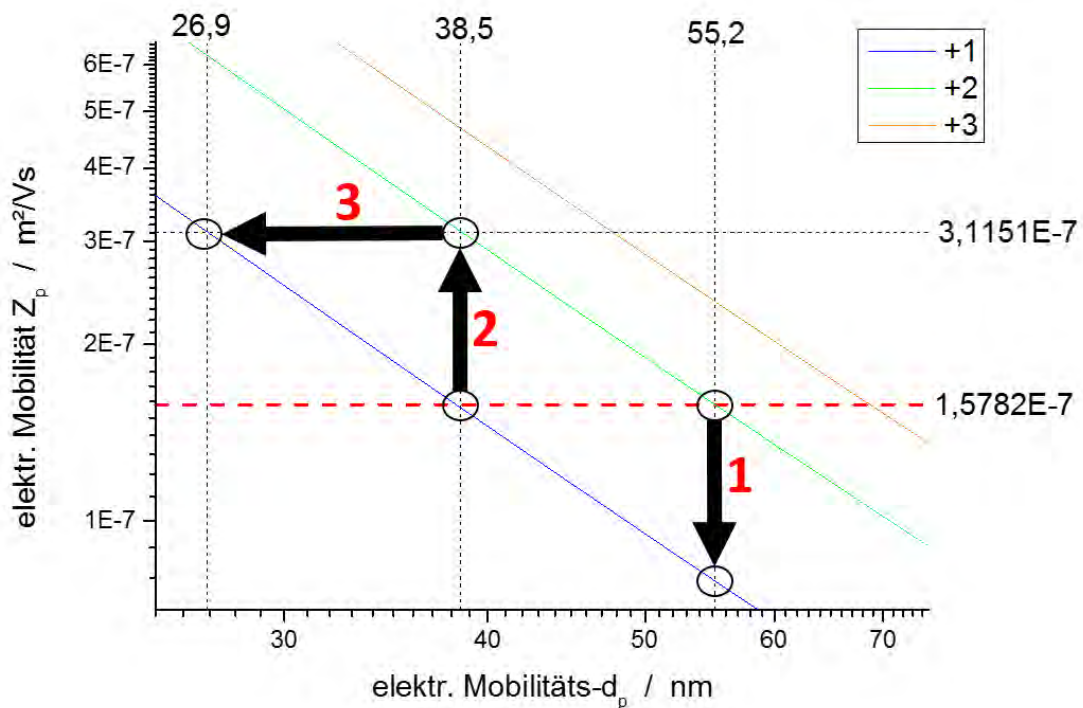


Abbildung 4.1-9: Korrelation zwischen elektr. Mobilität und Partikeldurchmesser

Das Vorkommen der Partikel mit einem Durchmesser von 55,2 nm liegt ebenfalls in Mehrfachladungen begründet. Es handelt sich um Partikel, die aufgrund des ersten Neutralisators eine zweifache Elementarladung erhalten haben und dadurch der gleichen Mobilitätsklasse entsprechen wie ein Partikel mit einem Durchmesser von 38,5 nm mit nur einer Elementarladung. Nach der Klassierung im DMA verlieren diese Partikel im nachgeschalteten Neutralisator diese zweite Elementarladung mit

hoher Wahrscheinlichkeit, sodass sie nur noch einfach geladen sind. Im SMPS werden diese Partikel nun mit ihrem physischen Durchmesser von 55,2 nm detektiert (Punkt 1 in Abbildung 4.1-9). Somit müsste eine Korrektur für die Effizienz erfolgen, da Partikel mit anderem Durchmesser eine andere Abscheidewahrscheinlichkeit besitzen. Die Auswirkung dieses Vorkommens wird nachstehend abgeschätzt.

In dem folgenden Rechenbeispiel wird in Fall A angenommen, dass alle bereitgestellten Partikel bei einem Filtertest den Durchmesser 38,5 nm besitzen; für diesen Durchmesser wird eine Retention gebildet. In Fall B wird berücksichtigt, dass ein bestimmter Prozentsatz (4,71 %) der Partikel einen Durchmesser von 55,2 nm besitzen und folglich die Diffusionsabscheidung für größere Partikel geringer ist. Die restlichen Partikel werden mit einem Durchmesser von 38,5 nm angenommen (95,29 %). Durch diesen Anteil der größeren Partikel wird sich der Retentionswert im Fall B im Gegensatz zum Fall A verringern. In der Tabelle 4.1-1 werden für die Fälle A und B Beispielrechnungen der Retention von Medien der Filterklassen F7 und E10 gezeigt.

Tabelle 4.1-1 Fehlerabschätzung für die Retention in Bezug auf Mehrfachladung von Partikeln

Fall A				Fall B		
	d_p	Anzahl	Retention	Anzahl	Retention	Abweichung [%]
F7	38,5 nm	100 cm ⁻³	0,8431	95,29 cm ⁻³	0,8431	
	55,2 nm	-	-	4,71 cm ⁻³	0,7478	
	Gesamt	100 cm ⁻³	0,8431	100 cm ⁻³	0,8386	-0,536 %
E 10	38,5 nm	100 cm ⁻³	0,999820	95,29 cm ⁻³	0,999820	
	55,2 nm	-	-	4,71 cm ⁻³	0,999099	
	Gesamt	100 cm ⁻³	0,999820	100 cm ⁻³	0,999786	-0,003 %

Die Rechnungen zeigen, dass die Abweichung des Retentionswertes im Fall B einen Wert von weniger als 1 % besitzt. Des Weiteren ist zu sehen, dass mit steigender Filterklasse der Einfluss geringer wird, so dass gezeigt werden kann, dass die Korrektur für dieses Projekt vernachlässigbar ist. Ferner bedeutet dies, dass die Partikel der gezeigten Größenverteilung aus Abbildung 4.1-8 für eine Effizienzmessung als monodispers angenommen werden können. Somit sind

vorhandene mehrfach geladene Partikel nach der Klassierung schon durch die Bereitstellung in nur geringer Konzentration vorhanden und der Fehler in der Abscheidegradberechnung kann minimiert werden.

- **Fehlerberechnung, Zählereignisse und Messzeit**

In Vorversuchen wurden teilweise unterschiedliche Roh- und Reingaskonzentrationen in der Prüffilteraufnahme ohne vorhandenes Filtermedium detektiert. Um diesen potentiellen Fehler zu analysieren, wurden die Ursachen im Detail untersucht. Als mögliche Ursache sind Diffusionsverluste in der Prüffilteraufnahme denkbar aufgrund der größeren Wegstrecke, die die Partikel bei der Reingasdetektion zurücklegen. Zur Verdeutlichung dieses Sachverhalts dient die Abbildung 4.1-10.

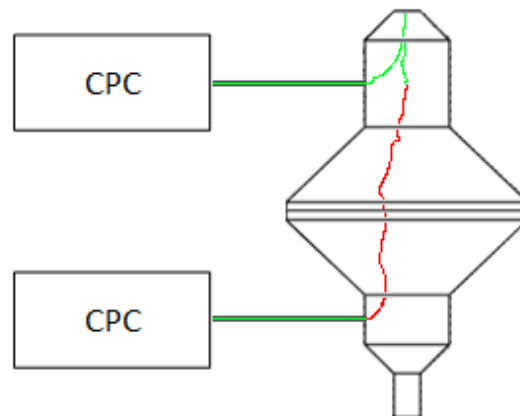


Abbildung 4.1-10: Trajektorien in der Prüffilteraufnahme

In dieser Abbildung sind die Partikeltrajektorien innerhalb der Prüffilteraufnahme skizziert. Die grüne Trajektorie soll dabei die Flugbahn der Partikel darstellen, die bei Roh- sowie Reingasprobenahme die gleiche Weglänge zurücklegen. Diese Wegstrecken müssen für die Effizienzmessung nicht berücksichtigt werden, da die auftretenden Verluste für die Roh- und Reingasmessung aufgrund der identischen Aufenthaltsdauer der Partikel in den Zuleitungen gleich sind. Die rote Trajektorie stellt die zusätzliche Weglänge eines Partikels dar, der sich durch die Prüffilteraufnahme bewegt und im Reingaszähler detektiert wird. Es gilt, die Diffusionsverluste, die über diese Wegstrecke erfolgen, abzuschätzen und ggf. zu berücksichtigen, da sonst die Effizienz eines Mediums zu hoch angenommen wird.

Zur Abschätzung dieser Verluste wurden Partikelmessungen an Roh- und Reingassonde ohne vorhandenes Filtermedium in der Filterprüfaufnahme durchgeführt. In

Abbildung 4.1-11 sind die Konzentrationen als Quotient aus Roh- und Reingaskonzentration über dem Partikeldurchmesser für unterschiedliche Geschwindigkeiten aufgetragen.

Für Partikel größer als 40 nm ist ein asymptotischer Verlauf des Konzentrationsquotienten gegen den Wert 1 zu erkennen. Das heißt, für größere Partikel muss keine Korrektur bei der Berechnung der Retention erfolgen. Mit kleiner werdendem Partikeldurchmesser ist eine deutliche Abweichung der Konzentrationen von Roh- und Reingasmessung zu erkennen. Bei Partikeln mit einem Durchmesser von 5 nm wurde eine um 50 % erhöhte Konzentration an der Rohgassonde detektiert, was zur Folge hat, dass dies bei der Effizienzmessung berücksichtigt werden muss. Es ist jedoch kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Filtrationsgeschwindigkeit und dem Quotienten erkennbar. Dies weist darauf hin, dass es sich wahrscheinlich nicht um Diffusionsverluste innerhalb der Prüffilteraufnahme handelt, da diese verweilzeit- und somit geschwindigkeitsabhängig wären. Zur Ergänzung wird im Folgenden eine Abschätzung der Diffusionsverluste durchgeführt, um diese ausschließen zu können.

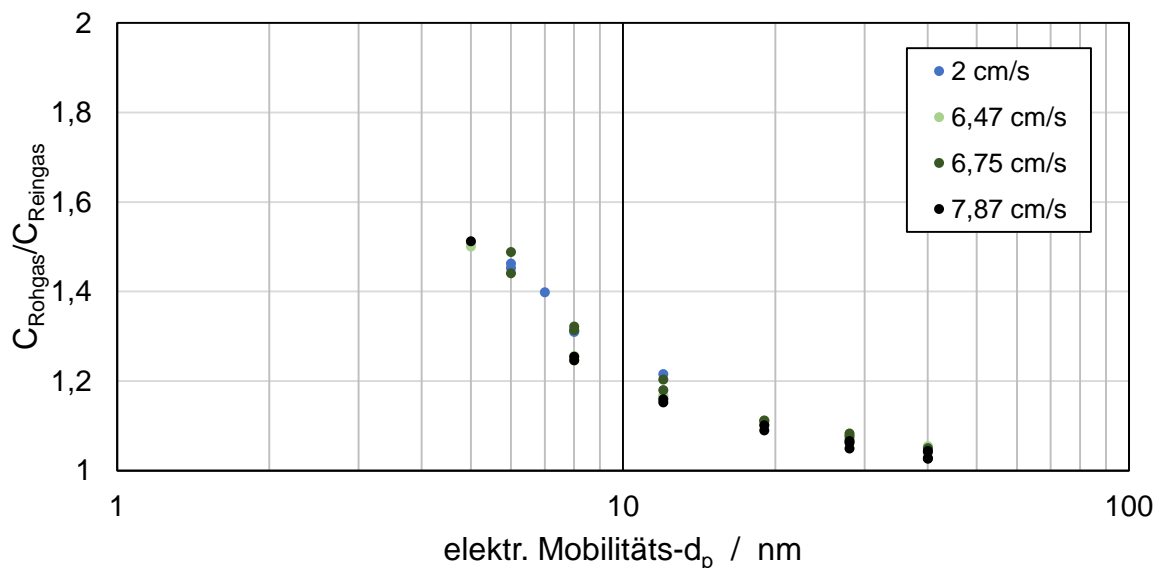


Abbildung 4.1-11: Quotient der Roh- und Reingaskonzentration ohne Filtermedium

Die Vergrößerung des Quotienten hin zu kleiner werdenden Partikeln deutet auf unterschiedliche Detektionsgrenzen der Kondensationskeimzähler hin und wird im Anschluss an die Diffusionsverlustuntersuchung näher untersucht.

- **Diffusionsverluste**

Aufgrund der Brown'schen Molekularbewegung ergibt sich eine erhöhte Mobilität der Partikel mit abnehmendem Durchmesser und dadurch eine erhöhte Wahrscheinlichkeit der Abscheidung beispielsweise an Innenwandungen von Schläuchen. Zur

generellen Vermeidung von Partikelverlusten wurden daher die Aufenthaltszeiten der Partikel konstruktiv verringert. Dazu wurden alle Schlauchlängen im System reduziert und die Volumenströme maximiert. Limitierendes Element für die Volumenströme war hierbei die Schleierluftbereitstellung im DMA mit einem Maximum von 8,0 l/min. Um ein Verhältnis von Schleierluft zu Aerosolfluss von 10:1 zu wahren, ergab sich ein maximal möglicher Aerosolvolumenstrom von 0,8 l/min. Des Weiteren wurden die Kondensationskeimzähler im „High-Flow“-Modus mit einem Volumenstrom von 1,5 l/min betrieben.

- **CPC-Vergleich**

Nachdem mögliche Diffusionsverluste im vorherigen Kapitel ausgeschlossen werden konnten, ist es naheliegend, dass die unterschiedlichen Quotienten der Roh- und Reingaskonzentration bei den Messungen ohne Filtermedium durch die untere Nachweisgrenze der Kondensationskeimzähler bedingt sind (Vergleich Abbildung 4.1-11). Zur Berücksichtigung der geminderten Konzentration des genutzten Reingaszählers wurde bei den Filtereffizienzmessungen eine Korrektur durch den Konzentrationsquotienten k eingeführt, der bei jeder Messung wie folgt berechnet

$$k = \frac{C_{\text{rohgas ohne Medium}}}{C_{\text{reingaskonz., ohne Medium}}}$$

und anschließend bei der Berechnung der Retention berücksichtigt

$$\text{Retention} = 1 - k \frac{C_{\text{rein}}}{C_{\text{roh}}}$$

wurde. Mit dieser Vorgehensweise kann die Effizienz der Filtermedien mit Kondensationskeimzählern unterschiedlicher Nachweisgrenzen verlässlich gemessen und berechnet werden.

Sofern die erzeugten Partikel größer als 50 nm waren, zeigten die genutzten CPCs einen konstanten Konzentrationsquotienten ohne Partikelgrößenabhängigkeit. In Abbildung 4.1-12 ist eine Vergleichsmessung der beiden CPCs zu sehen, in der die Rohgas- über der Reingaskonzentration aufgetragen ist.

Man erkennt, dass der Rohgas-CPC im Mittel etwa 6 % mehr Partikel detektiert und dass nahezu alle Messpunkte innerhalb einer Abweichung von ± 10 % liegen.

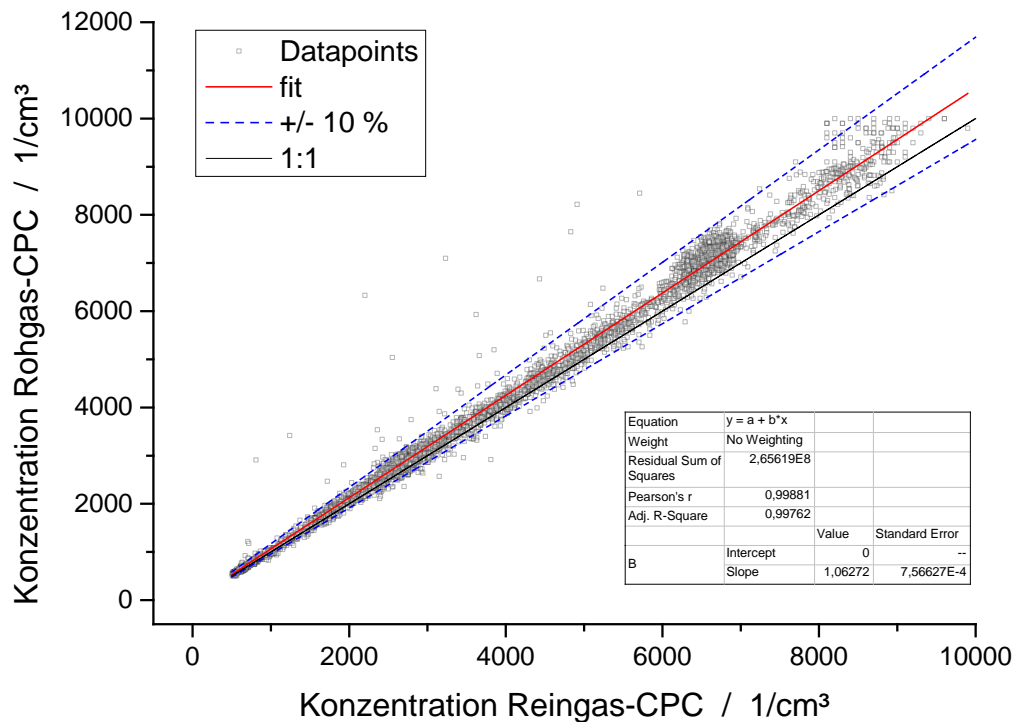


Abbildung 4.1-12: Vergleich der genutzten Kondensationskeimzähler

Mit dem neu erworbenen Kondensationskeimzähler UFCPC 50 der Firma Palas konnte mit neu eingestellten Temperaturwerten ($T_{\text{sat}} = 40 \text{ °C}$ und $T_{\text{cond}} = 10 \text{ °C}$) die Detektionsgrenze für Nanopartikel optimiert werden. Um weitere Einflüsse durch die verwendeten Kondensationskeimzähler besser verstehen und somit ggf. ausschließen zu können, wurde eine Vergleichsmessung aller im Projekt benutzten CPCs der Forschungsstellen 1 und 2 durchgeführt. Hierbei zeigten sich u.a. die reproduzierbaren o.g. Abweichungen zwischen den CPCs der FS2. Es zeigte sich zudem aber auch, dass ein neuer wasserbasierter CPC der FS1 (TSI Modell 3787) entgegen der Spezifikation nicht in der Lage ist, DEHS Partikel zu detektieren. Dies wird auf die starke Hydrophobie von DEHS zurückgeführt. Butanolbasierte CPCs hingegen zeigten keinerlei Minderbefunde für DEHS Partikel. Weiterhin konnte in der Studie gezeigt werden, dass alle verwendeten CPCs, unabhängig von deren Alter, ihre Spezifikation bezüglich der detektierbaren Partikelgrößen einhalten. Ältere CPCs weisen aber in der Regel eine wesentlich flachere Detektionskurve auf als neuere CPCs. Die Studie wurde zwischenzeitlich in *Aerosol and Air Quality Research* publiziert (Asbach *et al.*, *Aerosol Air Qual. Res.* **17**: 1132-1141, 2017).

- **Fehlerrechnung**

Da der Effizienztest auf der Partikelzählung basiert, ist es wichtig, die exakte Anzahl

der detektierten Partikel zu kennen, um die Messunsicherheit quantifizieren zu können. Hierzu zählen allerdings nur jene Partikel, die vom Kondensationskeimzähler tatsächlich gemessen werden, das heißt, ohne interne Korrekturrechnung der Messtechnik aufgrund von Verdünnungen oder Untersuchung optischer Teilvolumina.

Manche CPCs haben einen Betriebsmodus mit höherer Durchflussrate (High-Flow-Modus), um beispielsweise die Diffusionsverluste in den Probenahmeleitungen zu minimieren. Jedoch erhöht dieser Modus nicht den Volumenstrom in der optischen Messzelle. Bei anderen CPCs wiederum wird nicht der gesamte Querschnitt der Probenahmeleitung untersucht, sondern nur ein Teilbereich. Für die Untersuchungen innerhalb dieses Projektes wurde ein Mindestmaß von 100 reingasseitigen Zählereignissen pro Messung als Voraussetzung für ein statistisch sicheres Ergebnis festgelegt. Dieses Mindestmaß orientiert sich an der DIN EN 1822-2, aus der hervorgeht, dass bei einer Partikelanzahl von weniger als 100 Partikeln das 95 %-Vertrauensintervall nach der Poissonverteilung errechnet werden muss, welche in Abbildung 4.1-13 zu sehen ist.

Erst ab 100 Zählereignissen geht die Berechnung des Vertrauensintervalls in die symmetrische Normalverteilung über, wobei die untere und obere Vertrauensgrenze durch die folgende Formel berechnet werden kann.

$$N_{95\%} = N \pm 1,96 \times N^{1/2}$$

Somit kann unter Annahme eines *worst case* (obere Vertrauensgrenze der Reingaspartikel und untere Vertrauensgrenze der Rohgaspartikel) und *best case* (untere Vertrauensgrenze der Reingaspartikel und obere Vertrauensgrenze der Rohgaspartikel) eine Fehlerrechnung für die Abscheidung aufgrund der Partikelstatistik durchgeführt werden.

Eine zusätzliche Fehlerquelle stellt die Messunsicherheit der Kondensationskeimzähler dar. Diese verwenden meist zwei Betriebsmodi, die mit unterschiedlichen Messunsicherheiten einhergehen. Sofern eine geringe Konzentration zu messen ist, werden die Partikel durch Zählung der Streulichtimpulse im Einzelzählmodus detektiert. Sofern die Konzentration erhöht ist und der Einzelzählmodus nicht mehr verwendet werden kann (ab etwa 10.000 Partikel/cm³), können manche CPCs das durch die Partikel gestreute Licht in der optischen Messzelle auswerten und einer Konzentration zuordnen. Dieser Betriebsmodus geht mit einer maximalen Messunsicherheit von $\pm 20\%$ einher. Der Einzelzählmodus erreicht eine maximale Messunsicherheit von $\pm 10\%$ und findet durch die monodisperse Bereitstellung der Partikel aufgrund der verringerten Konzentrationen häufiger Anwendung.

Partikelanzahl	Untere Vertrauensgrenze	Obere Vertrauensgrenze	Partikelanzahl	Untere Vertrauensgrenze	Obere Vertrauensgrenze
0	0,0	3,7	35	24,4	48,7
1	0,1	5,6	40	28,6	54,5
2	0,2	7,2	45	32,8	60,2
3	0,6	8,8	50	37,1	65,9
4	1,0	10,2	55	41,4	71,6
5	1,6	11,7	60	45,8	77,2
6	2,2	13,1	65	50,2	82,9
8	3,4	15,8	70	54,6	88,4
10	4,7	18,4	75	59,0	94,0
12	6,2	21,0	80	63,4	99,6
14	7,7	23,5	85	67,9	105,1
16	9,4	26,0	90	72,4	110,6
18	10,7	28,4	95	76,9	116,1
20	12,2	30,8	100	81,4	121,6
25	16,2	36,8			
30	20,2	42,8			

Abbildung 4.1-13: Auszug aus der DIN EN 1822 – Blatt 2

Unter Berücksichtigung des systematischen Gerätefehlers und unter Annahme der größtmöglichen Abweichung (hier $\pm 10\%$) und einer anschließenden Berücksichtigung des statistischen Fehlers aufgrund der Anzahl der detektierten Partikel kann eine Fehlerrechnung bei Fraktionsabscheidegraden durchgeführt werden. In Abbildung 4.1-14 ist diese beispielhaft für eine Medienmessung aufgezeigt, die mindestens 100 detektierte Reingaspartikel beinhaltet. Hierbei ist die Messunsicherheit als blaue Fläche dargestellt, während die Standardabweichung der Messung dreier Ronden als Fehlerbalken an den Mittelwerten der Retention sichtbar ist.

Es ist ersichtlich, dass unter Annahme des größtmöglichen Fehlers die maximale Messunsicherheit etwas größer als die Standardabweichung der Messungen zueinander ist. Somit kann beispielsweise bei diesem Medium keine verlässliche Aussage darüber getroffen werden, ob das Medium die Filterklasse H13 erfüllt, da sowohl der Mittelwert als auch die Messunsicherheit das H13-Minimum unterschreiten.

Dies zeigt zum einen die Notwendigkeit einer ausreichenden Reingaspartikelstatistik, damit verlässliche Aussagen über den Abscheidegrad von Filtermedien getroffen werden können. Zum anderen zeigt diese Fehlerrechnung, dass selbst unter Annahme der größtmöglichen Fehler eine ausreichende Messgenauigkeit am Filtermedienprüfstand gegeben ist, die in der Größenordnung der Standardabweichung liegt.

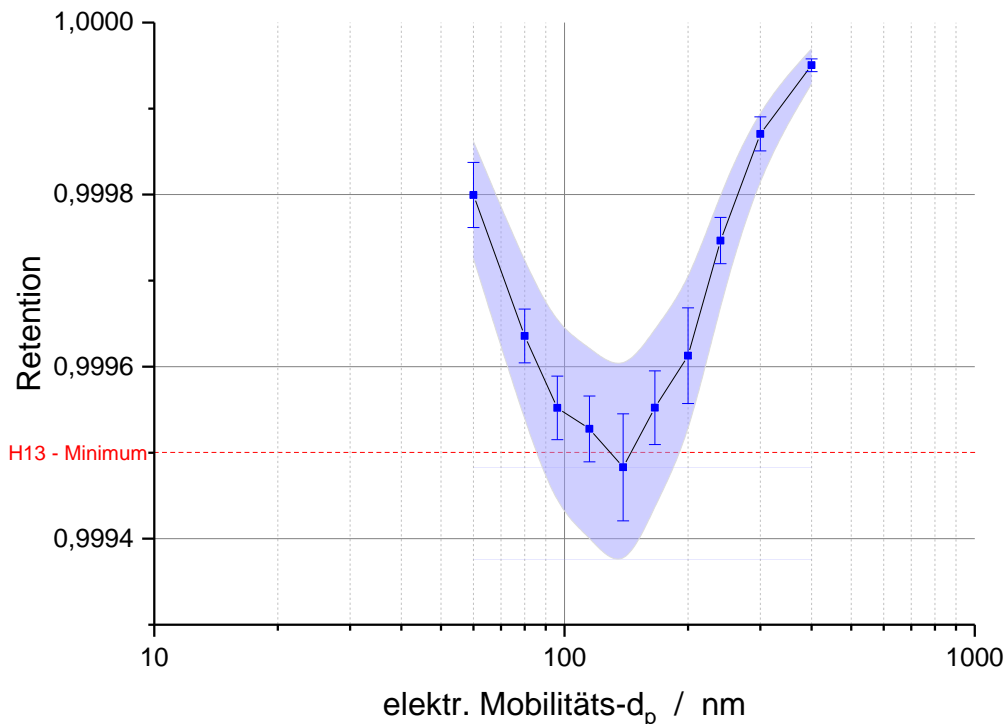


Abbildung 4.1-14: Darstellung der Messunsicherheit

- **Messdauer**

Da die Messsicherheit, wie bereits erläutert, von der Anzahl der Zählereignisse abhängt, werden 100 Zählereignisse als Mindestmass angestrebt. Hieraus ergeben sich für Medien verschiedener Filterklassen teils sehr unterschiedliche Messzeiten, wie in dem folgenden Diagramm (Abbildung 4.1-15) beispielhaft zu sehen ist.

In dem Diagramm ist für den als Reingasmessgerät verwendeten Kondensationskeimzähler die Konzentration über der Messzeit aufgetragen unter der Voraussetzung, dass 100 Partikel gezählt werden und der Volumenstrom durch die optische Messzelle des CPCs 0,3 l/min beträgt. Sofern die Reingaskonzentration 1 Partikel/cm³ beträgt, unabhängig von Filterklasse oder Rohgaskonzentration, kann mit einer Messdauer von einer Minute eine Anzahl von 500 Partikeln untersucht werden. Jedoch steigt die Messdauer erheblich mit sinkender Reingaskonzentration. Mit dem neu erworbenen Reingaszähler konnte die Messzeit um den Faktor drei reduziert werden, da er einen Volumenfluss von 0,9 l/min durch die optische Zelle besitzt. So ergibt sich beispielsweise für 5 nm-Partikel bei einem H13-Medium ein Abscheidegrad von $\approx 0,9999993$. Bei einer konstanten Bereitstellung von etwa 1000 Partikel/cm³ ergibt sich eine Messzeit von etwa 2,5 Stunden, sofern man 100 Reingaspertikel detektieren möchte. Da die Messergebnisse in einem ange-

messenen zeitlichen Rahmen erzielt werden müssen, wurde ab der Filterklasse E12 auf Wiederholungsmessungen sowie die geforderte Anzahl der Reingaszählereignisse verzichtet.

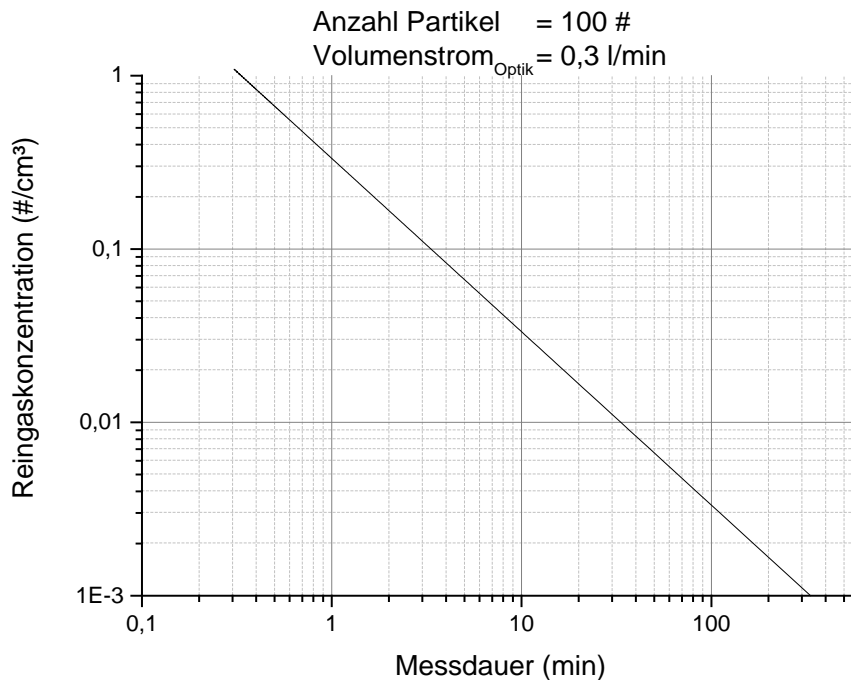


Abbildung 4.1-15: Reingaskonzentration vs. Messzeit

- **Polydisperse Messung**

Vereinzelt war es möglich, das Prüfaerosol im polydispersen Zustand ohne vorherige Klassierung zur Retentionsprüfung zu nutzen. Dazu wurde der Prüfaufbau dahingehend modifiziert, dass das Aerosol direkt nach Generierung durch einen Neutralisator geleitet und auf den Prüfling gegeben wurde. Im Wechsel wurden dann an- und abströmseitig mit der im Rahmen des Projektes erworbenen SMPS-Plattform (Firma Palas), die Größenverteilungen gescannt und zur Retentionsberechnung ins Verhältnis gesetzt. Zusätzlich wurde bei der rohgasseitigen Messung ein partikelfreier Volumenstrom in Höhe des Probenahmestroms hinzugefügt, damit der Gesamtvolumenstrom während der Messung konstant blieb.

Grundvoraussetzung für eine polydisperse Messung ist jedoch, dass durch den Retentionstest das Medium nicht verändert wird und der Druckverlust während der Messung nahezu konstant bleibt. Ein 10%iger Druckverlustanstieg während der Messung gilt als Abbruchkriterium, so dass die Messung mit monodispersen Partikeln erfolgen muss. Folglich konnte die Zeitersparnis, die sich durch eine polydisperse Messung ergibt, lediglich teilweise bei niederklassigen Medien (Filterklassen F7-F9) genutzt werden und beschränkte sich auf die Messung der

Medien gegenüber Nanopartikel.

Die erworbene SMPS-Plattform der Firma Palas ermöglichte hier eine genaue Untersuchung der Partikeldurchmesser- und -anzahlverteilung mit verlässlicher Partikelanzahlstatistik. Zum einen arbeitet der Kondensationskeimzähler ohne interne Verdünnung und dazu mit einem hohen Probenahmevolumenstrom von 0,9 l/min. Zum anderen wird beim Scanning der Partikelgrößenverteilung ein Vorwärts- und Rückwärtsscan durchgeführt. Das heißt, die Spannung im DMA wird von 0 Volt bis etwa 10.000 Volt gesteuert, anschließend wieder auf null gefahren, und die erzielten Durchmesser- und -anzahlverteilungen gemittelt. Unter der Voraussetzung einer stationären Partikelbereitstellung sollten beide Verteilungen (Vorwärts- und Rückwärtsscan) identisch aussehen. Sofern dies nicht der Fall ist, muss die Verweilzeit der Partikel zwischen DMA und Kondensationskeimzähler angepasst werden. Somit ergibt sich eine weitere Überprüfungsmöglichkeit, die die Genauigkeit der Messung verbessert.

- **Vergleich des Druckverlustes**

Zur weiteren Verifikation des Filtermedienprüfstandes wurden Druckverlustmessungen an anderen Prüfaufbauten mit gleicher Probengeometrie durchgeführt. Dazu wurde eine Druckmessblende mit Bohrungen aus Holz entworfen, die im Gegensatz zu Filtermedien dauerhaft zerstörungsfrei in regelmäßigen Abständen eingebaut werden kann. Somit konnten während der Projektdauer die Druckverluste bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten an verschiedenen Prüfaufbauten kontrolliert werden. In Abbildung 4.1-16 ist die Druckverlustblende ersichtlich.

In Abbildung 4.1-17 ist der Druckverlustvergleich zwischen dem für das Nanofiltrationsprojekt genutzten Filtermedienprüfstand und einem vergleichbaren Prüfstand mit einem Medienhalter gleichen Durchmessers aufgezeigt. Verwendet wurde bei dem Vergleichsversuch die in Abbildung 4.1-16 gezeigte Druckmessblende. Im Diagramm ist eine sehr gute Vergleichbarkeit der Druckverlustverläufe bei beiden Medienprüfständen über die gesamte Spannweite der Anströmgeschwindigkeiten ersichtlich. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Genauigkeit beider Druckmessdosensysteme gegeben ist und beide Prüfstände keine Leckage aufweisen.



Abbildung 4.1-16: Druckmessblende

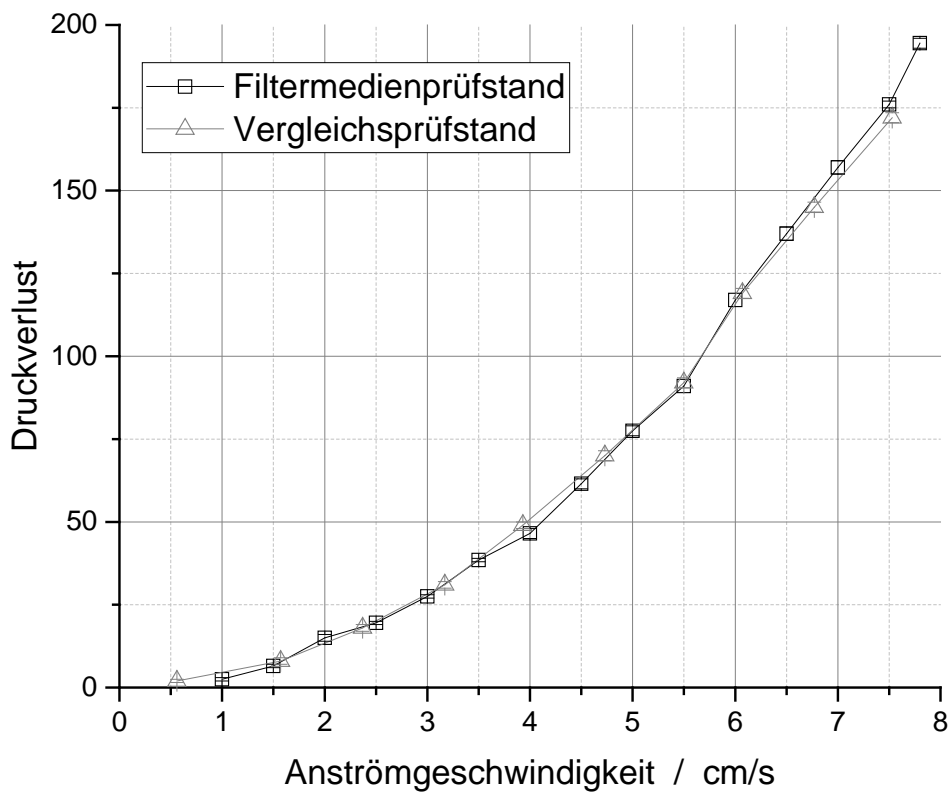


Abbildung 4.1-17: Druckverlustvergleich Medienprüfstände

• **Vergleichsmessungen mit anderen Prüfinstituten**

Zur Überprüfung der Genauigkeit des Filtermedienprüfstandes wurden Filtermedien der Klasse H14 getestet. Die Medien entstammen drei Rollen derselben „Mutterrolle“ eines Herstellers und sind in den Abbildungen mit den Zusätzen „a“, „b“ und „c“ betitelt. Gemessen wurden jeweils mindestens 3 Filterrunden, die Abweichung zum Maximal- bzw. Minimalwert ist als Fehlerbalken angegeben.

Zum Abgleich wurden die Medientypen von zwei externen Prüfeinrichtungen bei der gleichen, für diese Medienklasse typischen, Anströmgeschwindigkeit von 2 cm/s getestet. Die Ergebnisse sind in den folgenden Diagrammen vergleichend gegenübergestellt. Die Abbildung 4.1-18 bis Abbildung 4.1-20 zeigen den Mittelwert der Fraktionsabscheidegrade aufgetragen über dem elektrischen Mobilitätsdurchmesser. In Abbildung 4.1-21 ist der gemittelte Druckverlust der drei Medien bei dem jeweiligen Prüfinstitut dargestellt.

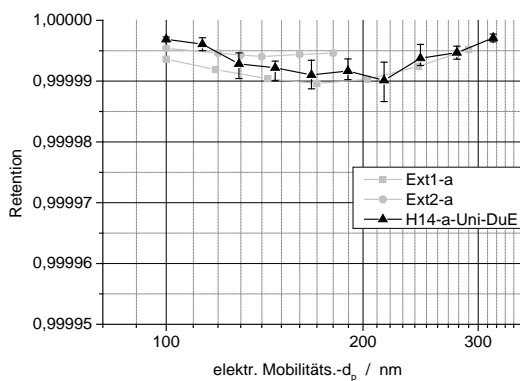


Abbildung 4.1-18: FAG des H14-a [22]

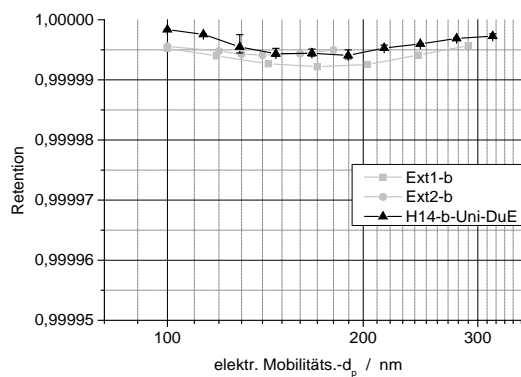


Abbildung 4.1-19: FAG des H14-b [22]

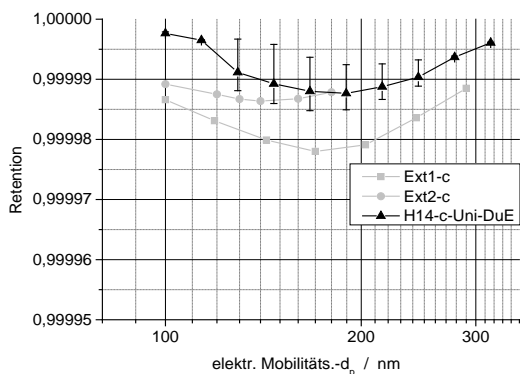


Abbildung 4.1-20: FAG des H14-c [22]

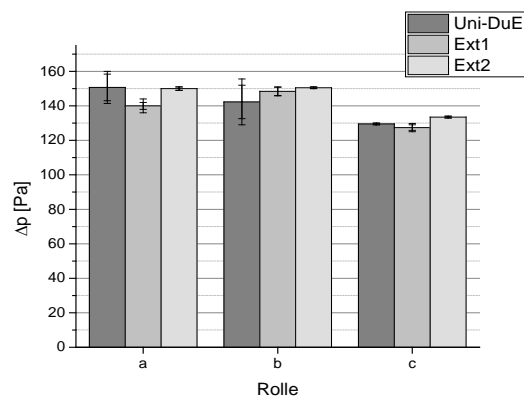


Abbildung 4.1-21: Druckverlust der H14-Medien [22]

Ein Filterflachmedium muss im Partikelgrößenbereich der Mindestabscheidung (MPPS) einen Abscheidegrad von 99,995 % vorweisen, um nach DIN EN 1822 als

H14-Schwebstofffiltermedium klassiert zu werden. In den Diagrammen ist dieser Mindestabscheidegrad als Y-Achsenabschnitt gewählt.

Es wird deutlich, dass alle getesteten Medien ihrer Filterklasse entsprechen und die mit dem modifizierten Filtermedienprüfstand gemessenen Abscheidegrade eine sehr gute Vergleichbarkeit zu den Ergebnissen der externen Prüfinstitute aufzeigen. Tendenziell ist erkennbar, dass die Partikelgröße des MPPS mit der Messung des Prüfinstitutes 1 (Ext1) übereinstimmt, während der Retentionswert besser mit Prüfinstitut 2 (Ext2) korrespondiert. Bezugnehmend auf die Skalierung der Retentionsachse können diese Abweichungen jedoch vernachlässigt werden. Sie liegen im Bereich der Abweichung, die auch bei anderen Prüfinstituten festgestellt wurden.

Eine weitere Erkenntnis aus den gezeigten Messungen ist, dass, obwohl die gesamten Medien von derselben Mutterrolle stammen, Medium „c“ bei allen Prüfeinrichtungen die niedrigste Retention zeigt. Bei den Druckverlustangaben zeigt sich ebenfalls, dass Medien der Rolle „c“ den geringsten Druckverlust aufweisen. Dies kann ein Hinweis auf eine veränderte Faserstruktur der Rolle „c“ gegenüber den Rollen „a“ und „b“ sein. Somit kann festgehalten werden, dass mit dem umgerüsteten Filtermedienprüfstand verlässliche Ergebnisse erzielt werden können und die Abweichungen zu anderen Messinstituten geringer sind als die Abweichungen verschiedener Rollen einer HerstellungschARGE.

4.1.3 Effizienzbestimmung der Filtermedien mit unterschiedlichen Test-aerosolen im Neuzustand

In diesem Kapitel werden die Messreihen der Filtermedien im Neuzustand beschrieben. Die untersuchte Medienauswahl deckt eine große Bandbreite vorhandener Medien von Feinstaub- bis hin zu Schwebstofffiltern der ULPA-Klassen ab. Darüber hinaus wurden zum Teil in der gleichen Filterklasse unterschiedliche Typen von Filtermaterialien untersucht, wie beispielsweise einlagige Glasfasermedien oder mehrlagige Filtermedien mit integrierten Feinstfasern oder mit Membranschichten. Die Medien werden hier nach den Filterklassen benannt, mit denen sie von dem jeweiligen Hersteller ausgezeichnet wurden.

Für die Messreihen im Neuzustand wurden zunächst alle vorhandenen Filtermedien, wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben, auf ihre Effizienz untersucht, indem mit monodispersen Partikeln für jeden Partikeldurchmesser die Retention ermittelt wurde. Aus diesen Retentionswerten wurden für alle Medien Mittelwerte berechnet, wobei immer mindestens drei Filterrunden untersucht wurden. Aus den Mittelwerten

wiederum wurden die folgenden Fraktionsabscheidegradkurven (FAG) erstellt, bei denen jeweils der minimale und maximale Retentionswert als Fehlerbalken mit angegeben ist. Alle Medienuntersuchungen wurden mit einem maximalen Druckverlustanstieg von 10 % realisiert.

Die Retentionsmessungen im MPPS-Bereich wurden entweder mit reinem oder mit mit Isopropanol verdünntem (1%ige Lösung) DEHS durchgeführt. Für Nanopartikel wurde ein Funkenentladungsgenerator zunächst mit Silber-, später auch mit Kupferelektroden verwendet. Die Anströmgeschwindigkeiten der einzelnen Medien wurden anhand der vom Hersteller vorgegebenen Nennvolumenströme auf die Medienfläche umgerechnet. Bei Fehlen dieser Angabe wurde eine Geschwindigkeit von 2 cm/s gewählt, um diese Medien direkt miteinander vergleichen zu können. Ein Vergleich der an Medien gemessenen FAGs mit denen der aus diesen Medien konfektionierten Filterkassetten erfolgt in den Abschnitten 4.5 und 4.6.

- **F7-Medien**

In Abbildung 4.1-22 ist der FAG eines F7-Glasfaserflachmediums zu sehen.

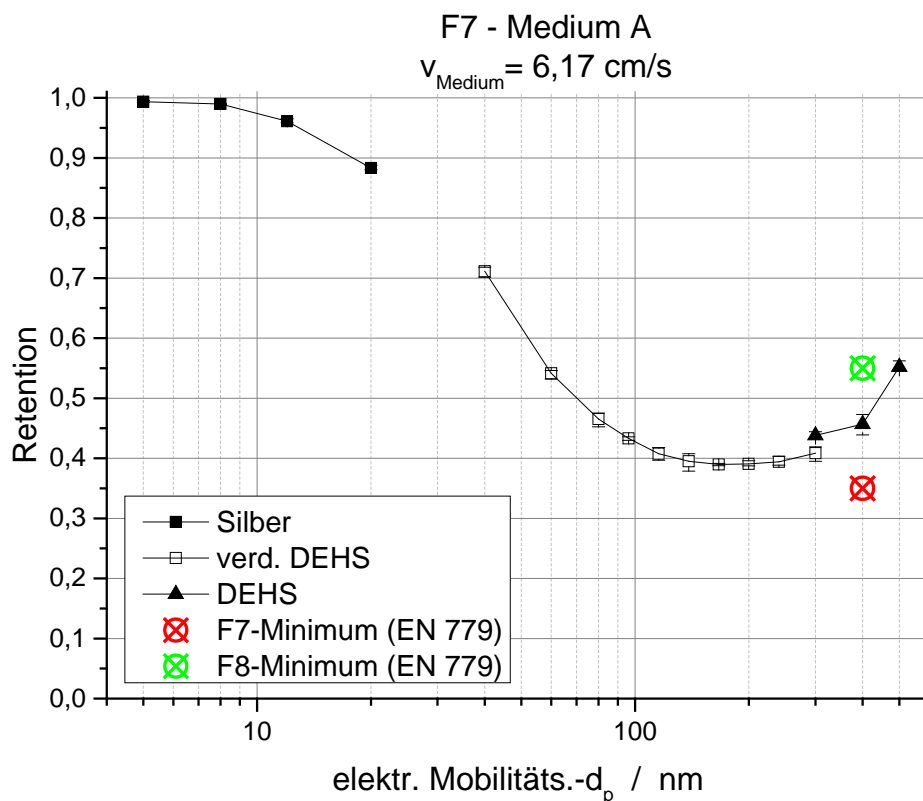


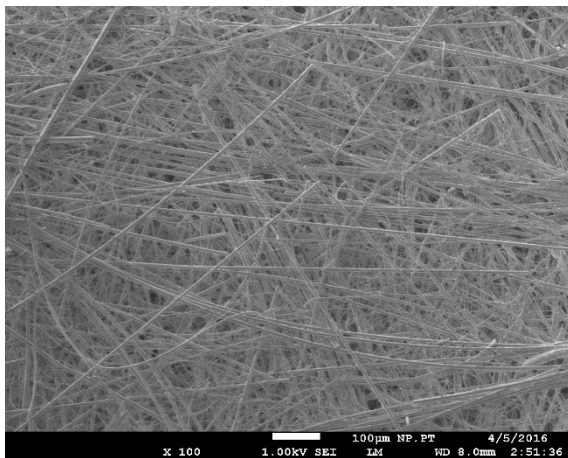
Abbildung 4.1-22: FAG – F7-Medium A

Die Fraktionsabscheidegrade des ersten F7-Mediums wurden bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 6,17 cm/s aufgenommen. Es wurden 3 unterschiedliche Ronden

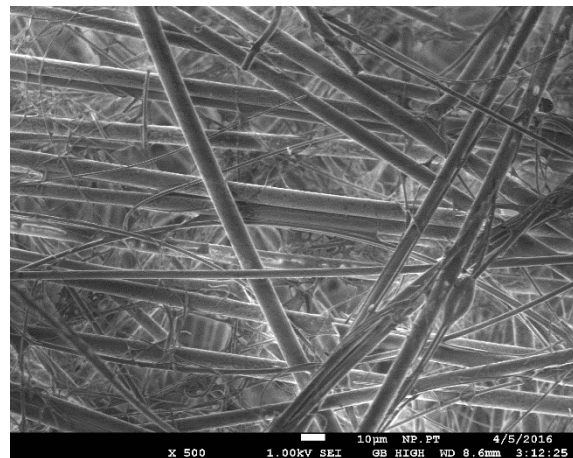
untersucht, die für alle Werte eine sehr gute Vergleichbarkeit zeigen, was an der geringen Abweichung der minimalen und maximalen Retentionswerte zu erkennen ist (Fehlerbalken). Das Medium hat für Partikeldurchmesser von 150 bis 200 nm den Bereich der größten Penetration (MPPS) bei einem Abscheidegrad $> 35\%$, was dem Mindestwirkungsgrad entspricht. Die Untersuchung in diesem Größenbereich wurde mit verdünntem DEHS in Isopropanol realisiert. Für größere Partikel bis hin zu 500 nm wurde reines DEHS als Testaerosol verwendet. Die Penetration für Nanopartikel mit Durchmessern von 6 bis 20 nm wurde mit Silberpartikeln untersucht. Es zeigten sich bei den Retentionsverläufen der verschiedenen Testpartikel gute Übereinstimmungen zueinander.

Auf den nachstehenden Abbildungen sieht man REM- Aufnahmen der An- und Abströmseite in verschiedenen Vergrößerungen.

Auf der Anströmseite (obere Abbildungen) sind überwiegend geradlinige Fasern zu sehen, die größtenteils einen Durchmesser von $10\ \mu\text{m}$ besitzen. Abströmseitig (untere Abbildungen) sind vermehrt Fasern kleineren Durchmessers erkennbar, die teils gebogen sind. Ebenso sind in Abbildung 4.1-26 Segelausbildungen an den Kreuzpunkten der Fasern ersichtlich.



**Abbildung 4.1-23: F7 Medium A –
Anströmseite bei 100facher Vergrößerung**



**Abbildung 4.1-24: F7 Medium A –
Anströmseite bei 1.000facher Vergrößerung**

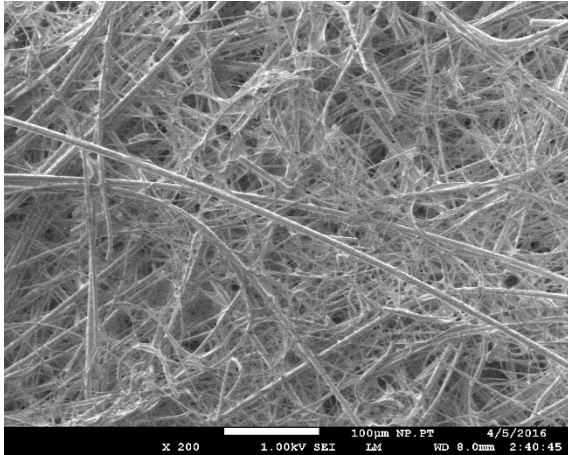


Abbildung 4.1-25: F7 Medium A –
Abströmseite bei 100facher Vergrößerung

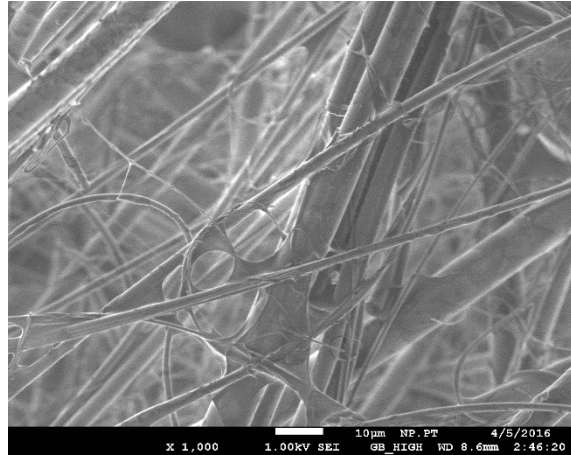


Abbildung 4.1-26: F7 Medium A –
Abströmseite bei 1.000facher Vergrößerung

Zum Vergleich wurde ein weiteres F7-Flachmedium auf seine Effizienz untersucht. Der FAG ist in der Abbildung 4.1-27 zu sehen.

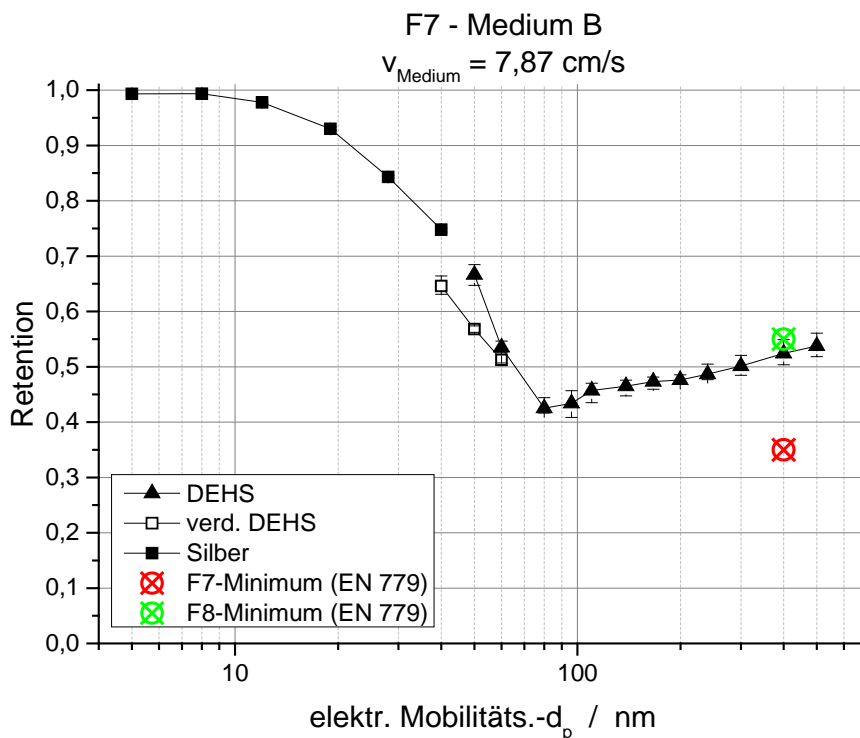


Abbildung 4.1-27: FAG F7-Medium B

Dieses Medium wurde bei einer etwas höheren Geschwindigkeit von fast 8 cm/s angeströmt. Es ist ersichtlich, dass selbst bei Feinstaubmedien Nanopartikel mit den Durchmessern 5 und 8 nm nahezu vollständig abgeschieden werden. Hin zu größeren Partikeln bis zum MPPS bei etwa 80 nm ist eine deutliche Abnahme der Effizienz unabhängig vom Partikelmaterial erkennbar. Im Größenbereich von 80 bis

500 nm ist eine erneute Retentionssteigerung für DEHS-Tröpfchen zu sehen. Die Abbildung 4.1-28 bis Abbildung 4.1-31 zeigen REM-Aufnahmen eines F7-Glasfasermediums.

Die REM-Aufnahmen bei 100facher Vergrößerung zeigen keinen signifikanten Unterschied zwischen der An- und Abströmseite. Vereinzelt lassen sich jedoch auch hier, Abbildung 4.1-29, Segelausbildungen auf der Anströmseite erkennen. Allgemein ist bei diesem Medium ein vermehrtes Vorkommen an zusammengelegten größeren Fasern mit einem Durchmesser von 5 bis 10 µm zu erkennen.

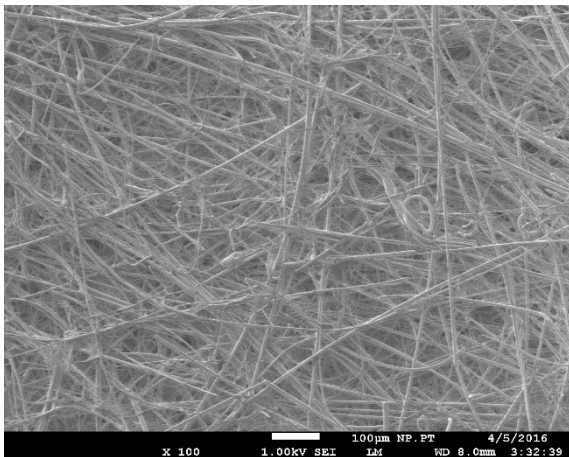


Abbildung 4.1-28: F7 Medium B – Anströmseite bei 100facher Vergrößerung

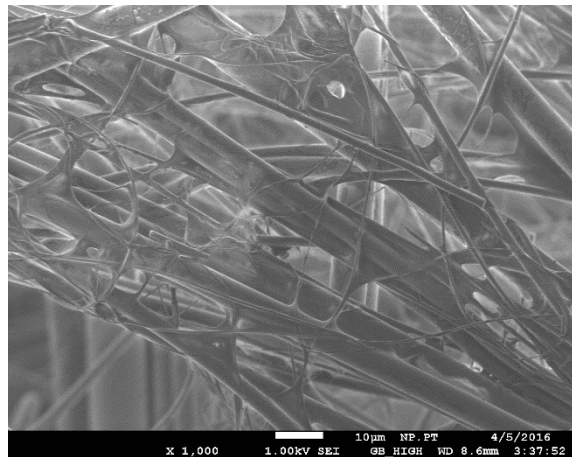


Abbildung 4.1-29: F7 Medium B – Anströmseite bei 1.000facher Vergrößerung

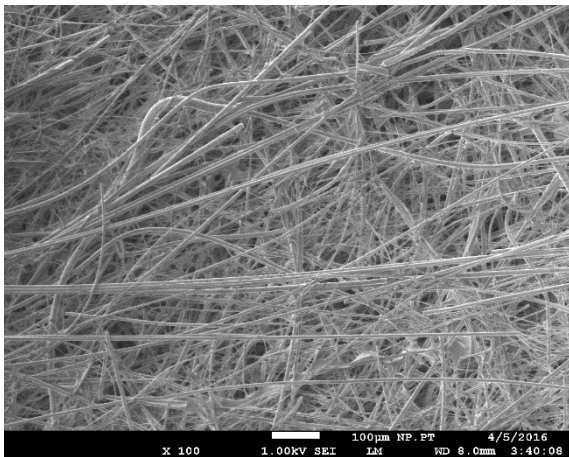


Abbildung 4.1-30: F7 Medium B – Abströmseite bei 100facher Vergrößerung

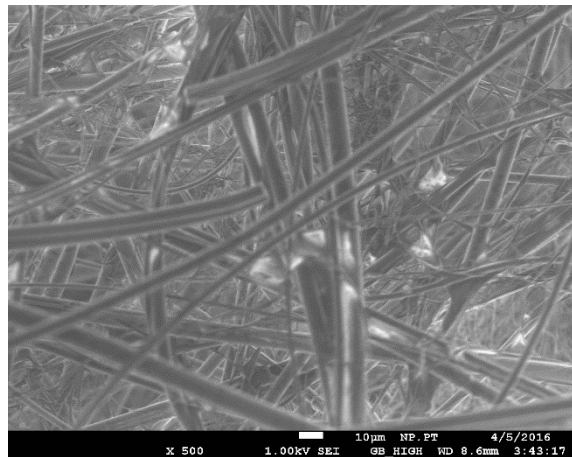


Abbildung 4.1-31: F7 Medium B – Abströmseite bei 1.000facher Vergrößerung

- **F8-Medien**

Den Fraktionsabscheidegrad eines Mediums der Filterklasse F8 zeigt die Abbildung 4.1-32.

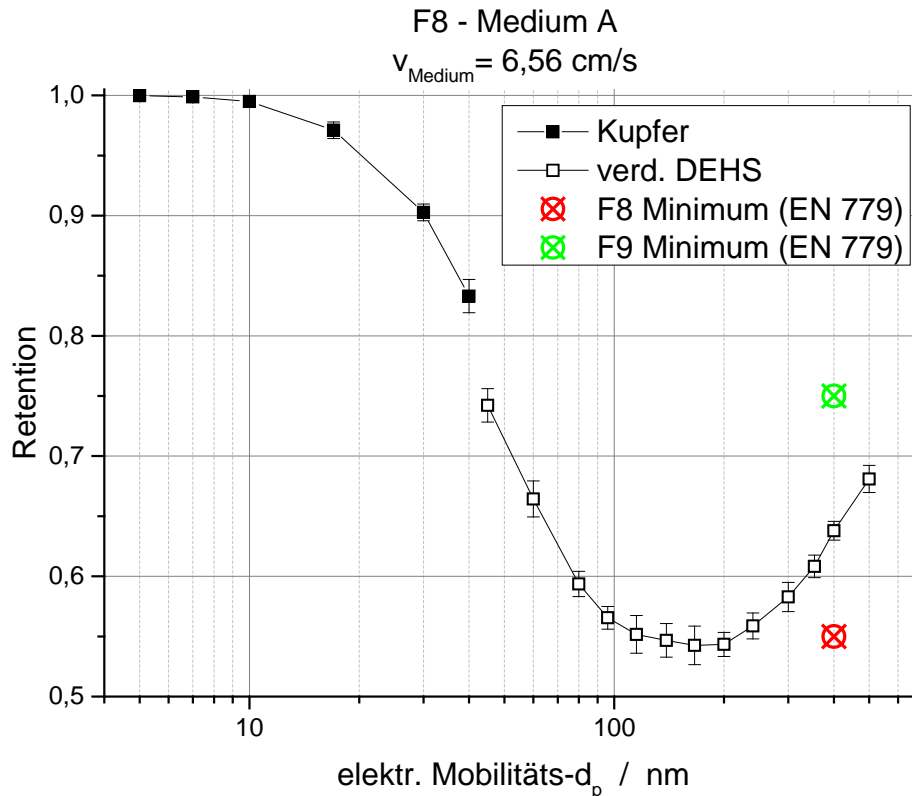


Abbildung 4.1-32: FAG F8-Medium A

Das Medium wurde mit einer Geschwindigkeit von 6,56 cm/s angeströmt und sowohl im Nanometerbereich mit Kupferpartikeln als auch im größeren Durchmesserbereich mit verdünntem DEHS auf seine Retention untersucht. Das Diagramm zeigt, dass dieses Medium seine Filterklasse deutlich erfüllt, da es bei einer Partikelgröße von 400 nm einen Retentionswert $>0,55$ aufweist. Des Weiteren wird auch in diesem Diagramm veranschaulicht, dass die Messmethodik mit der monodispersen Beaufschlagung von Kupfer- bzw. DEHS-Partikeln zu vergleichbaren Ergebnissen führt, da die Kurve des Fraktionsabscheidegrades trotz unterschiedlicher Testaerosole gleichmäßig verläuft. Vor allem im Bereich unterhalb von 10 nm weist das Medium einen Retentionswert nahe an 1 auf und fällt erst ab einer Partikelgröße von 30 nm unter 0,9.

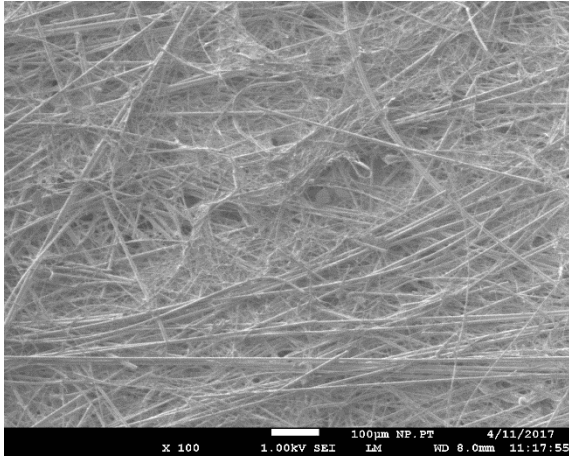


Abbildung 4.1-33: F8 Medium A – Anströmseite bei 100facher Vergrößerung



Abbildung 4.1-34: F8 Medium A – Anströmseite bei 1.000facher Vergrößerung

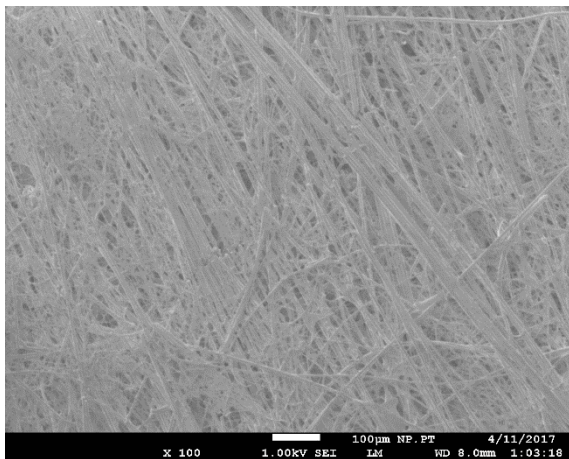


Abbildung 4.1-35: F8 Medium A – Abströmseite bei 100facher Vergrößerung

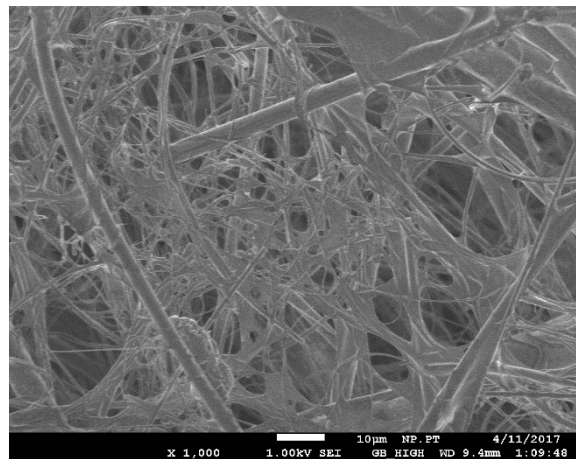


Abbildung 4.1-36: F8 Medium A – Abströmseite bei 1.000facher Vergrößerung

- **F9-Medien**

Abbildung 4.1-37 zeigt den FAG eines dreischichtigen F9-Mediums der Feinstaubklasse, aufgetragen als Retention über dem elektrischen Mobilitätswert. Für das Medium ergab sich eine Filtrationsgeschwindigkeit von 12,94 cm/s. Da diese Geschwindigkeit im Filtermedienprüfstand nicht realisierbar war, wurde das Medium bei der halben Filtrationsgeschwindigkeit von 6,47 cm/s getestet. Erkennbar ist, dass das Medium bei der halben Anströmgeschwindigkeit seine Filterklasse erfüllt. Da sich die Retention im MPPS-Bereich bei Erhöhung der Geschwindigkeit allerdings deutlich verschlechtert, kann nicht beantwortet werden, ob dieses Medium auch bei seinem Nennvolumenstrom die Filterklasse F9 erreicht. Im Größenbereich bis 30 nm werden die Silberpartikel fast vollständig abgeschieden, danach fällt die Abscheidegradkurve bis zum MPPS-Bereich gleichmäßig ab.

Bei diesem Filter handelt es sich um ein dreischichtiges Medium mit integrierten Feinstfasern. Der Aufbau des Mediums ist in Abbildung 4.1-38 dargestellt. Es besteht aus einer gewellten Schicht (Abbildung 4.1-40 und Abbildung 4.1-41), die von einem Füllstoff (Abbildung 4.1-42) stabilisiert wird und auf eine Stützschrift aufgebracht wurde.

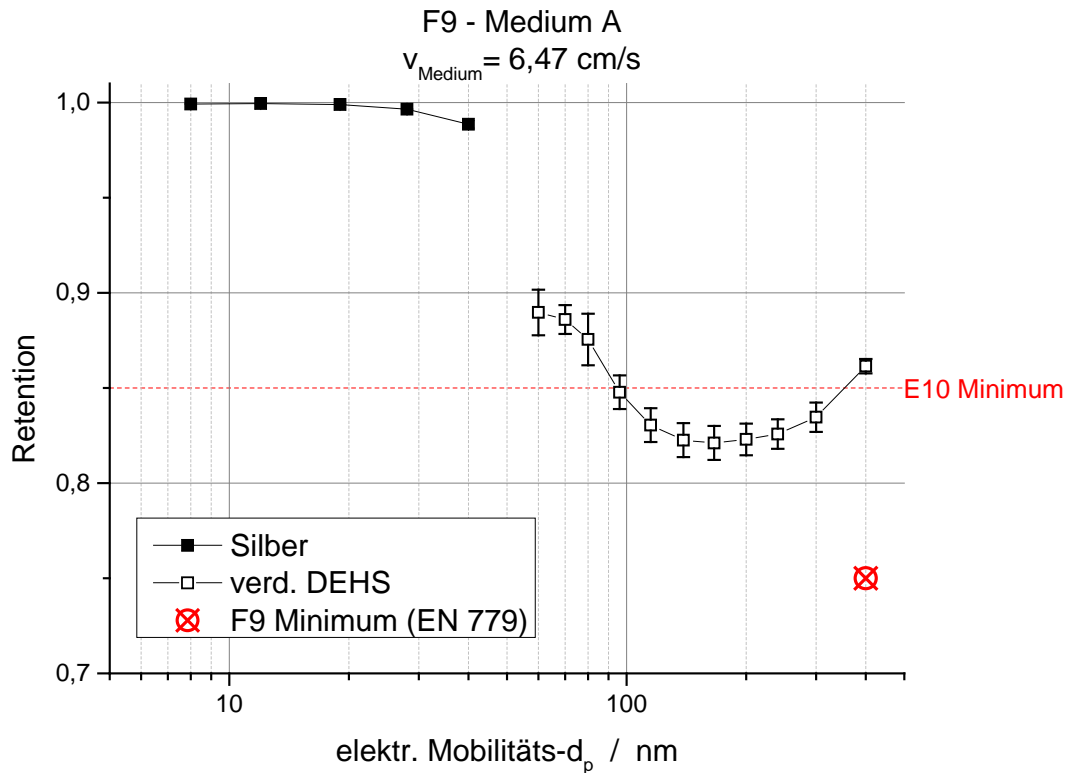


Abbildung 4.1-37: FAG F9-Medium A (mit Feinstfasern)

Sowohl die Füll- als auch die abströmseitige Stützschrift haben Fasern mit Durchmessern von mehreren 10 μm , wobei in Abbildung 4.1-43 größere Klebepunkte in der Stützschrift zu erkennen sind. Aufgrund der hohen Porosität der Füllstoffschicht ist davon auszugehen, dass diese Schicht lediglich der Stabilisierung der Wellenschicht dient und zu den Filtrationseigenschaften dieses Mediums einen eher geringen Anteil beiträgt. Die Wellenschicht aus Feinstfasern hingegen besteht aus dicht gepackten Fasern mit Durchmessern von einem bis 5 μm .

Der Fraktionsabscheidegrad des zweiten Mediums der Klasse F9 ist in Abbildung 4.1-44 zu sehen. Im Gegensatz zu dem ersten Medium ergab sich hier eine Anströmgeschwindigkeit von 6,56 cm/s. Auffallend ist bei diesem Medium, dass die Mindestanforderung der Filterklasse F9 nicht erfüllt wird. Auch im Bereich der Nanopartikel weist dieses Medium nicht so gute Retentionswerte auf wie das vorherige Medium mit Feinstfaserschicht.

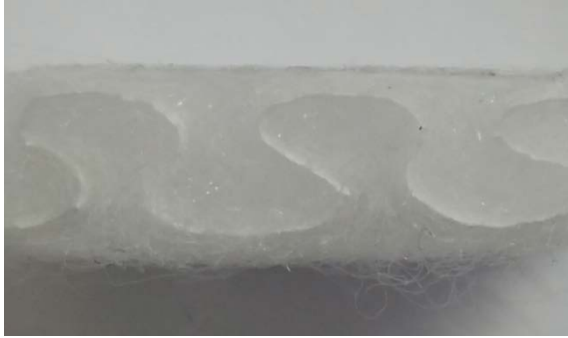


Abbildung 4.1-38: F9 Medium A – Medienquerschnitt

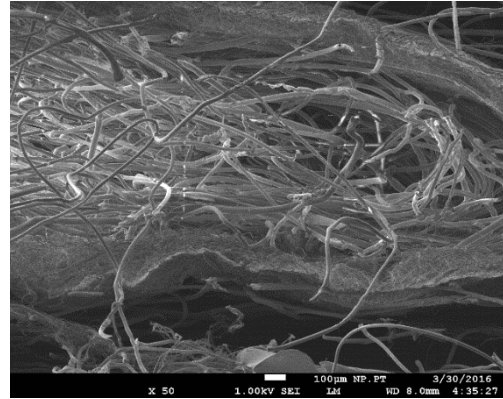


Abbildung 4.1-39: F9 Medium A – Welle bei 50facher Vergrößerung

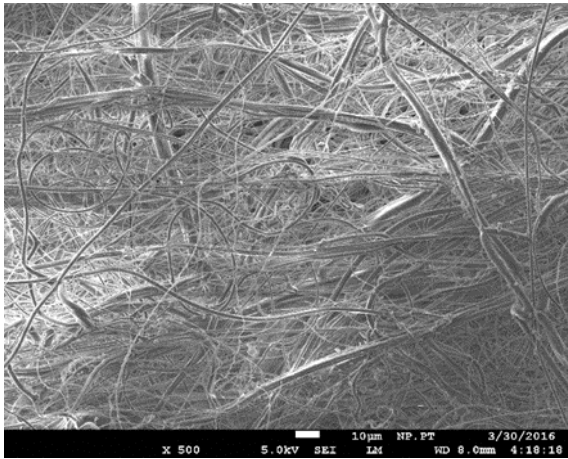


Abbildung 4.1-40: F9 Medium A – Feinstfaserschicht (Welle) bei 500facher Vergrößerung

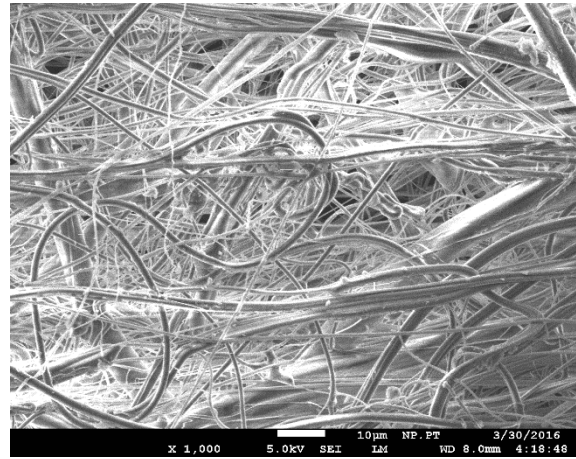


Abbildung 4.1-41: F9 Medium A – Feinstfaserschicht (Welle) bei 1.000facher Vergrößerung

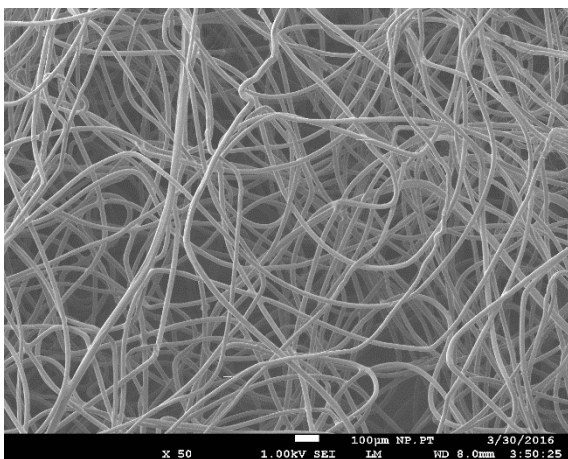


Abbildung 4.1-42: F9 Medium A – Füllstoff zur Stabilisierung bei 50facher Vergrößerung

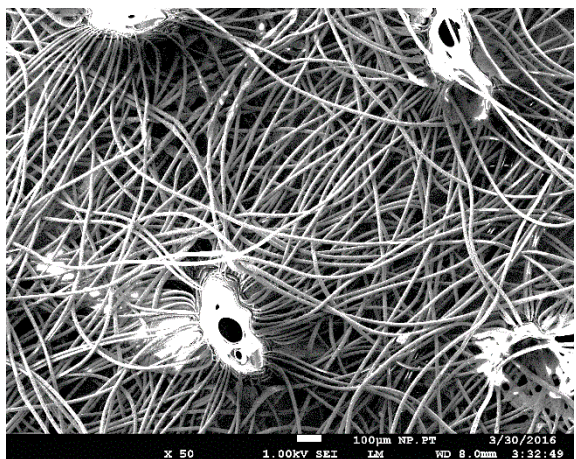


Abbildung 4.1-43: F9 Medium A – abströmseitige Stützschrift bei 50facher Vergrößerung

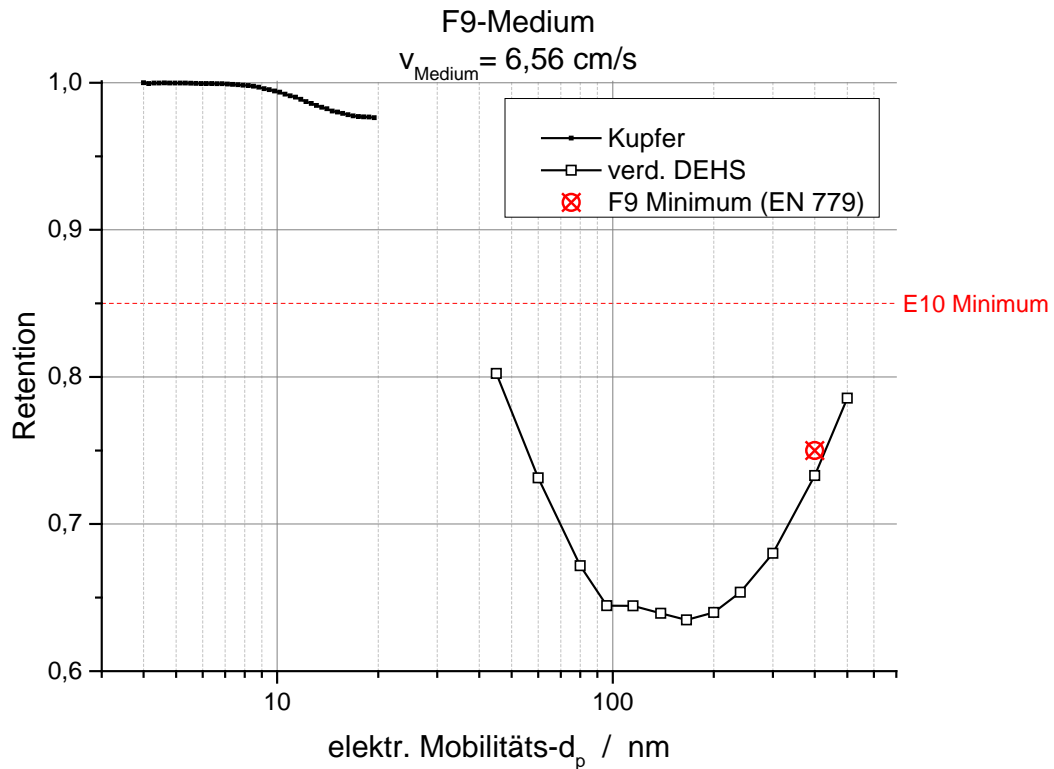


Abbildung 4.1-44: FAG F9 – Medium B

Die folgenden REM-Aufnahmen zeigen die An- und Abströmseite in 100- und 1000-facher Vergrößerung (Abbildung 4.1-45 bis Abbildung 4.1-48).

Sowohl die An- als auch die Abströmseite zeigen bei 100facher Vergrößerung (linke Abbildungen) eine gleichmäßige Verteilung der Fasern mit unterschiedlich dicken Fasern. Erst bei einer 1.000fachen Vergrößerung (rechte Abbildungen) sind Unterschiede zwischen an- und abströmseitiger Schicht zu erkennen. In Abbildung 4.1-46 sind lediglich einige wenige dicke Fasern mit Durchmessern zwischen 5 – 10 μm zu sehen, dünnere Fasern liegen anströmseitig eher im Hintergrund. Auf der Abströmseite sind neben dicken Fasern auch fein verteilte Fasern mit Durchmessern von nur einigen hundert Nanometern ersichtlich. Abströmseitig ergibt sich so ein deutlich engmaschigeres Netz aus Fasern.

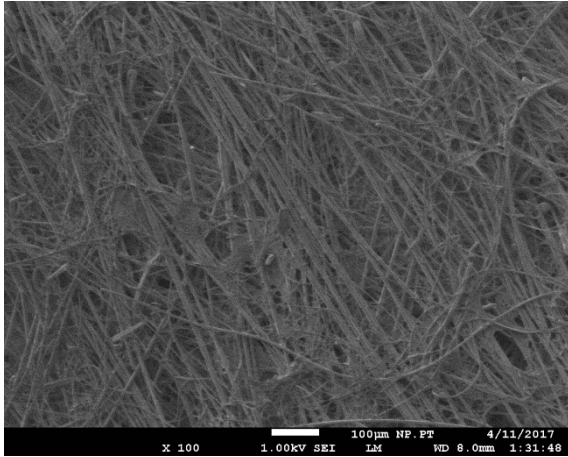


Abbildung 4.1-45: F9 Medium B – Anströmseite bei 100facher Vergrößerung

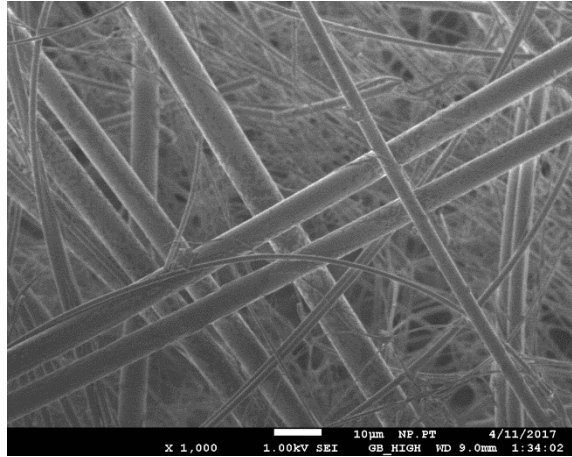


Abbildung 4.1-46: F9 Medium B – Anströmseite bei 1.000facher Vergrößerung

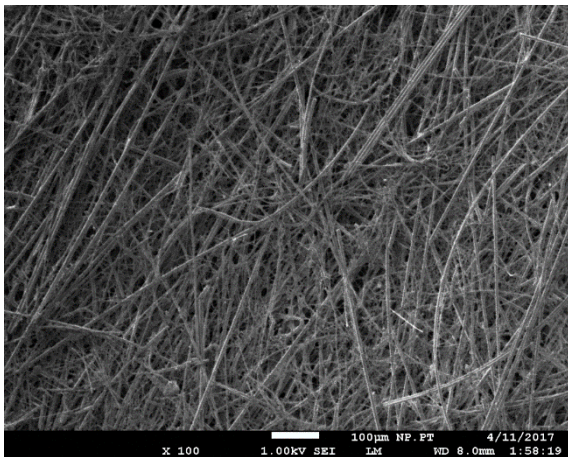


Abbildung 4.1-47: F9 Medium B – Abströmseite bei 100facher Vergrößerung

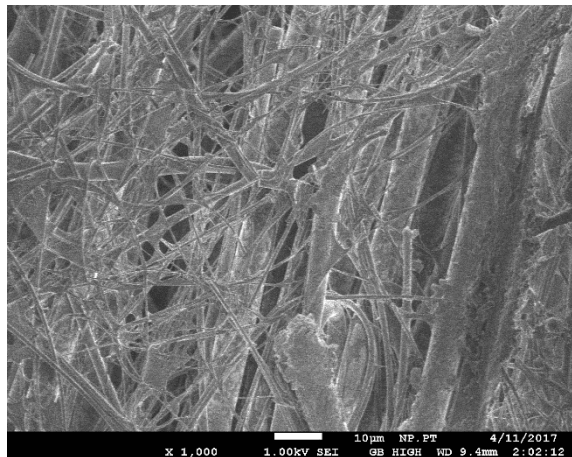


Abbildung 4.1-48: F9 Medium B – Abströmseite bei 1.000facher Vergrößerung

- **E10 Medium**

Nachfolgend werden die Ergebnisse zweier Medien der Filterklasse E10 vorgestellt.

Abbildung 4.1-49 zeigt die Retentionsverläufe des ersten Mediums, bei dem sich eine Anströmgeschwindigkeit von 6,75 cm/s ergab.

Dieses Medium erfüllt seine Filterklasse nicht und hat im MPPS-Bereich bei Partikelgrößen von um die 100 nm Retentionswerte von ca. 0,7. Im Bereich der Nanopartikel zeigen sich nicht so gute Abscheideleistungen wie bei den beiden F9-Medien. Vor allem das erste Medium mit Feinstfaserschicht in Wellenform (Abbildung 4.1-37) zeigt bei einer Partikelgröße von 40 nm einen Wert von 0,98 und liegt somit deutlich über dem Wert dieses Mediums von ca. 0,91. Die REM-Aufnahmen sind in den folgenden Abbildungen (Abbildung 4.1-50 bis Abbildung 4.1-53) dargestellt.

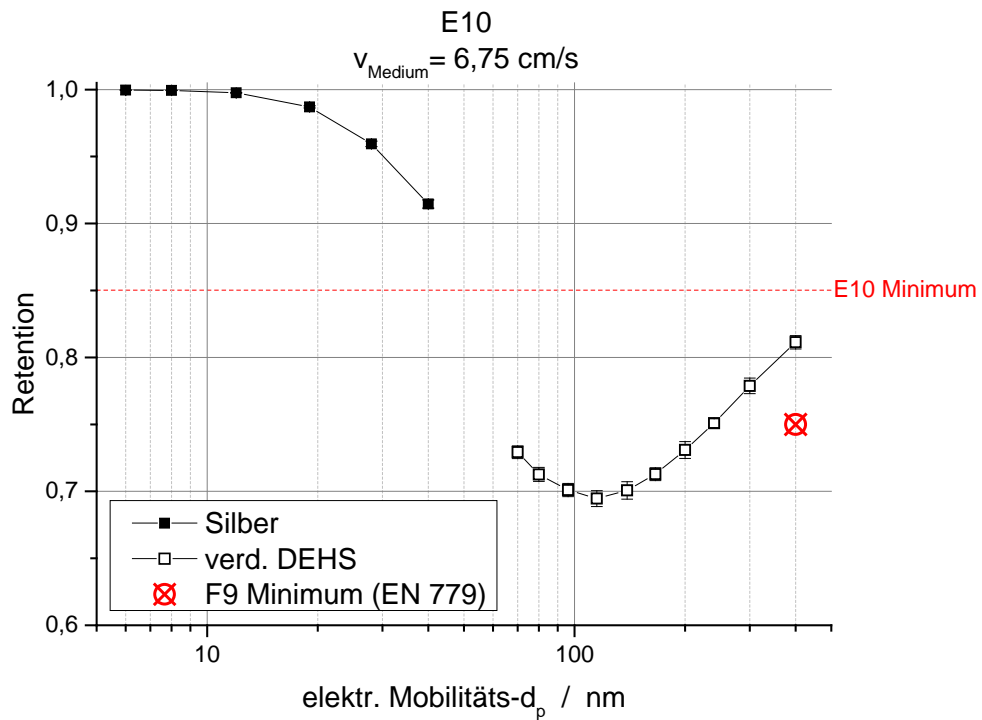


Abbildung 4.1-49: FAG E10-Medium A

Anhand der Aufnahmen wird ersichtlich, dass dieses Medium sehr unterschiedliche Faserdurchmesser aufweist. Bei 1.500facher Vergrößerung sind sowohl auf der An- als auch auf der Abströmseite ebenfalls leichte Segelausbildungen in den Kreuzungspunkten erkennbar (Abbildung 4.1-51 bis Abbildung 4.1-53). Weshalb dieses E10-Medium trotz ähnlicher Anströmgeschwindigkeit dennoch erkennbar schlechtere Retentionen im Nanometerbereich aufweist als das F9-Medium B kann anhand der REM-Aufnahmen nicht erklärt werden.

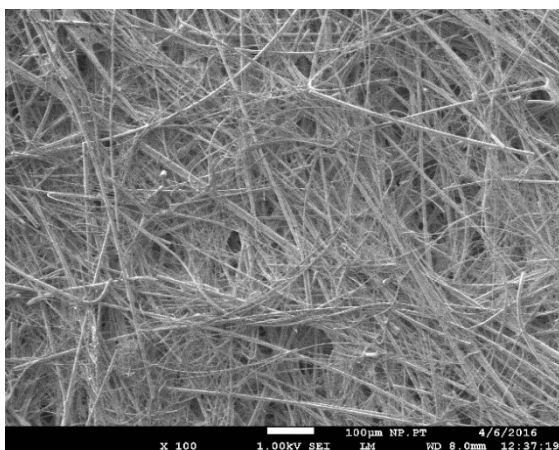


Abbildung 4.1-50: E10 Medium A – Anströmseite bei 100facher Vergrößerung

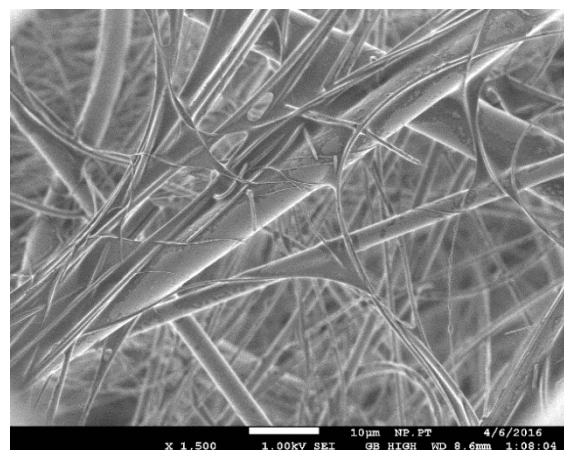


Abbildung 4.1-51: E10 Medium A – Anströmseite bei 1.500facher Vergrößerung

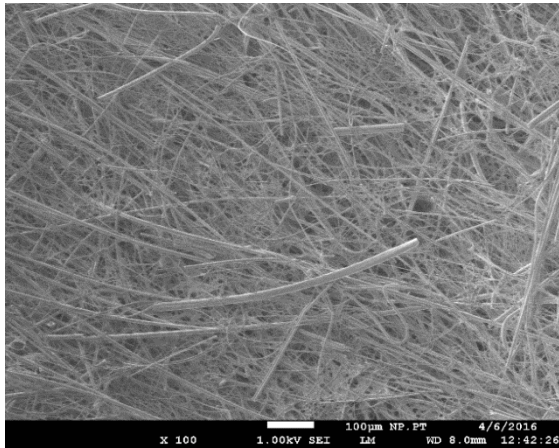


Abbildung 4.1-52: E10 Medium A – Abströmseite bei 100facher Vergrößerung

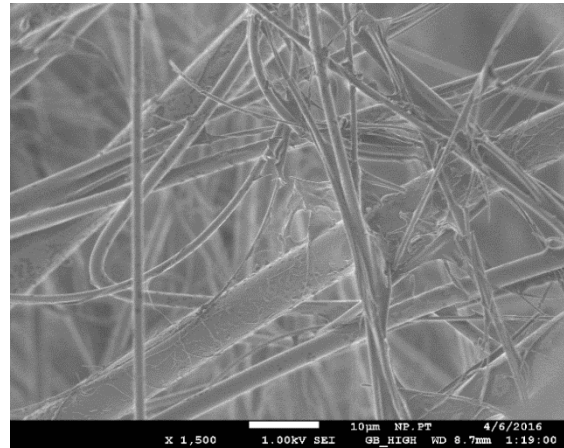


Abbildung 4.1-53: E10 Medium A – Abströmseite bei 1.500facher Vergrößerung

Bei dem zweiten E10-Medium wurde eine Anströmgeschwindigkeit von 2 cm/s gewählt, da es keine Herstellerangaben bezüglich des Nennvolumenstroms gab. Diese Geschwindigkeit wurde für alle Medien ohne Volumenstromangabe gewählt, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Bei dieser Geschwindigkeit erfüllt das Medium sogar die Kriterien der Filterklasse E11, was darauf hindeutet, dass dieses Medium im Realeinsatz einer deutlich schnelleren Anströmgeschwindigkeit ausgesetzt ist.

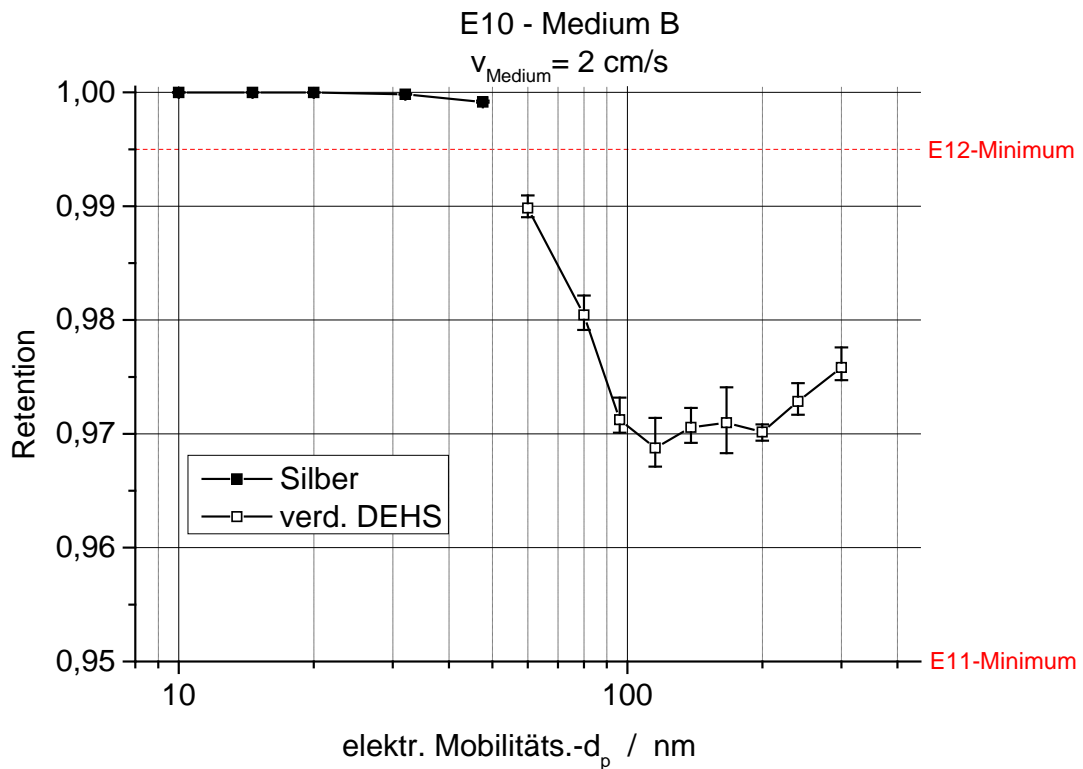


Abbildung 4.1-54: FAG E10-Medium B

Im MPPS-Bereich bei ca. 100 nm erreicht das Medium einen Retentionswert von knapp 0,97 und auch im Bereich der Silbernanopartikel zeigt es auffallend hohe Werte. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass Fraktionsabscheidegrade mit steigender Geschwindigkeit vor allem im MPPS-Bereich abnehmen. Wird davon ausgegangen, dass der Nennvolumenstrom im Einsatz eine deutlich höhere Anströmgeschwindigkeit ergibt, dann wäre auch die Retention dementsprechend schlechter, so dass dieses Medium die Filterklasse E10 erfüllt.

Im Folgenden werden die REM-Aufnahmen des Mediums gezeigt (Abbildung 4.1-55 bis Abbildung 4.1-58). Zu sehen sind sowohl auf der An- als auch auf der Abströmseite unterschiedliche Faserdurchmesser ähnlich wie bei dem vorherigen Medium. Allerdings sind hier vor allem auf der Abströmseite (Abbildung 4.1-57 und Abbildung 4.1-58) die flächigen Ausbildungen in den Kreuzungspunkten der Fasern deutlich ausgeprägter.

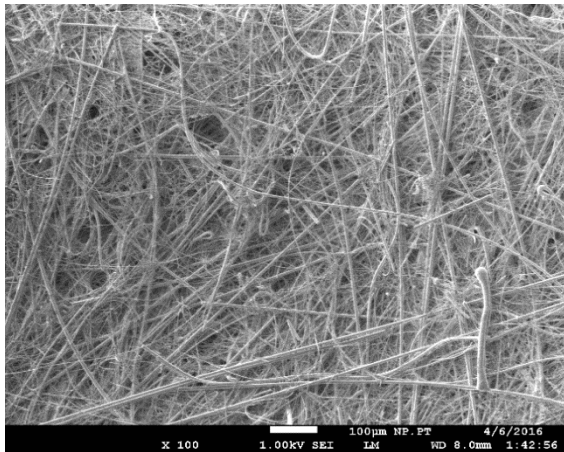


Abbildung 4.1-55: E10 Medium B – Anströmseite bei 100facher Vergrößerung

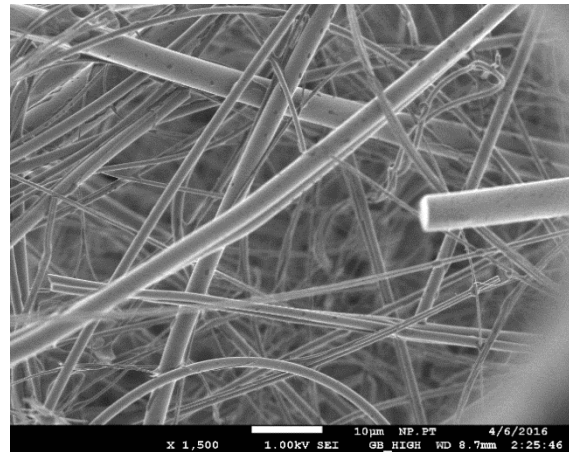


Abbildung 4.1-56: E10 Medium B – Anströmseite bei 1.500facher Vergrößerung

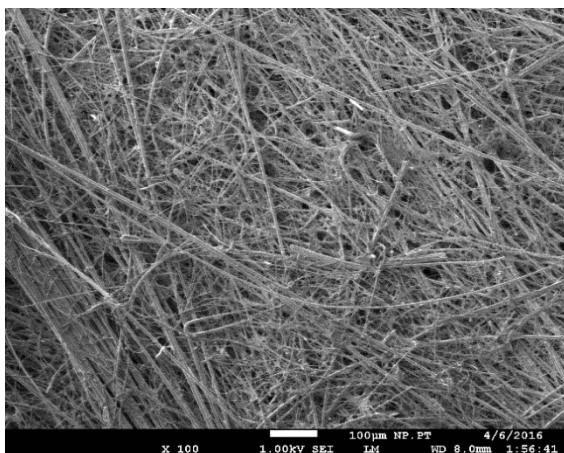


Abbildung 4.1-57: E10 Medium B – Abströmseite bei 100facher Vergrößerung

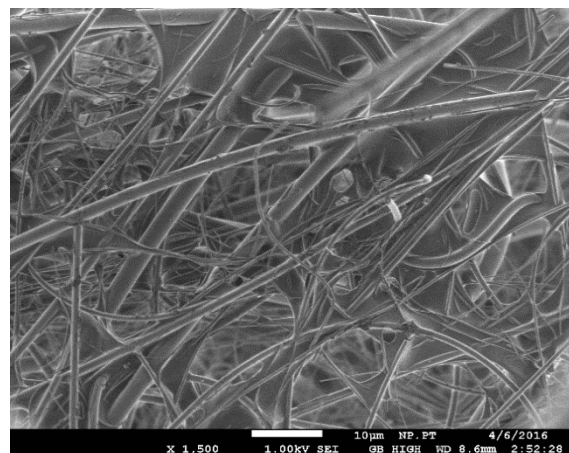


Abbildung 4.1-58: E10 Medium B – Abströmseite bei 1.500facher Vergrößerung

- **E11-Medium**

In Abbildung 4.1-59 sind die Retentionen eines E11-Mediums gegen den Mobilitätswert aufgetragen. Für dieses Medium wurde eine Anströmgeschwindigkeit von 5,25 cm/s berechnet.

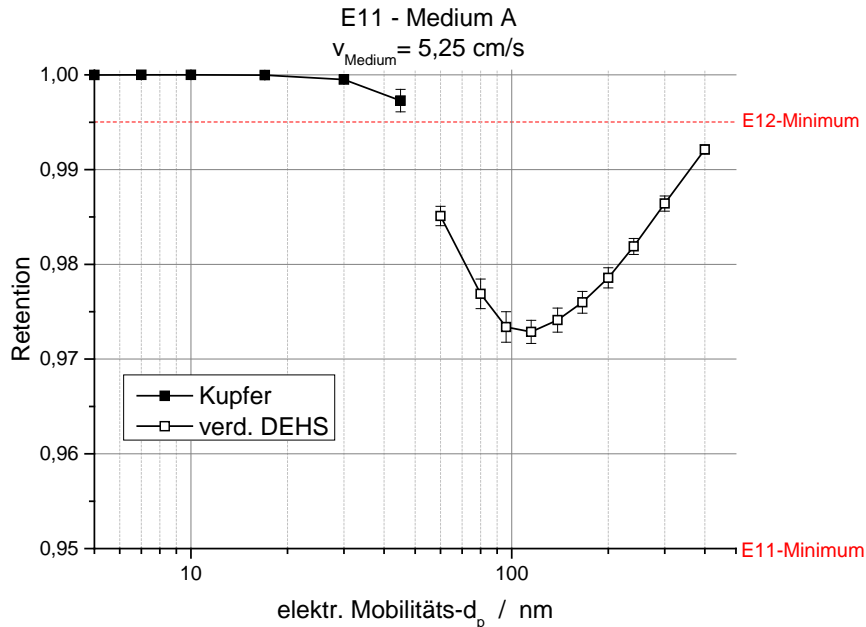


Abbildung 4.1-59: FAG E11-Medium A

Deutlich wird hier die gute Retention im Größenbereich bis 45 nm. Auch im MPPS-Bereich entspricht das Medium seiner Klasse, da es bei einer Partikelgröße von um die 100 nm mit 0,973 einen Wert $>0,95$ aufweist.

In den Abbildung 4.1-60 bis Abbildung 4.1-63 sind REM-Aufnahmen der An- und Abströmseite des E11-Mediums A zu sehen. Ersichtlich ist, dass die Faserdurchmesser auf beiden Seiten des Mediums sehr ähnliche Durchmesser von wenigen Mikrometern bis etwa 10 μm besitzen.

Nachfolgend werden die Filterklassen E12 bis U15 vorgestellt. Bei den Messungen dieser Filterklassen wurden zunächst keine Retentionen im Bereich der Nanopartikel (5 bis 40 nm) aufgenommen, da diese Messungen aufgrund der gewählten Mindestanzahl von 100 Zählereignissen auf der Reingasseite unvermeidbar lange dauern (siehe Kapitel 4.1.2/Abbildung 4.1-15). Einige Durchmesser wurden trotz der langen Messdauer als einzelne Messung nachgeholt, um die Fraktionsabscheidegrade im unteren Größenbereich abschätzen zu können.

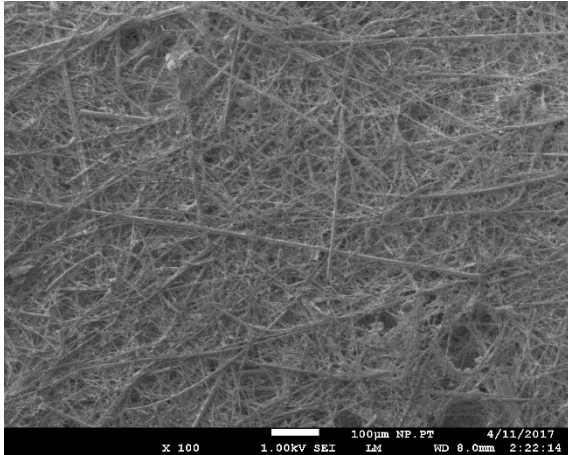


Abbildung 4.1-60: E11 Medium A – Anströmseite bei 100facher Vergrößerung

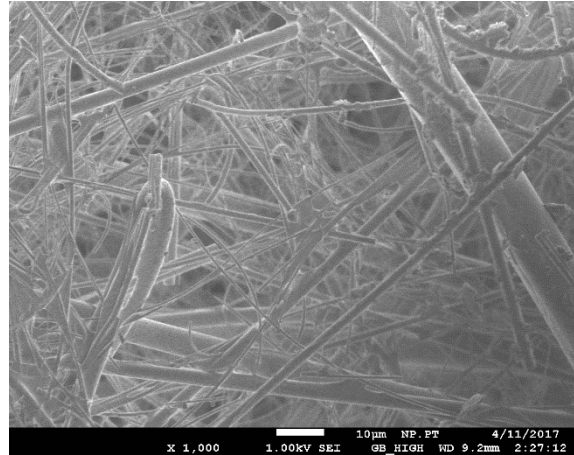


Abbildung 4.1-61: E11 Medium A – Anströmseite bei 1.000facher Vergrößerung

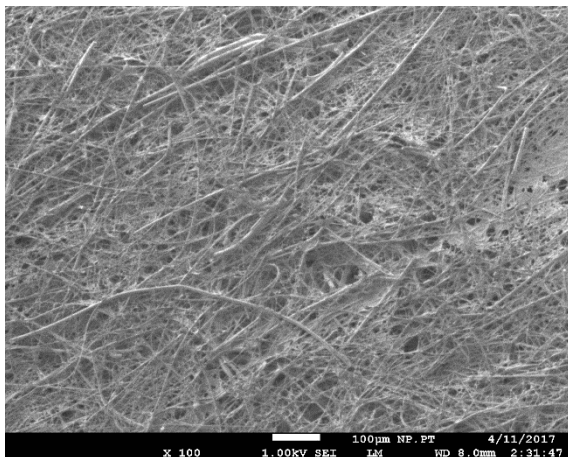


Abbildung 4.1-62: E11 Medium A – Abströmseite bei 100facher Vergrößerung

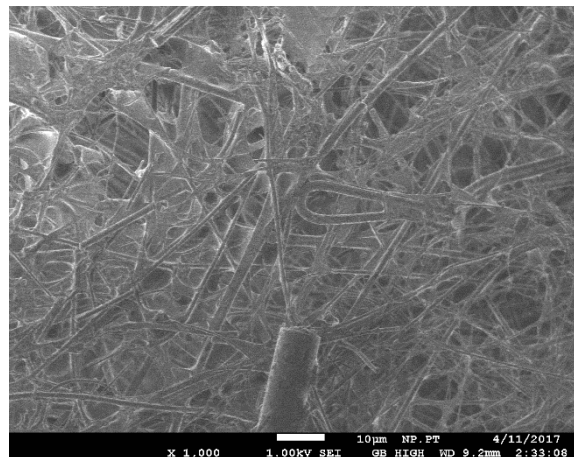


Abbildung 4.1-63: E11 Medium A – Abströmseite bei 1.000facher Vergrößerung

- **E12 Medium**

Das anschließend vorgestellte Medium soll laut Herstellerangabe die Vorgabe der Filterklasse E12 erfüllen. Da bei diesem Medium, ebenso wie bei dem E10-Medium B, kein Nennvolumenstrom vorgegeben war, wurde es aus Gründen der Vergleichbarkeit bei 2 cm/s angeströmt. Weil der Fraktionsabscheidegrad (Abbildung 4.1-64) sogar über dem Mindestwirkungsgrad der H13-Klasse liegt, kann davon ausgegangen werden, dass dieses Medium im Realbetrieb deutlich höheren Volumenströmen ausgesetzt ist.

Bei diesem Medium ist die Abscheideleistung gegenüber Nanopartikel im Gegensatz zum Medium A der Klasse E11 (Vergleich Abbildung 4.1-59) deutlich erhöht.

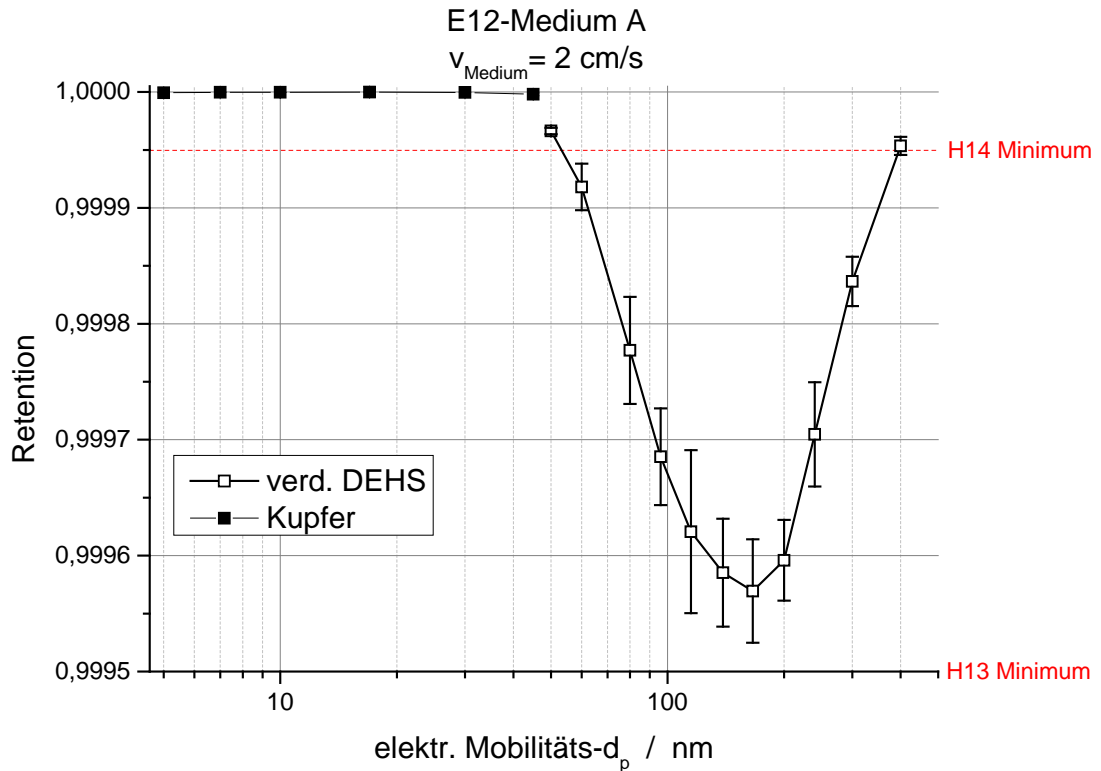


Abbildung 4.1-64: FAG E12-Medium A

Anhand der REM-Aufnahmen, Abbildung 4.1-65 bis Abbildung 4.1-68, kann sowohl an- als auch abströmseitig ein dichtes Netz aus Fasern unterschiedlicher Durchmesser erkannt werden. Vor allem auf der Abströmseite sind Anhaftungen in den Kreuzungspunkten zu sehen. Allerdings kann dies auch zum Beispiel durch Verunreinigungen des Probenhalters begründet sein.

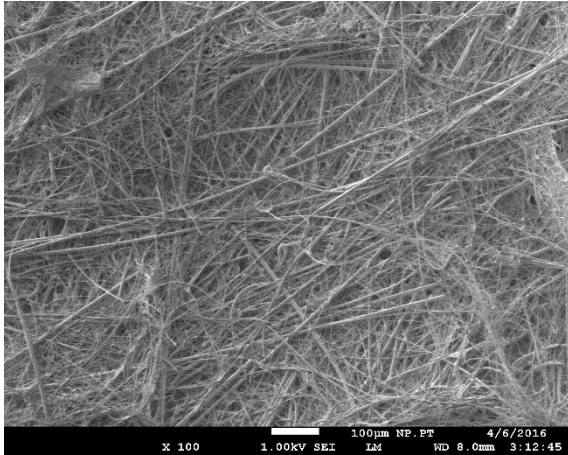


Abbildung 4.1-65: E12 Medium A – Anströmseite bei 100facher Vergrößerung

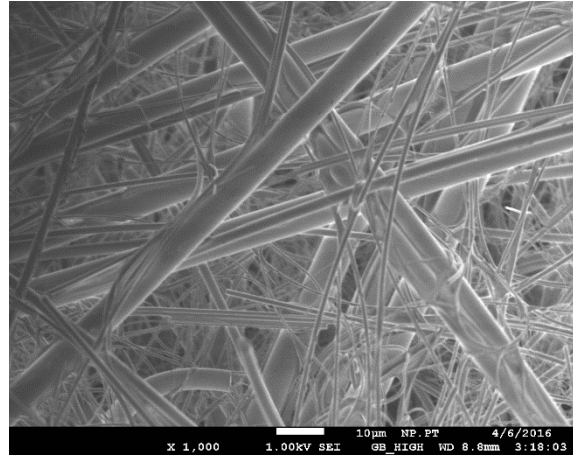


Abbildung 4.1-66: E12 Medium A – Anströmseite bei 1.000facher Vergrößerung

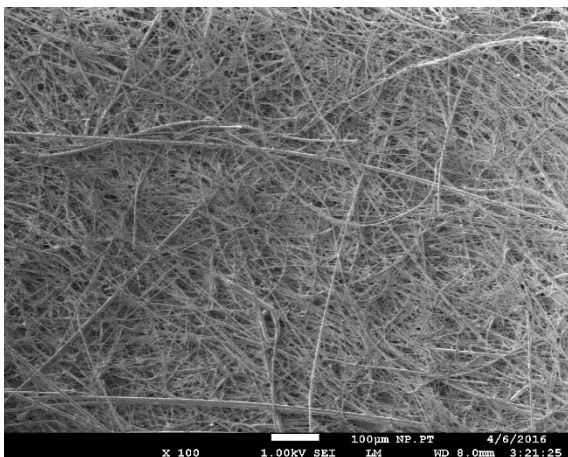


Abbildung 4.1-67: E12 Medium A – Abströmseite bei 100facher Vergrößerung

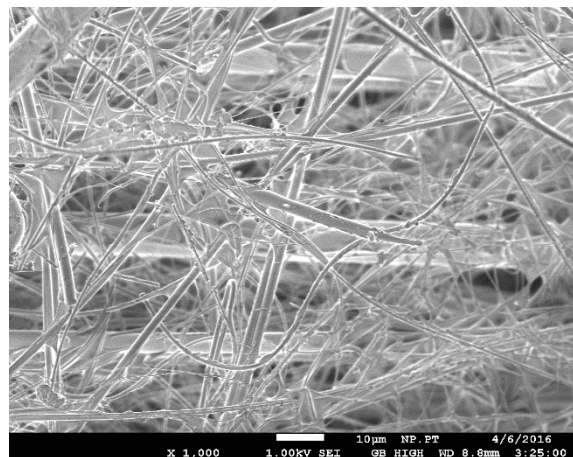


Abbildung 4.1-68: E12 Medium A – Abströmseite bei 1.000facher Vergrößerung

- **H13-Medium**

Dieses Medium der Filterklasse H13 wurde bei einer berechneten Anströmgeschwindigkeit von 2,72 cm/s vermessen. Das Minimum dieser Filterklasse liegt im MPPS bei einem Retentionswert von 0,9995. Somit erfüllt dieses Medium seine Filterklasse in diesem Fall ganz knapp nicht. Allerdings ist die Vermessung von 3 Ronden in diesem Fall nicht aussagekräftig für das ganze Medium, da die Abweichungen innerhalb der 3 Proben schon stark divergieren. Die Abscheidung der Nanopartikel (schwarz) liegt nahezu bei 100 %. Lediglich ab einem Durchmesser von 30 nm nimmt die Abscheideleistung leicht ab.

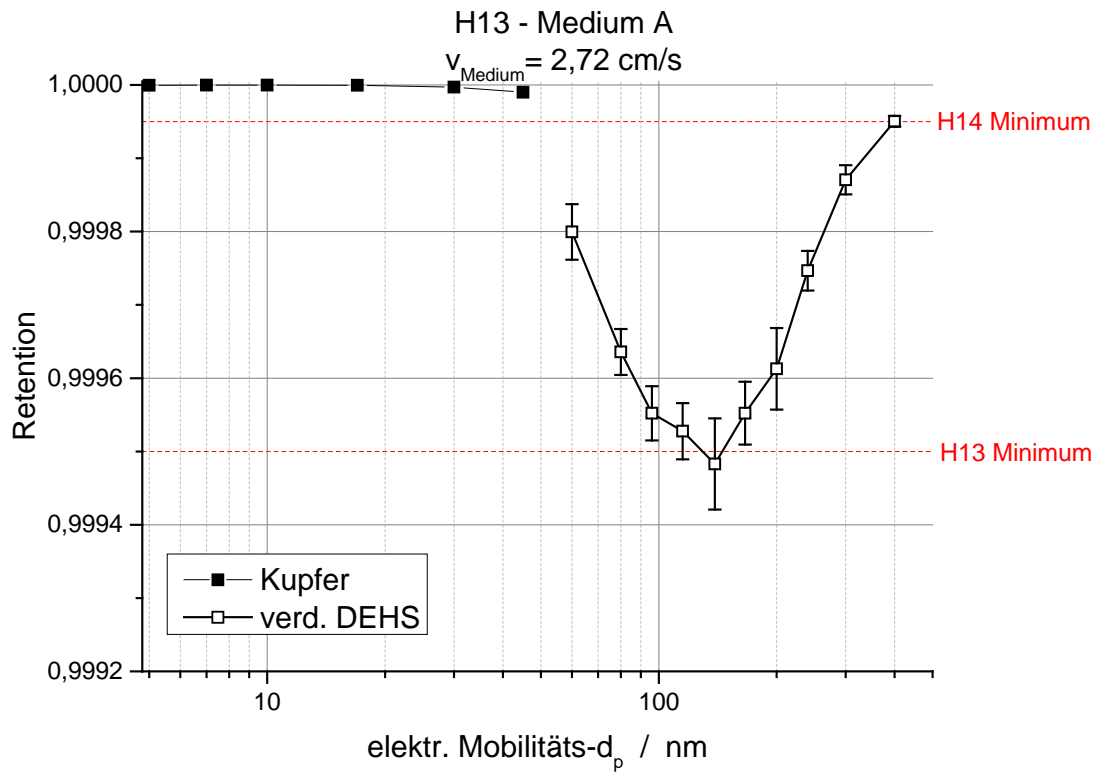


Abbildung 4.1-69: FAG H13-Medium A

Die nachfolgenden REM-Aufnahmen zeigen, dass dieses Medium eine ähnliche Struktur aufweist wie das vorherige E12-Medium (Abbildung 4.1-70 bis Abbildung 4.1-73). Es gibt deutliche Unterschiede in den Faserdurchmessern, deren Werte zwischen ca. 1 und 10 μm liegen.

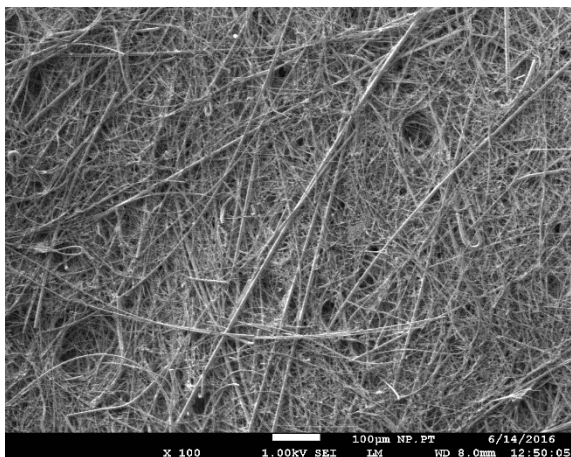


Abbildung 4.1-70: H13 Medium A – Anströmseite bei 100facher Vergrößerung

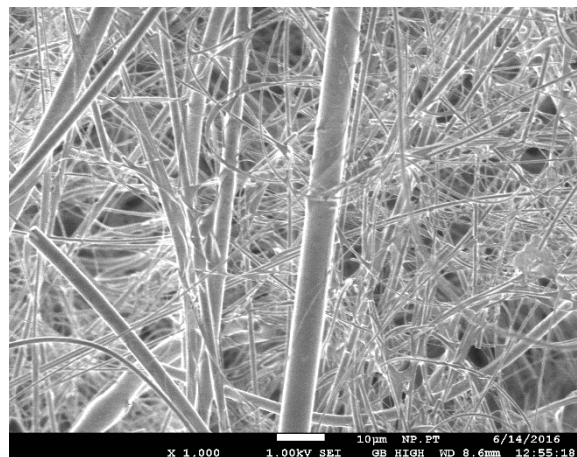
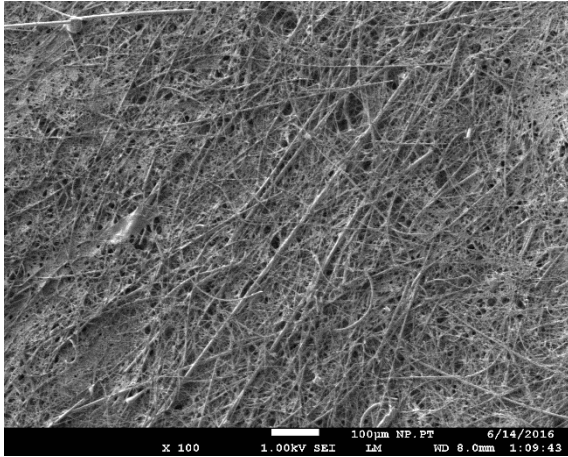
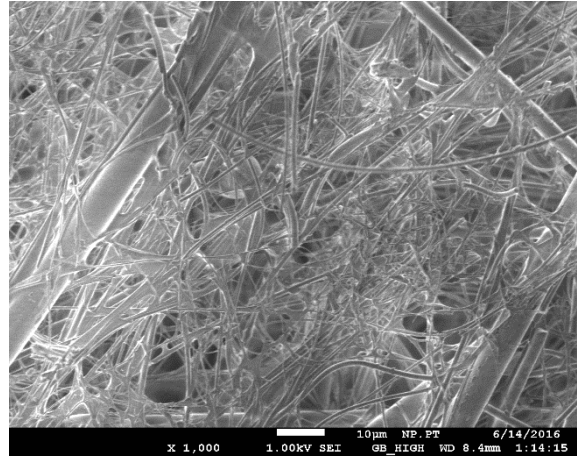


Abbildung 4.1-71: H13 Medium A – Anströmseite bei 1.000facher Vergrößerung



**Abbildung 4.1-72: H13 Medium A –
Abströmseite bei 100facher Vergrößerung**



**Abbildung 4.1-73: H13 Medium A –
Abströmseite bei 1.000facher Vergrößerung**

- **H14-Medium**

zeigt die Retentionskurve eines H14-Mediums. Für das Medium wurde eine Geschwindigkeit von 2,68 cm/s errechnet. Bei dieser Geschwindigkeit erfüllt das Medium seine Klasse deutlich und liegt teilweise auch im Bereich der nächsthöheren Filterklasse. Aufgrund der hohen Messzeit wurden hier die Retentionswerte gegenüber Nanopartikel nur an einer Ronde untersucht und beispielhaft dargestellt. Es zeigt sich ein guter Übergang der mit Kupfer und mit verdünntem DEHS gemessenen Retentionswerte.

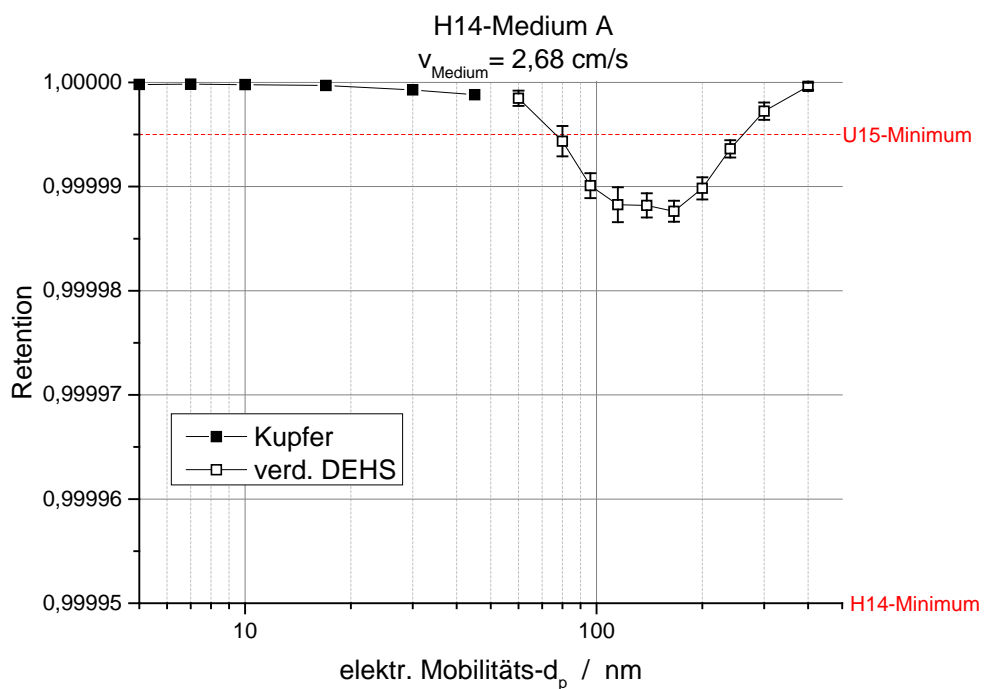


Abbildung 4.1-74: FAG H14-Medium A

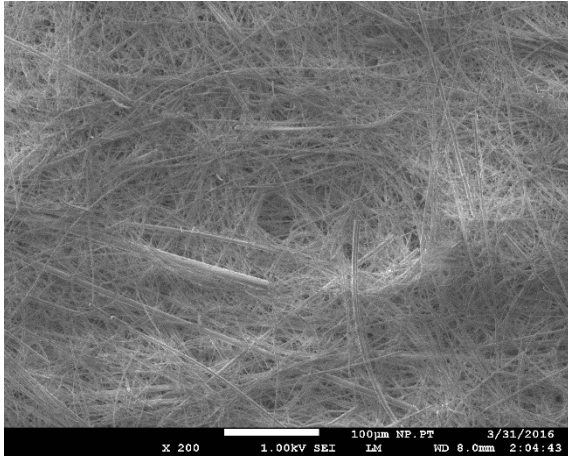


Abbildung 4.1-75: H14 Medium A – Anströmseite bei 100facher Vergrößerung

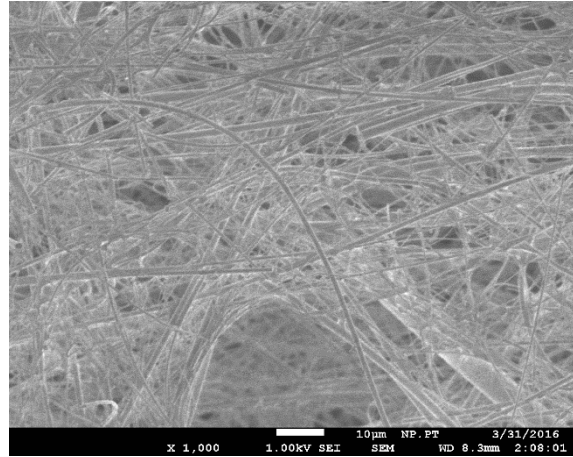


Abbildung 4.1-76: H14 Medium A – Anströmseite bei 1.000facher Vergrößerung

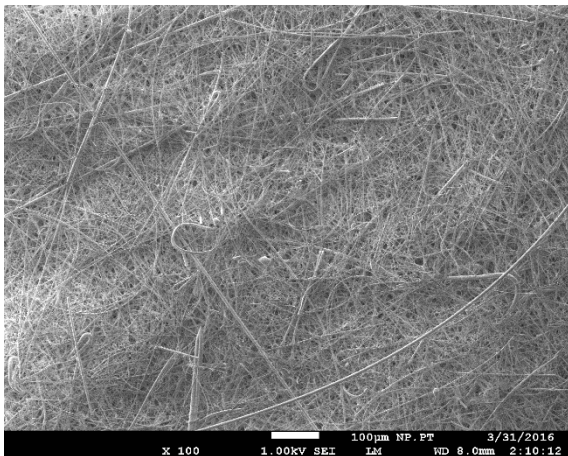


Abbildung 4.1-77: H14 Medium A – Abströmseite bei 100facher Vergrößerung

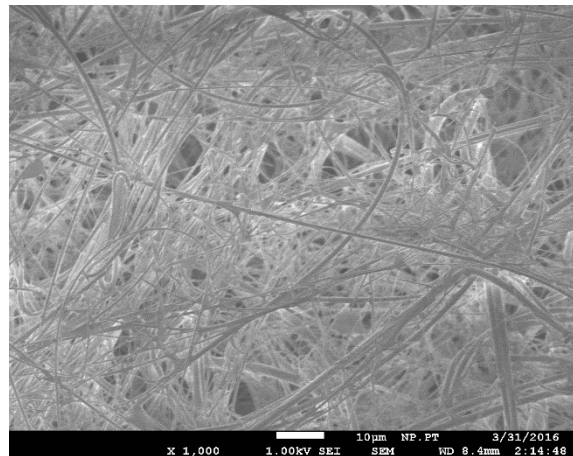


Abbildung 4.1-78: H14 Medium A – Abströmseite bei 1.000facher Vergrößerung

Dieses Medium zeigt auf seinen REM-Aufnahmen ebenfalls unterschiedliche Faserdurchmesser. Allerdings wird vor allem bei 1.000facher Vergrößerung deutlich, dass die Streuung der Durchmesserwerte nicht so groß ist wie bei den vorherigen Medien (Abbildung 4.1-76 und Abbildung 4.1-78).

- **U15-Medium**

Das folgende Medium wurde mit der Filterklasse U15 ausgezeichnet. Da zu diesem Medium kein Nennvolumenstrom angegeben war, wurde es bei einer Anströmgeschwindigkeit von 2 cm/s vermessen. Abbildung 4.1-79 zeigt den Retentionsverlauf für verdünntes DEHS im Größenbereich von 45 bis 300 nm. Die Abscheidung von Nanopartikeln konnte bei dieser Filterklasse aufgrund der extrem langen Messzeit mit vertretbarem Messaufwand nur exemplarisch an einer Filterrunde untersucht werden.

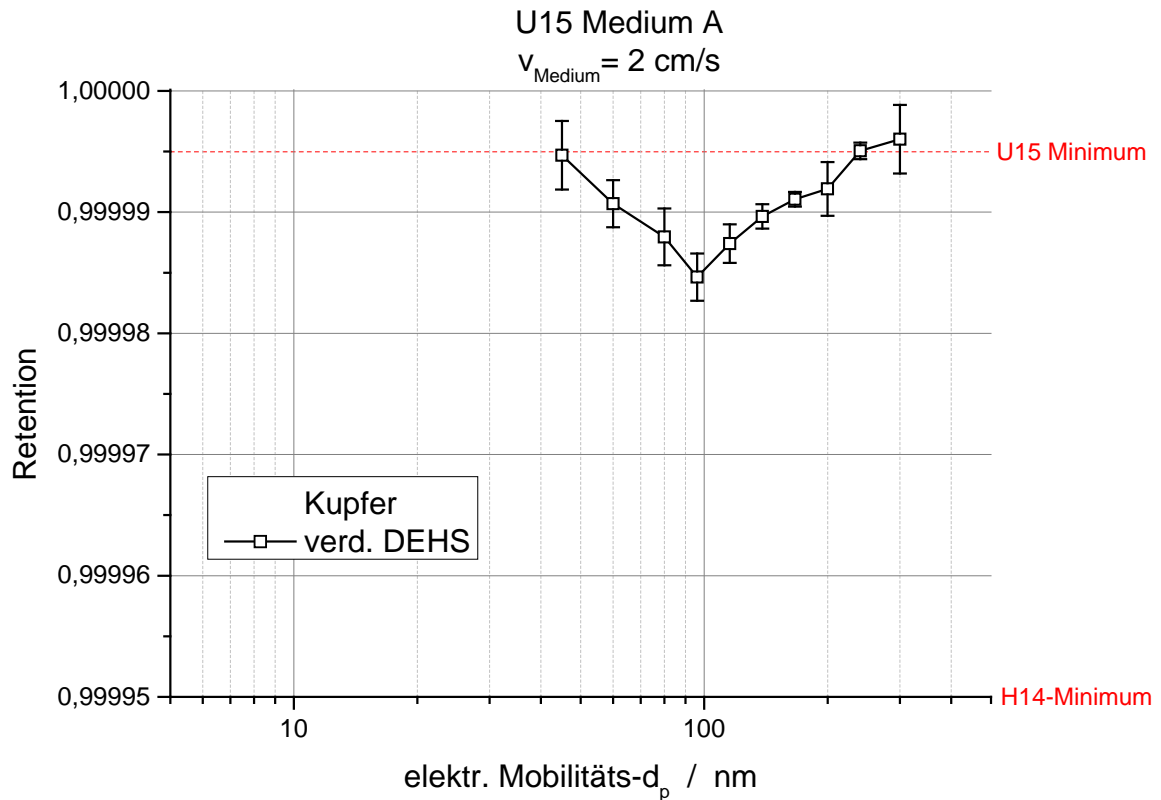


Abbildung 4.1-79: FAG U15-Medium A

Erkennbar ist, dass dieses Medium seine Filterklasse bei einer Anströmgeschwindigkeit von 2 cm/s mit einem Retentionswert von 0,99 99 85 für 100 nm große Partikel nicht erfüllt. Der Mindestwirkungsgrad liegt bei der Filterklasse U15 bei einem Wert von 0,99 99 95. Dies deutet darauf hin, dass die Geschwindigkeit zu hoch gewählt wurde und dieses Medium unter realen Bedingungen langsameren Anströmgeschwindigkeiten ausgesetzt ist.

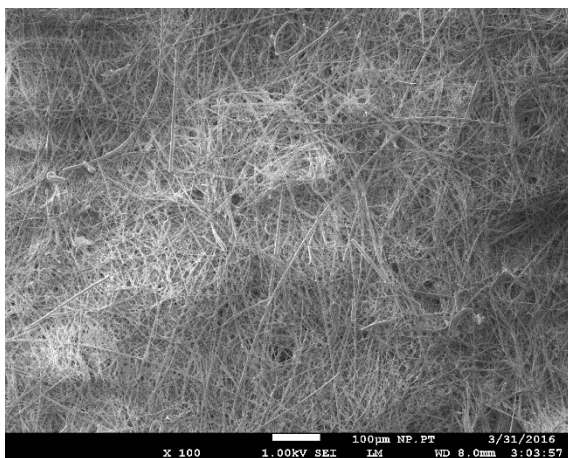


Abbildung 4.1-80: U15 Medium A – Anströmseite bei 100facher Vergrößerung

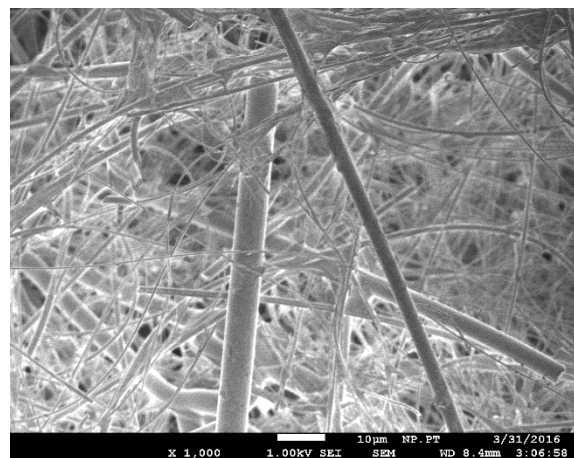


Abbildung 4.1-81: U15 Medium A – Anströmseite bei 1.000facher Vergrößerung

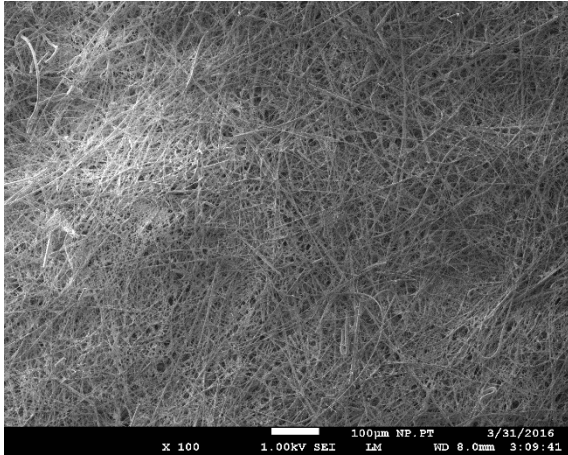


Abbildung 4.1-82: U15 Medium A – Abströmseite bei 100facher Vergrößerung

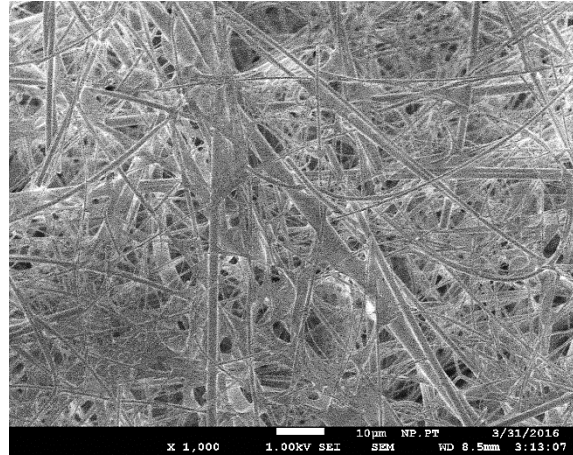


Abbildung 4.1-83: U15 Medium A – Abströmseite bei 1.000facher Vergrößerung

Anhand der REM-Aufnahmen wird deutlich, dass dieses Medium viele Fasern mit Durchmessern von einigen hundert Nanometern aufweist. Hauptsächlich auf der Abströmseite, Abbildung 4.1-83, weisen die Zwischenräume der Fasern flächige Ausbildungen auf.

Das zweite Medium der Klasse U15 wurde bei einer Geschwindigkeit von 2,73 cm/s vermessen.

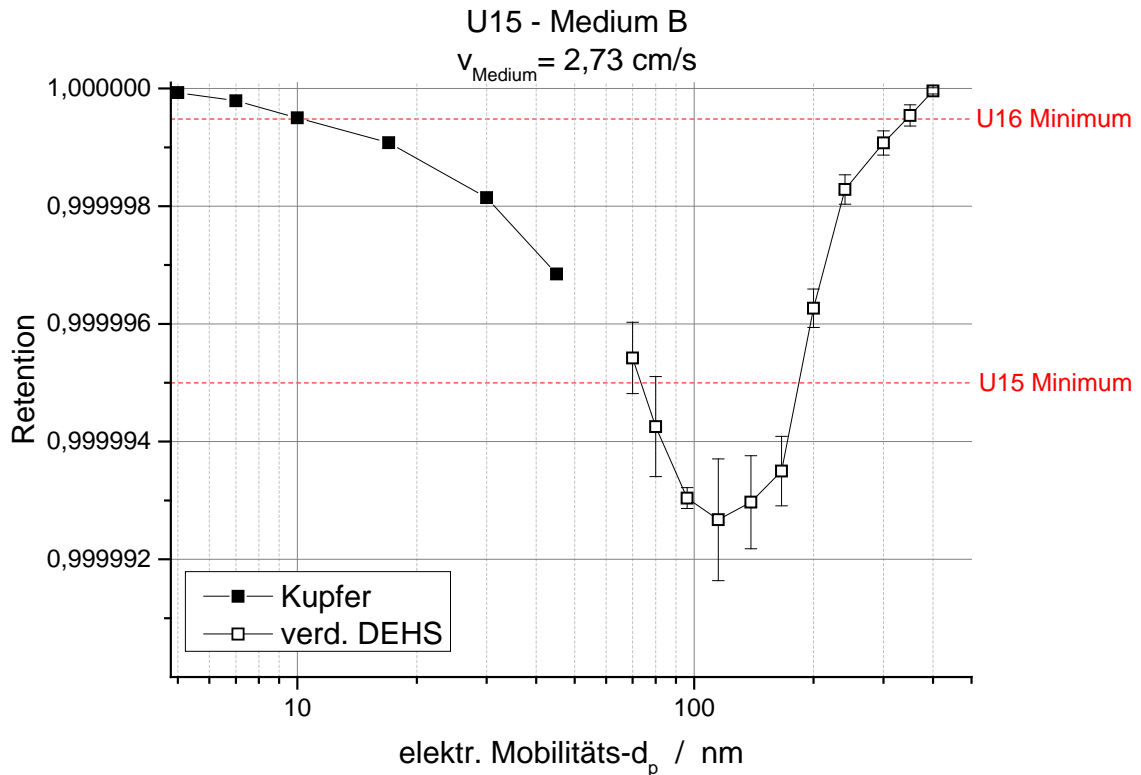


Abbildung 4.1-84: FAG U15-Medium B

Auch dieses Medium erfüllt den Mindestwirkungsgrad seiner Klasse im MPPS-Bereich mit einem Wert von 0,999993 nicht. Die Retention der Nanopartikel wurde hier wieder exemplarisch an einer Ronde durchgeführt und ergänzt die Retentionswerte des verdünnten DEHS sehr gut. Hier fällt auf, dass der Abscheidegrad gegen Nanopartikel mit zunehmendem Durchmesser direkt abnimmt im Gegensatz zu anderen Retentionskurven (vergleiche Abbildung 4.1-64 und Abbildung 4.1-74).

Die REM-Aufnahmen zeigen vor allem auf der Anströmseite, Abbildung 4.1-86, viele Feinstfasern mit Durchmessern im Nanometerbereich und eine dicht gepackte Faserstruktur. Anders als beim vorherigen Medium zeigt sich bei diesem ein anderes Bild auf der Abströmseite. In Abbildung 4.1-88 sind nur wenige feine, dafür deutlich mehr größere und auch zusammengelagerte Fasern zu erkennen.

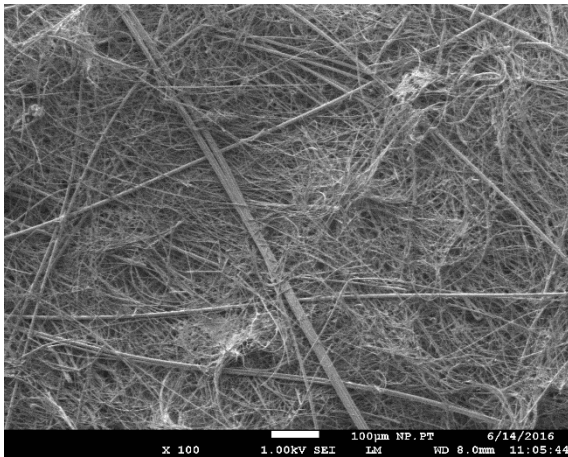


Abbildung 4.1-85: U15 Medium B – Anströmseite bei 100facher Vergrößerung

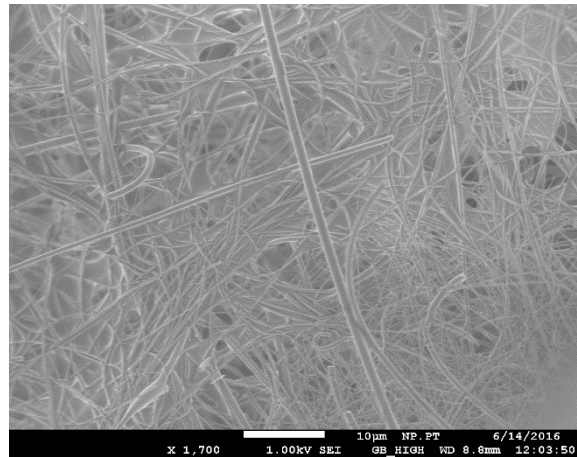


Abbildung 4.1-86: U15 Medium B – Anströmseite bei 1.700facher Vergrößerung

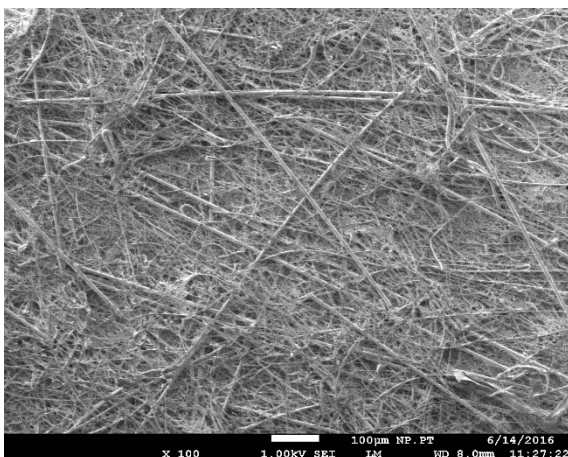


Abbildung 4.1-87: U15 Medium B – Abströmseite bei 100facher Vergrößerung

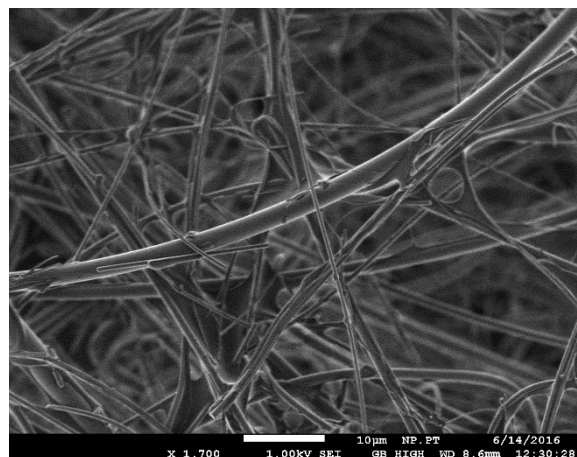


Abbildung 4.1-88: U15 Medium B – Abströmseite bei 1.700facher Vergrößerung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mit dem veränderten Prüfaufbau die Messung der Retention gegenüber Nanopartikeln bei nahezu allen Filterklassen möglich ist. Durch den Neuerwerb eines CPC mit einem höheren Probenahmevolumenstrom konnten auch einige höherklassige Medien mit einem vertretbaren Zeitaufwand auf die Abscheidung im Bereich von Nanopartikeln untersucht werden. Aufgrund der monodispersen Bereitstellung wurde selbst bei extrem langen Messzeiten ab der Filterklasse E12 kein signifikanter Druckverlustanstieg verzeichnet. Durch den - um eine angemessene statistische Sicherheit vorzuweisen - selbst definierten Standard von mindestens 100 Zählereignissen auf der Reingasseite, dauern allerdings vor allem Messungen hochklassiger Schwebstofffilter impraktikabel lange.

Es zeigte sich, dass viele Medien bei den von den Herstellern angegebenen Geschwindigkeiten ihre Filterklasse erfüllen oder sogar die nächsthöhere erreichen. Nur einige wenige in diesem Kapitel vorgestellte Medien, hauptsächlich hochklassige Schwebstofffilter, wiesen Fraktionsabscheidegrade unterhalb des für ihre Filterklasse repräsentativen Mindestwirkungsgrades auf. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass die Messung der Filterfläche eines Filterelementes mit einigen Fehlerquellen verbunden ist. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei einigen Medien eine beispielsweise zu geringe Filterfläche ausgemessen wurde, was dazu führt, dass diese Medien bei einer zu hohen Geschwindigkeit vermessen wurden. Die erhöhte Anströmgeschwindigkeit führt dann zu einer Verringerung der Retention, die wiederum für die Einordnung in die Filterklasse verantwortlich ist.

4.1.4 Filtereffizienz von synthetischen Filtermedien im Neuzustand und nach Entladung gegen Nanopartikeln

In diesem Kapitel werden die Untersuchungen zu Auswirkungen elektrophoretischer Phänomene auf die Abscheidung von Nanopartikeln in Filtermedien vorgestellt. Dafür wurden synthetische Medien mit elektrostatischen Fasern im Neuzustand und nach gezielter Entladung durch Isopropanol mit Nanopartikeln in unterschiedlichen Ladungszuständen beaufschlagt. Die Ergebnisse dieser Messungen dienen u.a. als Grundlage für die Modellierung in AP7.

Elektrophoretische Abscheidemechanismen beruhen auf der coulombschen Wechselwirkung von gegensätzlichen Ladungen. Für die Filtration sind hierbei vorhandene Ladungen auf den Fasern sowie auf den Aerosolpartikeln von Interesse. In Abbildung 4.1-89 sind die unterschiedlichen Konstellationen vereinfacht dargestellt.

Weisen bspw. die Partikel und die Filterfasern eine unterschiedliche Polarität auf, dann erfolgt eine Abscheidung der Partikel an den Fasern aufgrund der coulombschen Anziehungskraft.

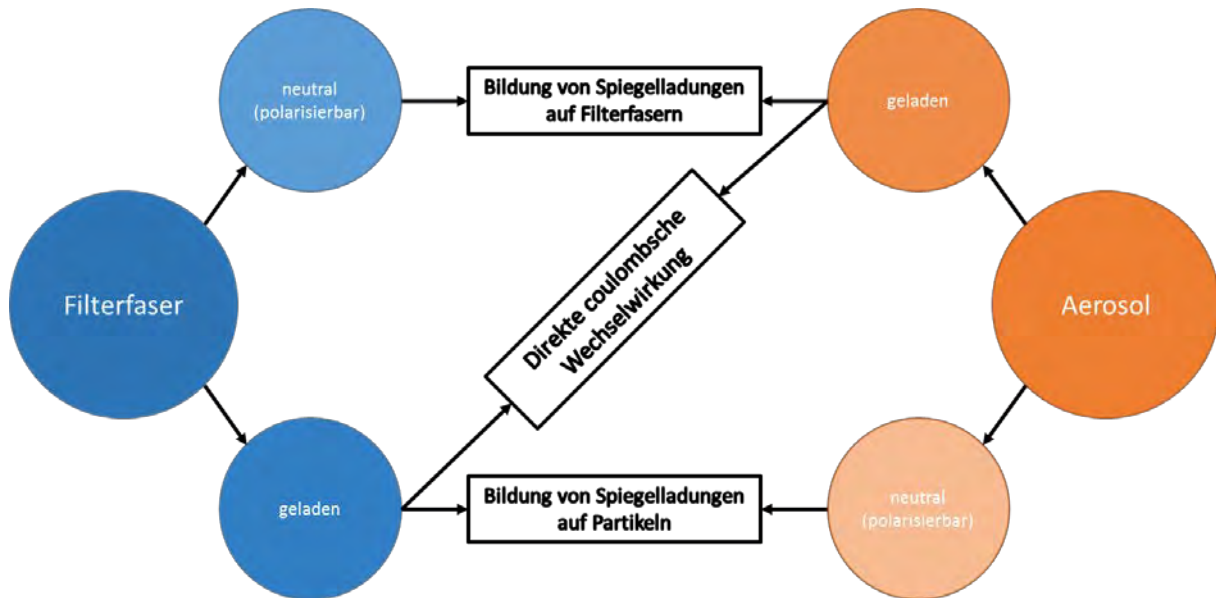


Abbildung 4.1-89: Ladungswechselwirkung von Faser und Partikel

In der überarbeiteten Version der DIN 1822:2011 wird darauf verwiesen, dass Filtermedien mit mindestens 20 % synthetischen Faseranteil neutralisiert werden müssen. Jedoch kann es selbst nach Neutralisierung eines sogenannten Elektretmediums zu elektrophoretischen Abscheidebeiträgen kommen. Sofern das Fasermaterial durch Isopropanolbehandlung neutralisiert wurde, jedoch polarisierbar ist, kann ein aufgeladenes Aerosol Spiegelladungen auf den Filterfasern hervorrufen, die wiederum zu Abscheidungen führen. Gleiches gilt für konventionelle Medien ohne Elektreteigenschaften, sofern die Fasern polarisierbar sind. Insbesondere geladene Partikel mit einem Durchmesser unterhalb von 100 nm werden aufgrund ihrer hohen elektrischen Mobilität elektrophoretisch abgeschieden. Dies würde ebenfalls zu einer erhöhten Abscheidung führen. Zur Überprüfung dieses Sachverhaltes wurden Effizienzmessungen im unbehandelten Medienzustand durchgeführt und mit denen nach Isopropanolbehandlung verglichen. Die Entladung des Mediums wurde durch Beaufschlagung mit Isopropanol-Nebel realisiert. Anschließend wurde das Medium an Umgebungsluft getrocknet, bis der Druckverlust bei Wiedereinbau auf dem Niveau des unbehandelten Mediums war [23].

Für die Messreihen wurden die Filterrunden entweder mit Kupfernanopartikeln (ausgefüllte Symbole) oder unverdünntem DEHS (unausgefüllte Symbole) polydispers

beaufschlagt. Auf eine Verdünnung wurde absichtlich verzichtet, da trotz nachgeschaltetem Diffusionstrockner nicht gewährleistet werden konnte, dass nicht doch Isopropanol-Reste das Medium erreichen und so zu einer Teilentladung führen. Das verwendete Testaerosol wurde vor der Beaufschlagung des Mediums ins Boltzmann-Gleichgewicht überführt und hatte damit einen nach außen neutralen Zustand.

Während der Messungen wurde sichergestellt, dass der Druckverlust um nicht mehr als 10 % ansteigt; so ist gewährleistet, dass das Medium nicht wesentlich durch das aufgebrauchte DEHS verändert wurde. Es wurden jeweils drei Medienrunden von zwei Medien der Klasse F7 und eines F9-Mediums untersucht. Die Anströmgeschwindigkeit bei den F7-Medien liegt normalerweise bei um die 16 cm/s. Da am Medienprüfstand keine so hohen Geschwindigkeiten eingestellt werden können, wurden diese Untersuchungen bei der halben Mediengeschwindigkeit von 8 cm/s durchgeführt. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurde auch für die F9-Filtermedien diese Anströmgeschwindigkeit realisiert.

Abbildung 4.1-90 zeigt die Fraktionsabscheidegrade eines F7- Synthetikmediums vor und nach Entladung durch Isopropanol. Zu erkennen ist die deutliche Verschlechterung der Retentionswerte im entladenen Zustand (rote Kurve). Das Medium entspricht im ungeladenen Zustand nicht mehr der Filterklasse F7 nach DIN EN 779. Da diese Messreihen nur bei der halben Filtergeschwindigkeit durchgeführt wurden, ist außerdem zu berücksichtigen, dass die Retention im MPPS abnimmt, je höher die Anströmgeschwindigkeit ist. Es kann also davon ausgegangen werden, dass sich der MPPS-Bereich unter realen Anströmgeschwindigkeiten von 16 cm/s weiter verschlechtert.

Abbildung 4.1-91 zeigt den Größenbereich bis 30 nm vergrößert, um den Einfluss einer Entladung auf die Abscheidung von Nanopartikeln zu verdeutlichen. Bis zu einer Partikelgröße von ca. 10 nm wirkt sich die Entladung kaum auf die Retentionswerte aus. In diesem Größenbereich dominiert die Diffusionsabscheidung. Aufgrund der Neutralisierung des Testaerosols (Boltzmann-Gleichgewicht) ergibt sich für diese Nanopartikel eine sehr geringe Ladungswahrscheinlichkeit. 99,3 % der Testpartikel sind ungeladen [9]. Der Ladungszustand der Fasern im unbehandelten Zustand hat also kaum einen Einfluss auf die hauptsächlich ungeladenen Partikel des Testaerosols. Erst bei größeren Partikeln wirken die elektrophoretischen Abscheidemechanismen und verbessern so die Retention - im Vergleich zum entladenen- im unbehandelten Zustand.

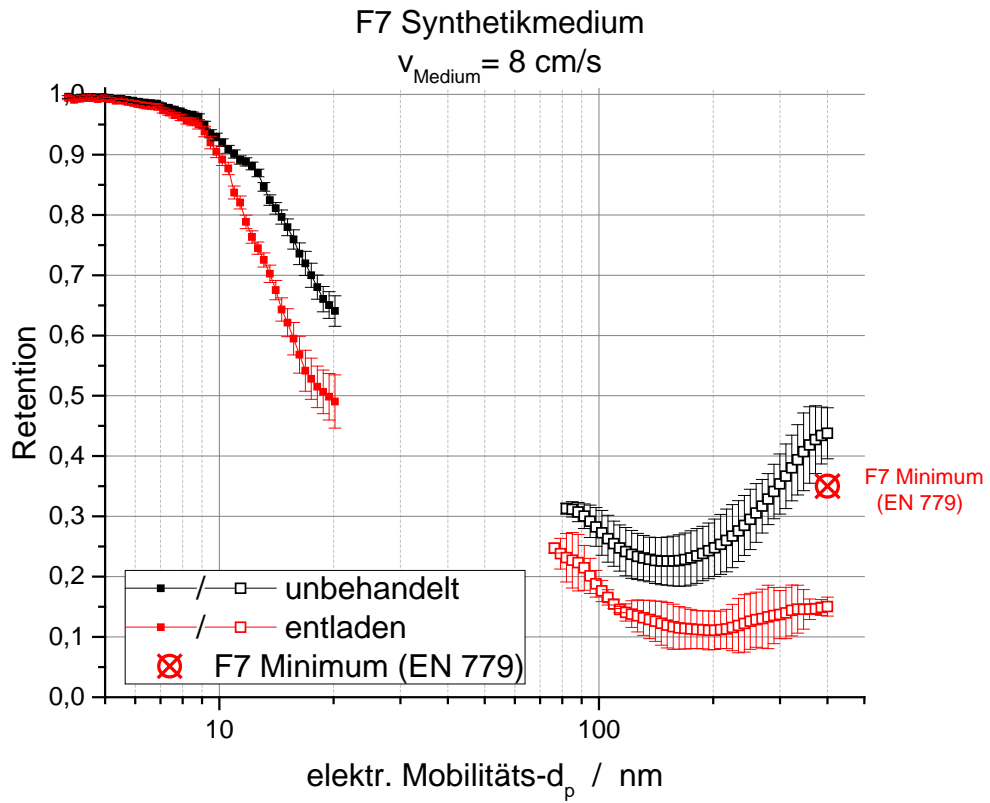


Abbildung 4.1-90: FAG - Synthetikmedien vor und nach Entladung F7

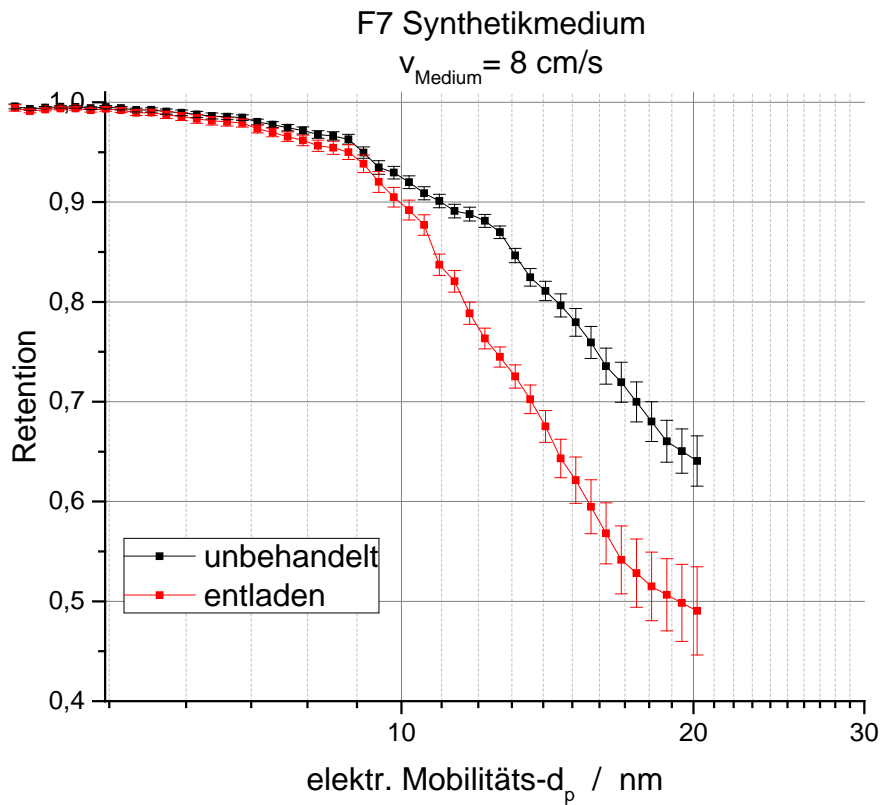


Abbildung 4.1-91: FAG- Synthetikmedien vor und nach Entladung F7

Das folgende Synthetikmedium entspricht laut Hersteller der Filterklasse F9 und wurde auch bei 8 cm/s vermessen. Wie in Abbildung 4.1-92 zu erkennen ist, liegen die Retentionswerte des unbehandelten Mediums deutlich über den Anforderungen nach DIN EN 779. Im entladenen Zustand weist der Fraktionsabscheidegrad bei 0,4 μm allerdings einen Wert von nur ca. 0,5 auf, das Minimum der Filterklasse F9 gibt jedoch 0,75 vor. Somit erfüllt dieses Medium nach Isopropanol-Behandlung nicht mehr die geforderte Abscheidung. Das deutet darauf hin, dass hier eine stark ausgeprägte Aufladung der Filterfasern vorliegt, die durch das Isopropanol entladen wurden.

In Abbildung 4.1-93 sind die Retentionswerte gegenüber den Kupfernanopartikeln dargestellt. Bis zu einer Partikelgröße von 12 nm sind die Verläufe der beiden Messreihen kaum zu unterscheiden und liegen der Filterklasse gemäß deutlich höher als beim F7-Medium. Schon ab etwa 20 nm penetrieren das Medium etwa doppelt so viele Partikel im entladenen wie im unbehandelten Zustand.

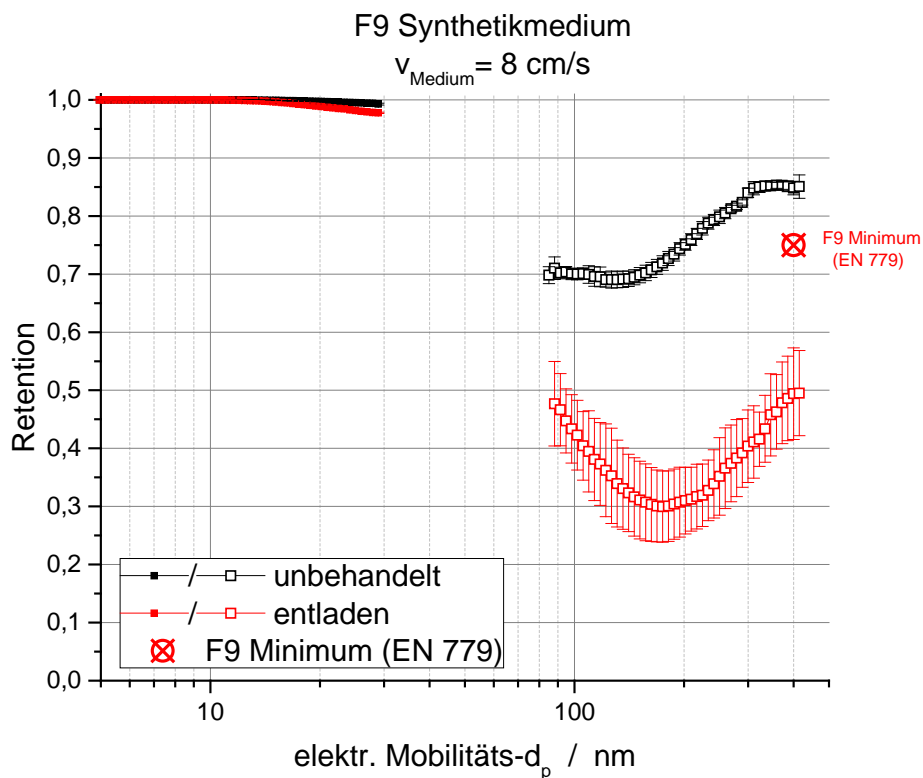


Abbildung 4.1-92: FAG - Synthetikmedien vor und nach Entladung F9

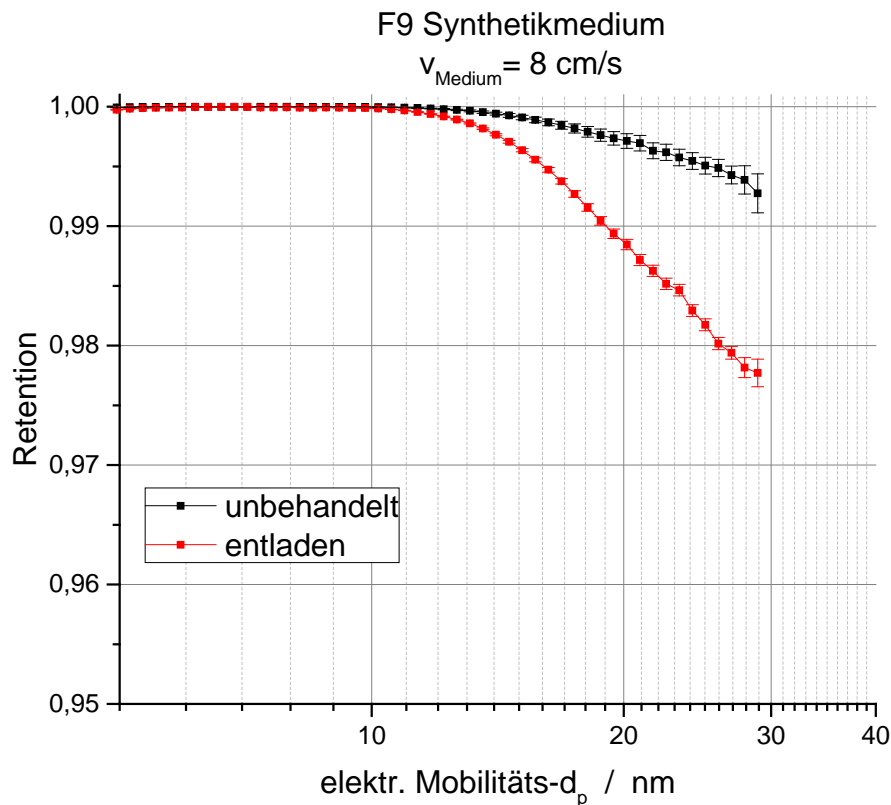


Abbildung 4.1-93: FAG (nano)- Synthetikmedien vor und nach Entladung F9

Abbildung 4.1-94 zeigt drei Messreihen des gleichen Synthetikmediums mit integrieren Feinstfasern. Dieses wurde sowohl im unbehandelten (geladenen) Zustand vermessen, als auch nach IPA-Behandlung (entladen) und im ungeladenen Zustand. Dieser ungeladene Zustand entspricht dem Neuzustand des Mediums, bevor der Hersteller die Fasern mit Elektretwirkung ausstattet. Es handelt sich hierbei um ein Medium, bei dem die Feinstfaserschicht in Wellenform zwischen zwei Stützvliesen liegt, ähnlich dem in Abbildung 4.1-38 gezeigten Medium im vorherigen Kapitel. Deutlich wird hier, dass eine IPA-Behandlung zu einer vollständigen Entladung des Mediums führt, da die Verläufe der ungeladenen und der entladenen Messreihe nahezu identische Werte aufweisen. Des Weiteren erfüllt dieses Medium sowohl im ungeladenen als auch im entladenen Zustand noch die Minimalanforderung der Filterklasse F7.

In Abbildung 4.1-95 sind die Messwerte bis 30 nm vergrößert, um die Unterschiede der Abscheidung von Kupfernanopartikeln genauer betrachten zu können. Auch hier ist die Übereinstimmung der Werte des entladenen Mediums und des ungeladenen Mediums gut zu erkennen. Allerdings liegen beide Kurven auch für kleine Partikelgrößen unterhalb von 10 nm auf einem geringeren Niveau als die des geladenen Mediums. Der große Unterschied im Nanopartikelbereich bei diesem Medium wird wahrscheinlich nicht durch die Entladung bzw. Nichtladung der Fasern beeinflusst,

da, wie weiter oben beschrieben, kleine Partikel im Boltzmann-Gleichgewicht zu 99,3 % ungeladen sind.

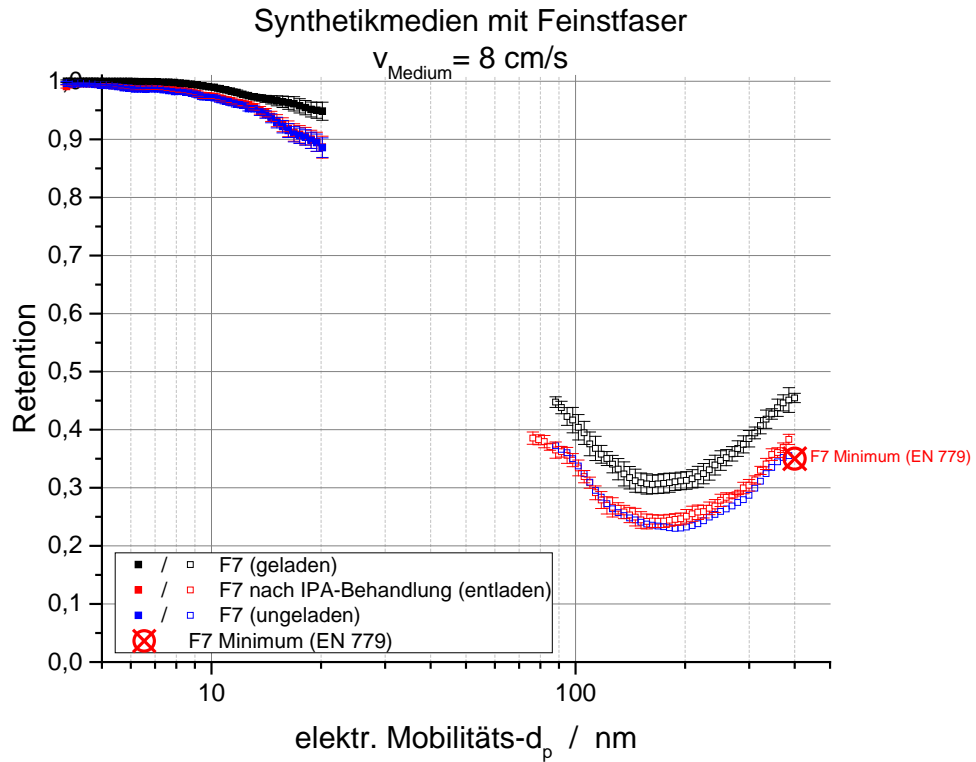


Abbildung 4.1-94: FAG - Synthetikmedien vor und nach Entladung F7 (Feinstfasern)

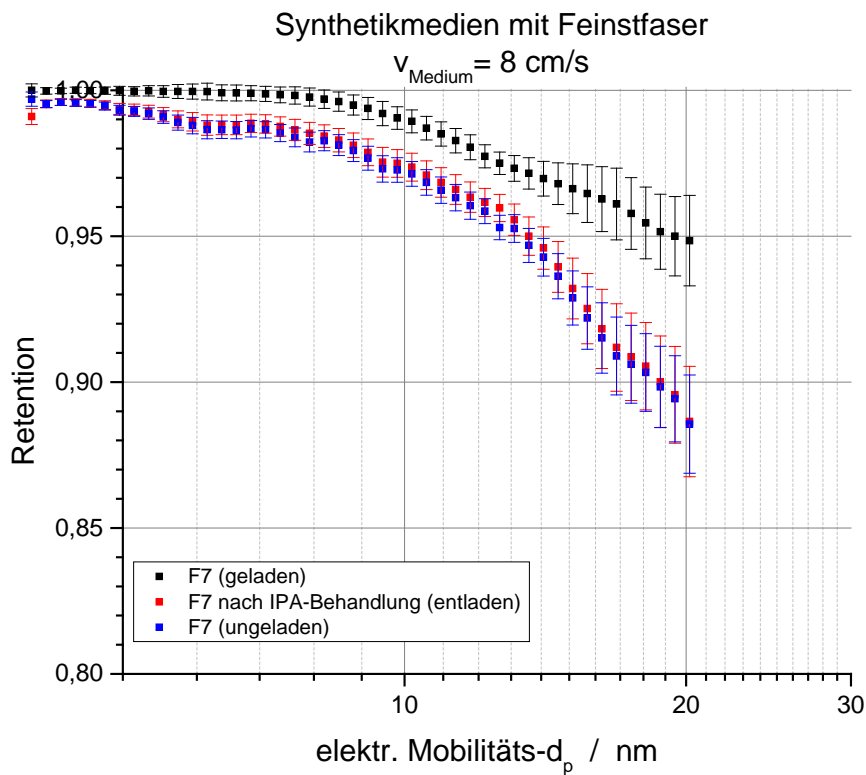


Abbildung 4.1-95: FAG (nano)- Synthetikmedien vor und nach Entladung F7 (Feinstfasern)

Zwischenfazit: In diesem Kapitel konnte gezeigt werden, dass der Abscheidegrad der Elektretmedien durch die Behandlung mit Isopropanol deutlich sinkt. Dieser Effekt konnte im Bereich des größten Durchlasses (MPPS) genauso wie für Nanopartikel beobachtet werden. Ferner zeigt Abbildung 4.1-94 durch den Vergleich des entladenen Mediums mit dem des vom Hersteller gelieferten ungeladenen Mediums die Effektivität der Entladung mit Isopropanol.

- **Einfluss des Aerosolladungszustandes auf den Abscheidegrad**

In diesem Kapitel soll der Ladungszustand des Testaerosols auf den Abscheidegrad untersucht werden. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für das Arbeitspaket „Modellierung“ welches im Unterpunkt 4.7 erarbeitet wurde. Um Effizienzmessungen unter realitätsnahen Bedingungen durchzuführen, ist in der DIN EN 1822 festgelegt, dass ein Testaerosol nach der Bereitstellung zu neutralisieren ist. Dies gilt für eine poly- sowie monodisperse Bereitstellung gleichermaßen. Speziell bei Effizienztests mit monodisperser Bereitstellung durch Klassierung eines polydispersen Aerosols mit einem DMA trägt jedes Partikel mindestens eine Elementarladung. Bereits geringfügig geladene Fasern können hier das Effizienzergebnis fälschlicherweise verbessern, da Partikel aufgrund der coulombschen Wechselwirkung bei gegensätzlicher Polarität abgeschieden werden.

In diesem Arbeitspaket wird daher der Einfluss des Ladungszustandes auf die Effizienz von Filtermedien untersucht. Dazu wird zunächst das Filtermedium normkonform untersucht, d. h. der Neutralisator nach der Aerosolbereitstellung neutralisiert das Testaerosol dahingehend, dass die Ladungswahrscheinlichkeit der Partikel der Boltzmann-Verteilung im Gleichgewicht entspricht. In einer weiteren Messung erfolgt die Effizienzmessung ohne erneute Neutralisation des Testaerosols, sodass alle Partikel geladen sind. Aufgrund der bereits in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Messmethodik kann die Untersuchung an ein und derselben Runde untersucht werden. Sofern die Retentionswerte bei beiden Messarten voneinander abweichen, ist anzunehmen, dass die Differenz in elektrophoretischen Abscheidemechanismen begründet liegt.

In Abbildung 4.1-96 ist der FAG für beide Fälle als Retention über dem Partikeldurchmesser aufgetragen dargestellt. Bei dem Filter handelt es sich um ein E10-Glasfasermedium. Es wurden drei Filterrunden zunächst mit neutralisiertem und anschließend mit geladenem Aerosol untersucht. Die Retention im MPPS bei ca. 200 nm ist für beide Fälle identisch. Bei kleineren Partikeln hin zu 50 nm ist jedoch eine deutliche Differenz bei allen Runden ersichtlich. Der Filtertest mit neutralisiertem Aerosol zeigte eine um etwa 0,005 verringerte Retention im Durchmesserbereich von

50 bis 120 nm. Es ist anzunehmen, dass die Differenz zum FAG mit dem geladenen Aerosol im elektrophoretischen Abscheidebeitrag begründet liegt.

In Abbildung 4.1-97 sind die Fraktionsabscheidegrade eines H14-Schwebstofffiltermediums gezeigt. Der Test wurde an denselben drei Ronden mit neutralisiertem und geladenem Aerosol durchgeführt. Vergleichbar zu dem Ergebnis in Abbildung 4.1-96 ist die Retention bei größeren Partikel $d_p \geq 200$ nm für beide Messungen ähnlich. Dies kann dadurch geklärt werden, dass der dominierende Abscheidemechanismus in dieser Partikelgröße bei der Mediengeschwindigkeit die Impaktion bzw. Interzeption ist.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass der Ladungszustand des Testaerosols speziell für Partikel mit einem Durchmesser kleiner als 200 nm sehr entscheidend ist. Sofern durch die monodisperse Bereitstellung alle Partikel geladen sind, ergibt sich auch für Medien ohne ausgezeichnete Elektret-eigenschaft ein verbesserter Abscheidegrad für kleinere Partikel. Es ist denkbar, dass selbst eine geringe Anzahl von Ladungen auf Filterfasern die Trajektorien der hochmobilen Partikel beeinflusst und somit die Abscheidung der Partikel begünstigt.

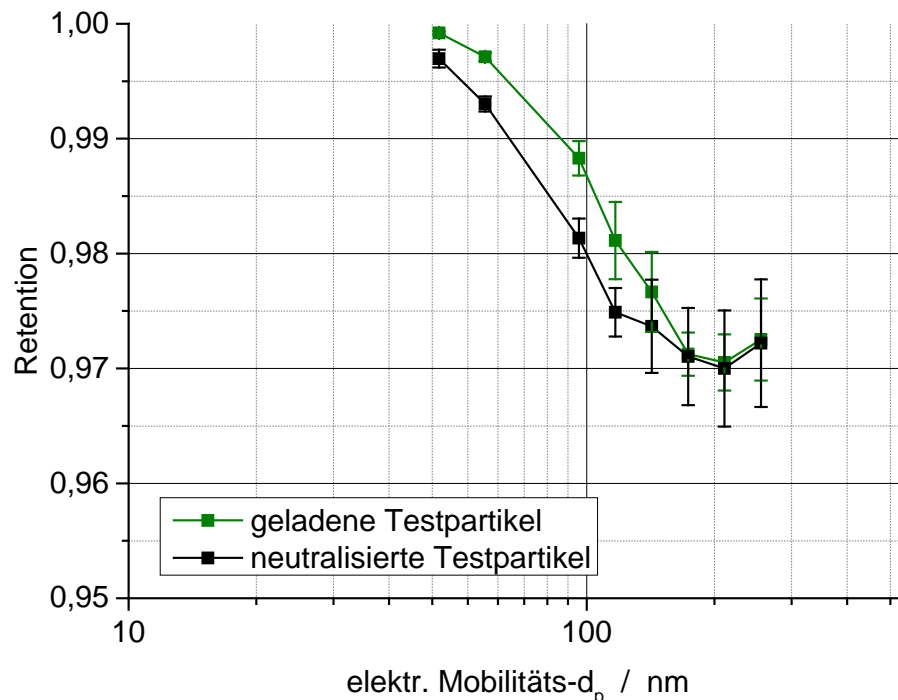


Abbildung 4.1-96: E10 Einfluss neutralisierter Testpartikel

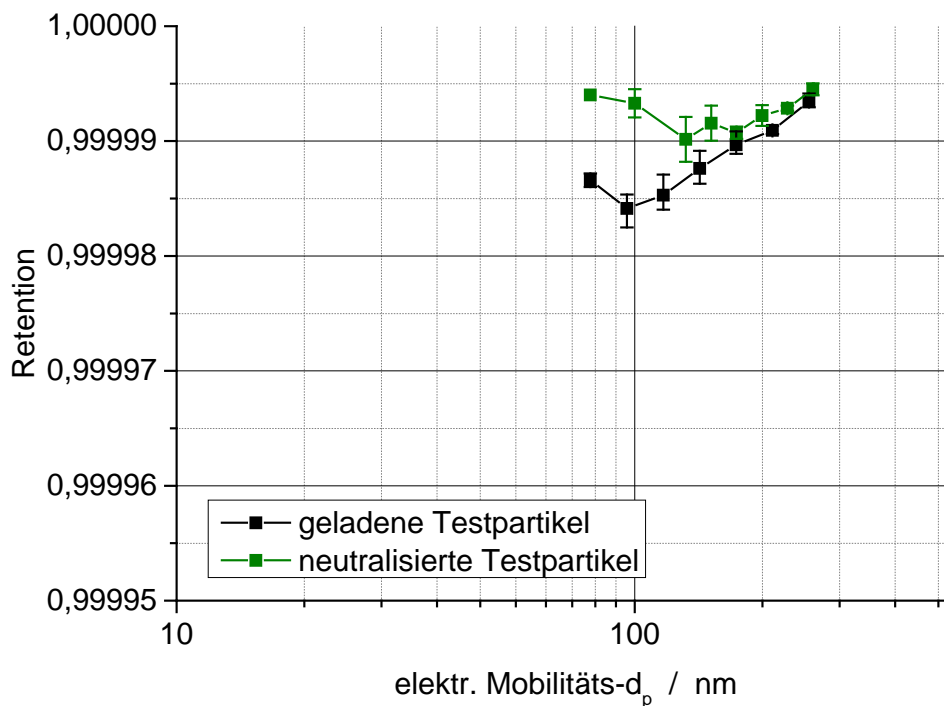


Abbildung 4.1-97: FAG – H14 Einfluss neutralisierter Testpartikel

Durch die Modellierung in Kapitel 4.7 kann abgeschätzt werden, inwiefern durch geringfügig geladene Fasern dieser vermehrte Abscheidebeitrag nachgestellt werden kann.

4.1.5 Filtereffizienzen für nanoskalige Partikel < 100 nm nach Beladung

Im Rahmen des Projektes wurde in Anlehnung an DIN EN 779 auch die Veränderung der Effizienz durch gezielte Beladung der Flachfiltermedien untersucht. Die Medienbeladung erfolgte mit dem Teststaub A2 nach ISO 12103-1, welcher mittels eines rotierenden Bürstengenerators (RBG) bereitgestellt wurde. Die Funktionsweise des RBG ist in Abbildung 4.1-98 graphisch dargestellt. Der Hohlzylinder (Staubbehälter) wird mit Teststaub befüllt, mittels eines Stopfers verdichtet und nach gravimetrischer Bestimmung der Masse in den RBG eingebaut. Durch einen Vorschubkolben wird eine definierte Menge Staub gegen die rotierende Bürste geleitet, die den Staub aus dem Vorratsbehälter abtrennt und in den partikelfreien Luftstrom dispergiert.

Die Beladung der Medien wurde bei den gleichen Anströmgeschwindigkeiten vorgenommen wie die Messungen der Fraktionsabscheidegrade. Die Geschwindigkeiten ergaben sich aus den Herstellerangaben für die entsprechend konfektionierten Filter, welche auf die Filterfläche umgerechnet wurden. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass die Medienbeladung ebenso wie die Effizienzmessungen unter realitäts-

nahen Geschwindigkeiten durchgeführt wurde. Die Zugabe des Teststaubes A2 erfolgte nach DIN EN 779 mit einer Konzentration von 70 mg/m^3 bis zu einer definierten aufgetragenen Masse. Die Druckverluste der Medien wurden während des gesamten Beladungsvorgangs fortwährend aufgezeichnet.

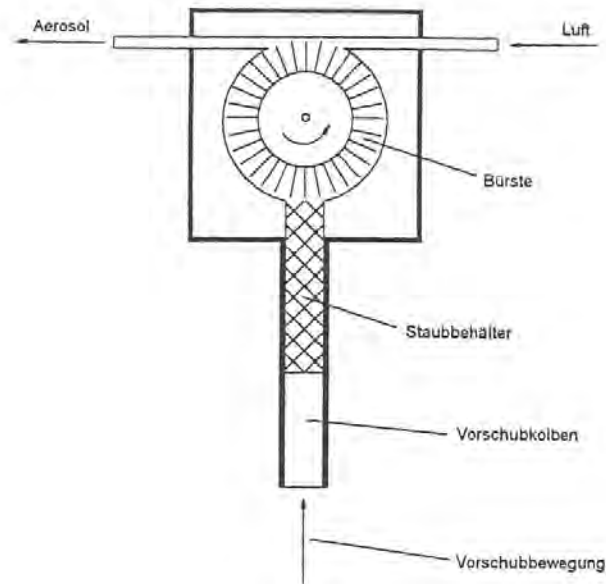


Abb. 2.1: Funktionsprinzip des RBG-1000

Abbildung 4.1-98: Funktionsprinzip des rotierenden Bürstengenerators (RBG)

Für die Untersuchung der Abscheideeffizienz von Nanopartikeln ($d_p \leq 100 \text{ nm}$) nach Beladung mit Teststaub wurden Effizienzmessungen an Feinstaubfiltern der Klassen F7 und F9 in unterschiedlichen Beladungsstadien durchgeführt. Das erste Stadium entspricht den Filtern im Neuzustand vor einer Staubbeladung. Nach Beladung mit zunächst 25 g/m^3 (erstes Beladungsstadium) und insgesamt 50 g/m^3 (zweites Beladungsstadium) wurden die Filter erneut vermessen. Diese Stadien erwiesen sich bei Vorversuchen zu diesem Projekt als sinnvolle Beladungsschritte für den Vergleich mit dem Neuzustand.

Der für die Beladung verwendete Teststaub A2 „fein“ besteht hauptsächlich aus Siliziumdioxidpartikeln. Abbildung 4.1-99, ein Auszug aus der DIN EN 779, zeigt die kumulierte Volumenverteilung der A2-Partikel nach ISO 12103-1.

Eine normierte Anzahlgrößenverteilung der mittels RBG bereitgestellten A2-Partikel zeigt die Abbildung 4.1-100. Die Verteilung ist dabei als Funktion des aerodynamischen Durchmessers dargestellt, da sie mit einem Aerodynamic Particle Sizer (APS) gemessen wurde.

Tabelle 4 — Größenverteilung von Prüfstaub
ISO 12103-A2 (siehe ISO 12103-1:1997)

Größe μm	Volumen größer als die Größe %
1	96,5 – 97,5
2	87,5 – 89,5
3	78,0 – 81,5
4	70,5 – 74,5
5	64 – 69
7	54 – 59
10	46 – 50
20	26 – 30
40	9 – 12
80	0 – 0,5

Abbildung 4.1-99: Größenverteilung von A2 aus der DIN EN 779

Größenverteilung Teststaub A2 (Arizona dust fine)

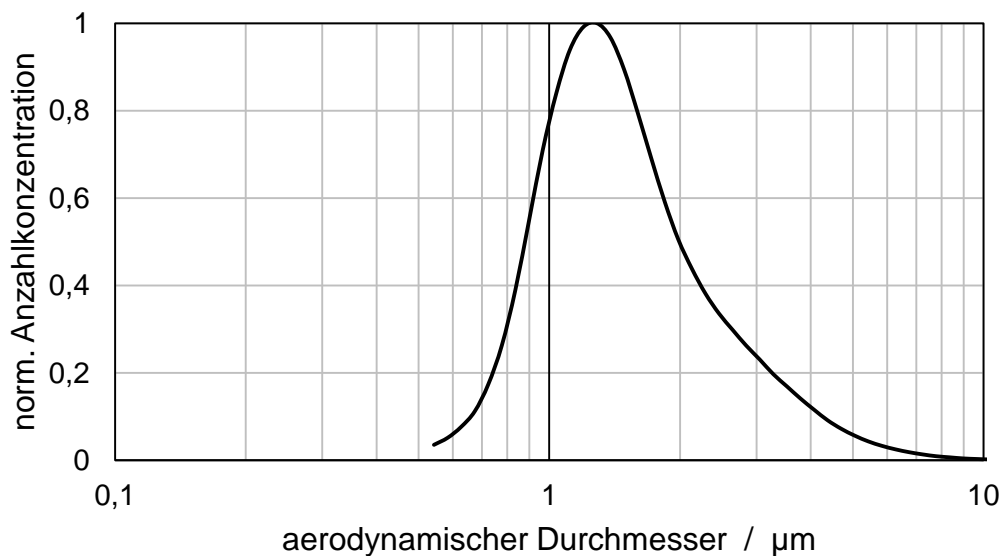


Abbildung 4.1-100: Größenverteilung Teststaub A2

Um den Filtermedienprüfstand (FMP) nicht mit dem Teststaub zu kontaminieren, wurden die Beladungen an einem zweiten Filterhalter realisiert. Dieser weist eine durchströmbare Fläche auf, die 10 % größer ist als die Prüffilteraufnahme des FMP. Durch diesen Größenunterschied konnte sichergestellt werden, dass bei zentriertem Wiedereinbau der Filtermedien in den FMP nach Beladung die mit Prüfaerosol durchströmte Fläche komplett mit Teststaub beladen war. Die stufenweise Beladung einer Filterrunde nach DIN EN 779 war so allerdings nicht durchführbar, da bei einem erneuten Einbau in den Beladungs-Filterhalter nicht sichergestellt werden konnte,

dass exakt dieselbe Fläche weiter beladen wurde. Daher wurden für das zweite Beladungsstadium neue Filterrunden verwendet, die direkt mit 50 g/m^3 Teststaub beaufschlagt wurden. Aufgrund des minimalen Grundrauschens (Vgl. Kapitel 4.1.2), respektive der geringen Abweichung der Effizienz der Medien im Neuzustand, können die Daten der beladenen Medien dennoch verlässlich verglichen werden.

In Abbildung 4.1-101 ist die Beladungskurve eines F7-Mediums als Druckverlust über der zudosierten bzw. abgeschiedenen A2-Staubmasse dargestellt. Die abgeschiedene Masse wurde durch gravimetrische Analyse bestimmt, während die zudosierte Masse über die eingestellte Vorschubgeschwindigkeit des RBGs und der Staubmasse im Kolben berechnet werden kann.

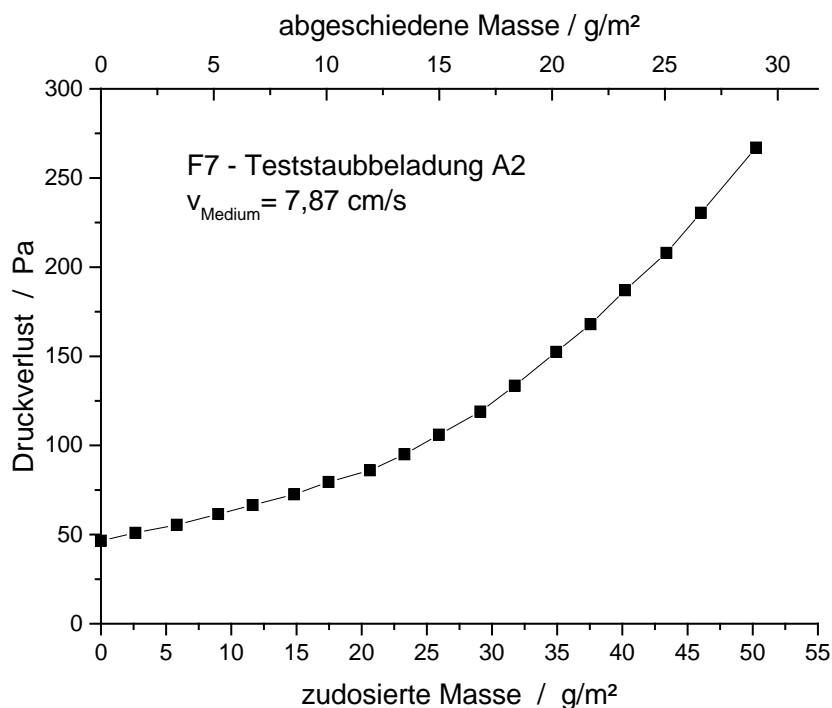


Abbildung 4.1-101: Beladungskurve F7-Synthetikmedium A

Am Ende dieses Beladungsversuches wurden insgesamt 57,8 % der aufgebrachten Staubmasse durch das Filtermedium abgeschieden. Der Druckverlust stieg dabei von seinem Anfangsniveau im Neuzustand auf mehr als das Fünffache an.

Abbildung 4.1-102 zeigt die Beladungskurven des F7- Synthetikmedium A. Pro Beladungsstadium wurden jeweils drei Ronden vermessen. Dabei symbolisieren die vollen Quadrate die Beladungskurven mit 25 g A2 pro m^2 Filterfläche und die leeren Quadrate jene mit 50 g/m^2 .

Ersichtlich ist, dass bei Beginn der Beladung alle Medien bei der angegebenen Anströmgeschwindigkeit von $7,87 \text{ cm/s}$ einen Druckverlust von $46 \pm 3 \text{ Pa}$ aufweisen.

Bei dem ersten Beladungsschritt mit bis zu 25 g/m^3 ergibt sich ein linearer Verlauf der Druckverlustkurve, was auf überwiegende Tiefenfiltration schließen lässt. Werden die Filterrunden bis 50 g/m^3 weiter beladen, geht der lineare Verlauf in einen kubischen Anstieg über. Erklärbar ist dieser Übergang durch die an die Tiefenfiltration anschließende Ausbildung eines Filterkuchens auf der Filterrunde.

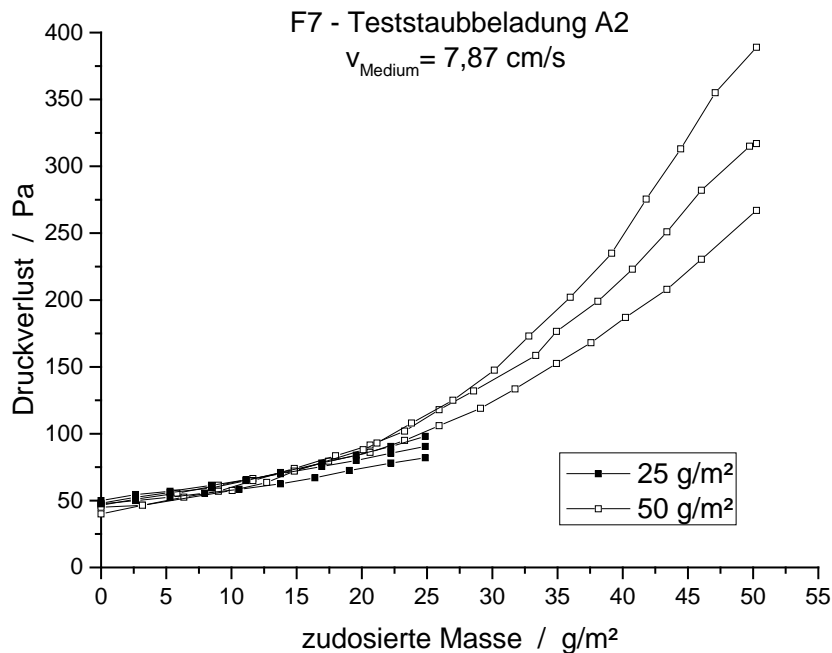


Abbildung 4.1-102: Druckverlustanstieg Medienbeladung F7- Synthetikmedium A

Die Abbildung 4.1-103 und Abbildung 4.1-104 zeigen exemplarisch Filterrunden der jeweiligen Beladungsstufen. Bei der ersten Runde mit einer Beladung von 25 g/m^2 ist das abgeschiedene A2 nur schwer ersichtlich. Man erkennt am äußeren Rand eine etwa 1 cm breite unbeladene Filterfläche, die etwas heller erscheint, als die cremeweiße A2-Schicht.

In Abbildung 4.1-104 ist der Farbunterschied etwas deutlicher. Hier lässt sich der ausgebildete Filterkuchen nach einer Beladung von 50 g/m^2 besser erkennen.

Anschließend an die Beladung mit A2-Teststaub wurden die Filterrunden erneut auf ihre Effizienz bei der Abscheidung von Nanopartikeln getestet. Dabei wurde die gleiche Anströmgeschwindigkeit wie bei den Beladungsschritten von $7,87 \text{ cm/s}$ gewählt. Bereitgestellt wurden die Nanopartikel im Bereich von 5 bis 40 nm durch einen Funkengenerator mit Silberelektroden (ausgefüllte Quadrate), die Partikelgrößen zwischen 50 bis 130 nm durch einen Zerstäuber mit 1% DEHS in Isopropanol (ungefüllte Quadrate).



Abbildung 4.1-103: Filterrunde nach Beladungsstufe 1 – 25 g/m²



Abbildung 4.1-104: Filterrunde nach Beladungsstufe 2 – 50 g/m²

Abbildung 4.1-105 zeigt die Retention der F7- Synthetikmedien A im Neuzustand und in den jeweiligen Beladungsschritten. Für die Verläufe wurden jeweils drei Ronden vermessen und der Mittelwert gebildet.

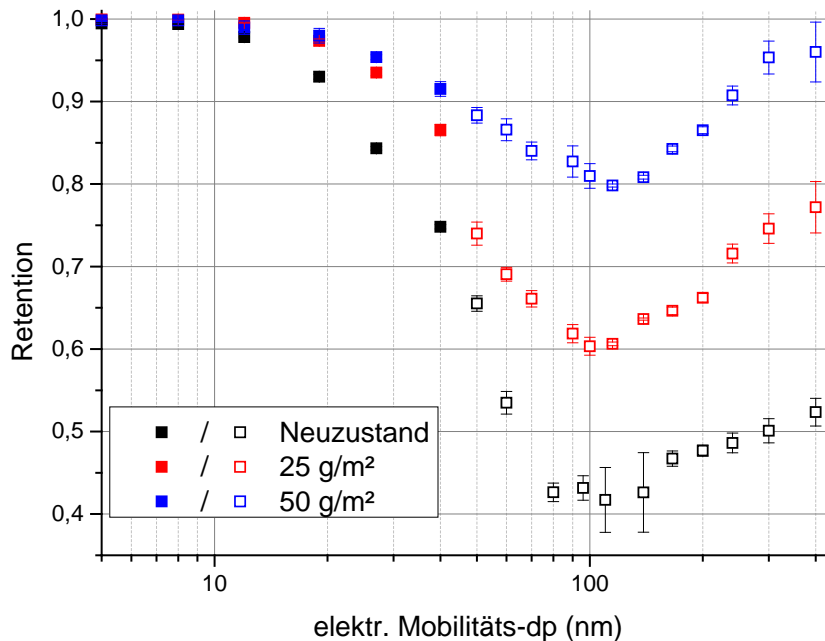


Abbildung 4.1-105: Retention nach Beladung F7- Synthetikmedium A

Hier wird deutlich, dass die beladenen Medien einen signifikant besseren Fraktionsabscheidegrad zeigen als die Medien im Neuzustand. Dieses Phänomen kann mit der Ausbildung eines Filterkuchens durch das zudosierte A2 erklärt werden, wodurch sich eine verbesserte Retention durch bereits abgeschiedene Partikel ergibt. Da vor allem die Abscheidung von Nanopartikeln untersucht werden soll, zeigt die Abbildung 4.1-106 den Bereich von Null bis 40 nm vergrößert dargestellt.

Unterhalb von 10 nm sind hier nur geringe Unterschiede der Fraktionsabscheidegrade für verschiedene Beladungszustände erkennbar. Bei einer Größe von 12 nm liegen die Retentionen der beladenen Medien in der Streuung der jeweiligen Messwerte. Allerdings ist schon bei diesem Wert erkennbar, dass die Filterronden mit A2-Beladung höhere Retentionswerte erreichen als die Ronden im Neuzustand. Ab einer Partikelgröße von 19 nm sind die Unterschiede zwischen den beladenen Medien deutlich erkennbar.

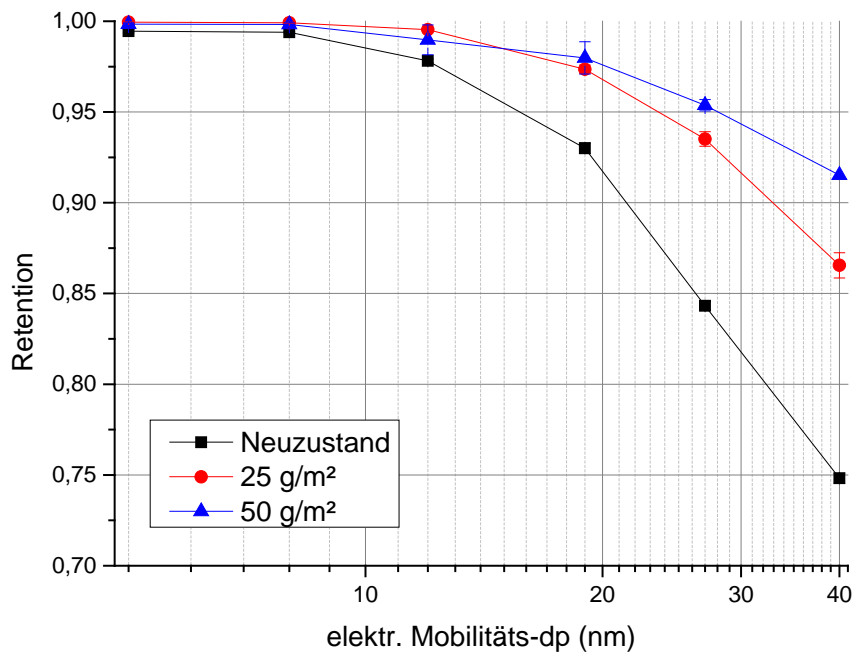


Abbildung 4.1-106: Retention nach Beladung im Nanometerbereich F7- Synthetikmedium A

Nachfolgend sind die Druckverlustkurven für ein F7- Synthetikmedium B dargestellt. Zu beachten ist die abweichende Anströmgeschwindigkeit des Mediums, die auf die Herstellerangaben zurück zu führen ist.

Auch hier zeigen sich für das erste Beladungsstadium bis 25 g/m³ gradlinige Verläufe und für das zweite Stadium kubische Anstiege. Allerdings sind die Endwerte bei einer zudosierten Masse von 50 g/m³ deutlich niedriger als bei dem anderen F7-Medium. Dies kann durch eine abweichende Abscheideleistung der Medien begründet sein. Da die Filterklassen einen gewissen Retentionsbereich abdecken, können auch Medien der gleichen Klasse Unterschiede in der Retention aufweisen. Zum anderen kann diese Abweichung durch einen inhomogen gestopften Zylinder hervorgerufen werden, wodurch weniger Staub aufgebracht wurde als die Berechnung ergab. Auch die unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten sind zu beachten.

Die Abbildung 4.1-108 und die Abbildung 4.1-109 zeigen die Fraktionsabscheidegrade der Filterrunden einmal im Bereich bis 150 nm und anschließend vergrößert bis 40 nm. Diese Messreihen wurden ebenfalls bei einer Anströmgeschwindigkeit von 6,17 cm/s durchgeführt.

Zu erkennen ist, dass dieses Medium schlechtere Fraktionsabscheidegradkurven aufweist als das andere F7-Medium. In allen drei Beladungsstadien liegt der Most-Penetrating-Particle-Size (MPPS) bei geringeren Werten im Vergleich zur Abbildung

4.1-105 bzw. Abbildung 4.1-106.

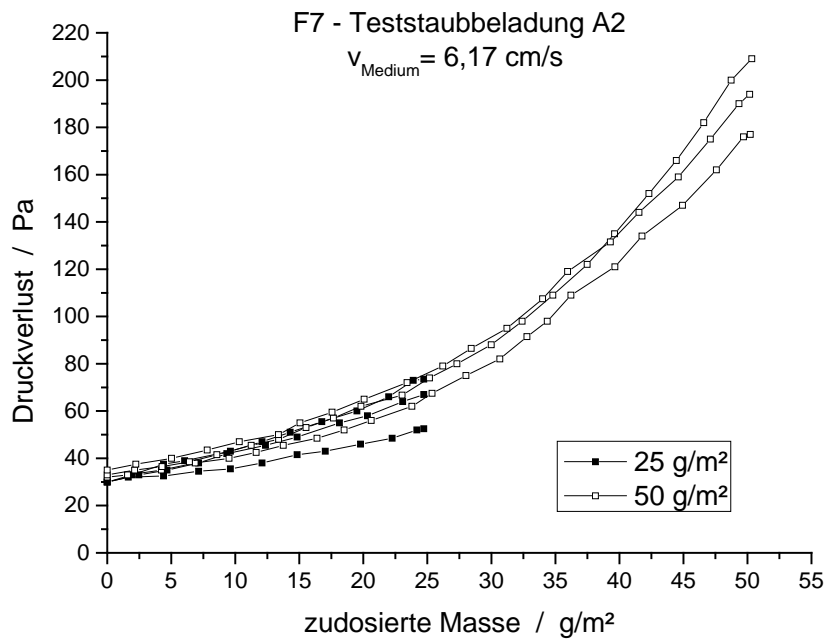


Abbildung 4.1-107: Druckverlustanstieg Medienbeladung F7- Synthetikmedium B

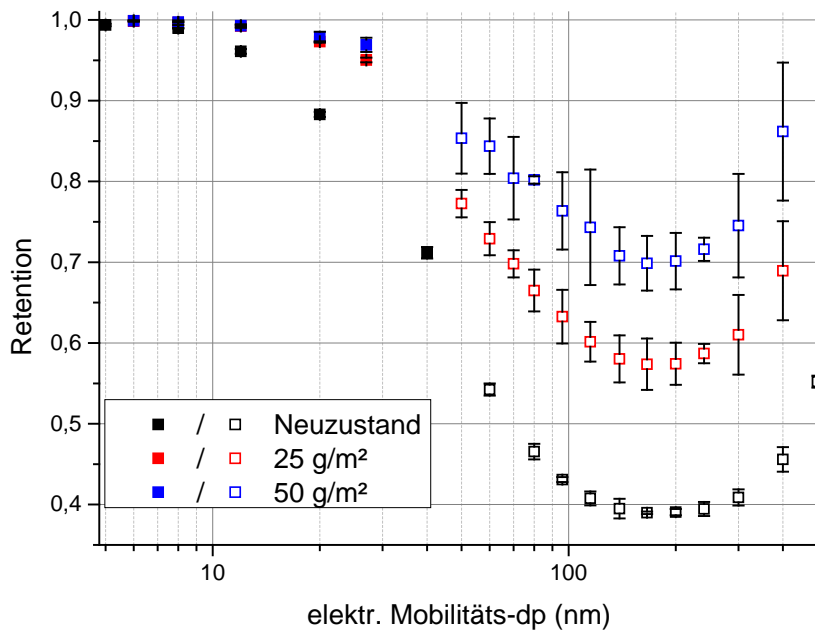


Abbildung 4.1-108: Retention nach Beladung F7- Synthetikmedium B

Bei der vergrößerten Darstellung des Größenbereichs bis 40 nm fällt auf, dass für kleine Partikel nur der Verlauf der Ronden im Neuzustand schlechter ist als bei dem anderen Medium. Die Fraktionsabscheidegrade der beladenen Medien liegen für kleine Partikel tendenziell leicht zu höheren Werten hin verschoben.

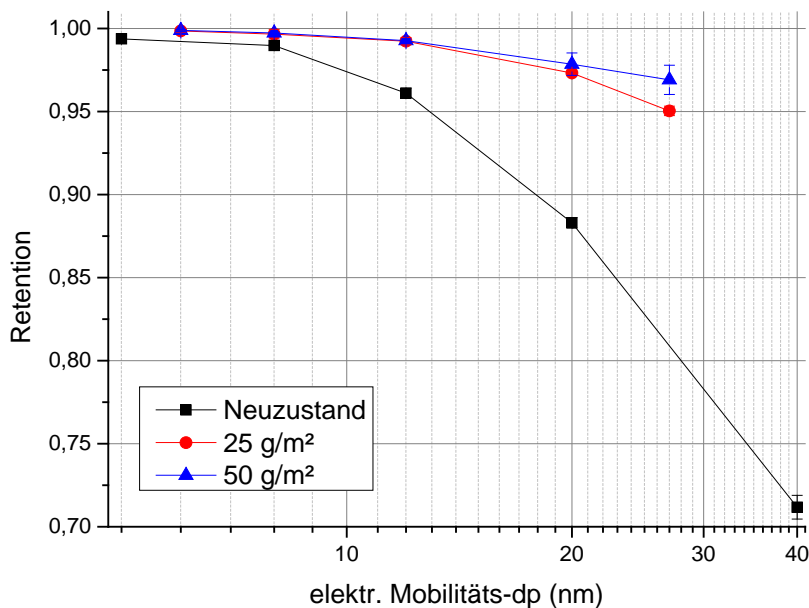


Abbildung 4.1-109: Retention nach Beladung im Nanometerbereich F7- Synthetikmedium B

Neben den gezeigten Ergebnissen der Teststaubbeladungen für F7-Medien wurden zusätzlich 3 Runden eines F9-Mediums mit dem Teststaub A2 beladen und der Fraktionsabscheidegrad gemessen. Es wurden die gleichen Beladungsstadien mit 25 g/m² und 50 g/m² gewählt, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Die Anströmgeschwindigkeit ergab sich aus der Herstellerangabe und betrug 6,56 cm/s.

In der Abbildung 4.1-110 ist der Differenzdruckanstieg mit zunehmender Beladung ersichtlich. Alle Medien hatten bei Beladungsbeginn einen Differenzdruck von 80 ± 2 Pa. Durch die erste Stufe der Beladung von 25 g/m² ergab sich ein Druckverlust von 203 ± 14 Pa. Der Verlauf dieser Medien ist durch die schwarz gefüllten Quadrate gekennzeichnet. In demselben Diagramm sind die Druckverluste der zweiten Beladungsstufe (50 g/m²) durch die leeren Quadrate gekennzeichnet. Es zeigt sich eine gute Vergleichbarkeit der Druckverlustanstiege der beiden Beladungsstufen zueinander.

Die Abweichungen der Differenzdruckverläufe, speziell in der zweiten Beladungsstufe sind ebenfalls durch inhomogen gestopfte Teststaubzylinder und abweichende Abscheidegüte der unterschiedlichen Runden zu erklären. Im Mittel ist der Enddruckverlust der zweiten Beladungsstufe bei 353 ± 44 Pa. Nach der erfolgten Beladung wurden die Medien im Filtermedienprüfstand auf ihre Retention hin untersucht. Dies wurde bei der gleichen Anströmgeschwindigkeit von 6,56 cm/s wie bei der Beladung durchgeführt. Gemessen wurden die Retentionswerte mittels SMPS-System (Scanning-Mobility-Particle-Sizer).

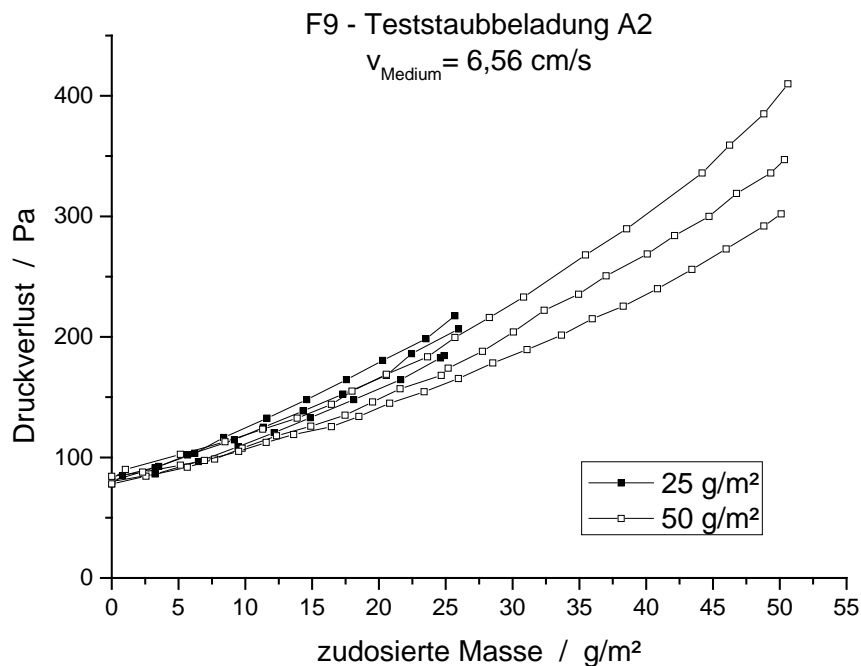


Abbildung 4.1-110: Differenzdruckanstieg F9-Medienbeladung

In Abbildung 4.1-111 ist für den Neuzustand und die beiden Beladungsstufen die Retention über dem elektrischen Mobilitätsdurchmesser aufgetragen. Die Untersuchung in dem Partikelgrößenbereich des MPPS ist mit verdünntem DEHS in Isopropanol (1 Vol.-%) als Testpartikel erfolgt. Die Abscheidegrade im Nanometerbereich wurden mit bereitgestellten Kupferpartikel aus einem Funkengenerator gemessen.

Die in schwarz dargestellte Abscheidegradkurve spiegelt den Mittelwert der Messungen des Mediums in Neuzustand wider. Es ist ersichtlich, dass das Medium, gemessen an der Vorgabe der DIN EN 779, seine Filterklasse bei der vom Hersteller angegebenen Filtrationsgeschwindigkeit nicht ganz erfüllt. Hierzu müsste der Fraktionsabscheidegrad bei 400 nm bei mindestens 75 % liegen. Jedoch handelt es sich um eine sehr geringe Abweichung, die von Wirrfasern und Schwankungen innerhalb der vermessenen Ronden hervorgerufen sein kann. Die Mittelwerte der Medien mit den Teststaubbeladungen 25 g/m² (rot) und 50 g/m² (blau) zeigen einen deutlich erhöhten Abscheidegrad, der sukzessive mit der Beladung zunimmt.

In Abbildung 4.1-112 ist der Größenbereich für die Retention der Nanopartikel vergrößert dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass eine höhere Beladung zu einer verbesserten Abscheidung der Nanopartikel führt, die jedoch unterhalb von etwa 7 nm nur noch schwer differenzierbar ist. Auffällig ist, dass die Retentionswerte der beiden Beladungsstadien stets näher beieinanderliegen als zum Neuzustand. Dies

zeigt sich ebenso bei den Fraktionsabscheidegradkurven der beiden F7-Medien (Vgl. Abbildung 4.1-106 und Abbildung 4.1-109).

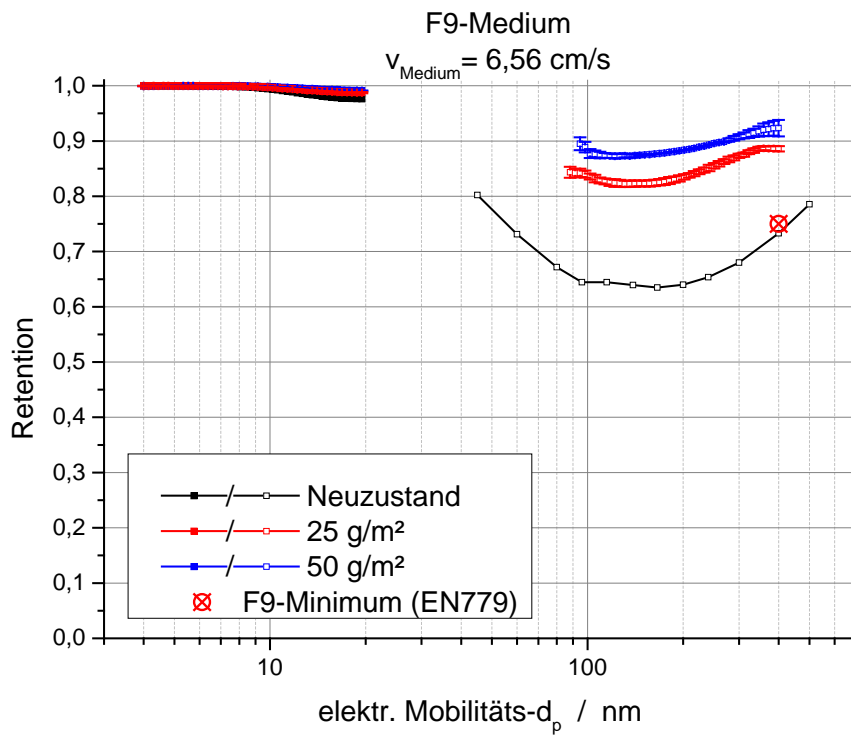


Abbildung 4.1-111: Retention F9-Medien nach Beladung

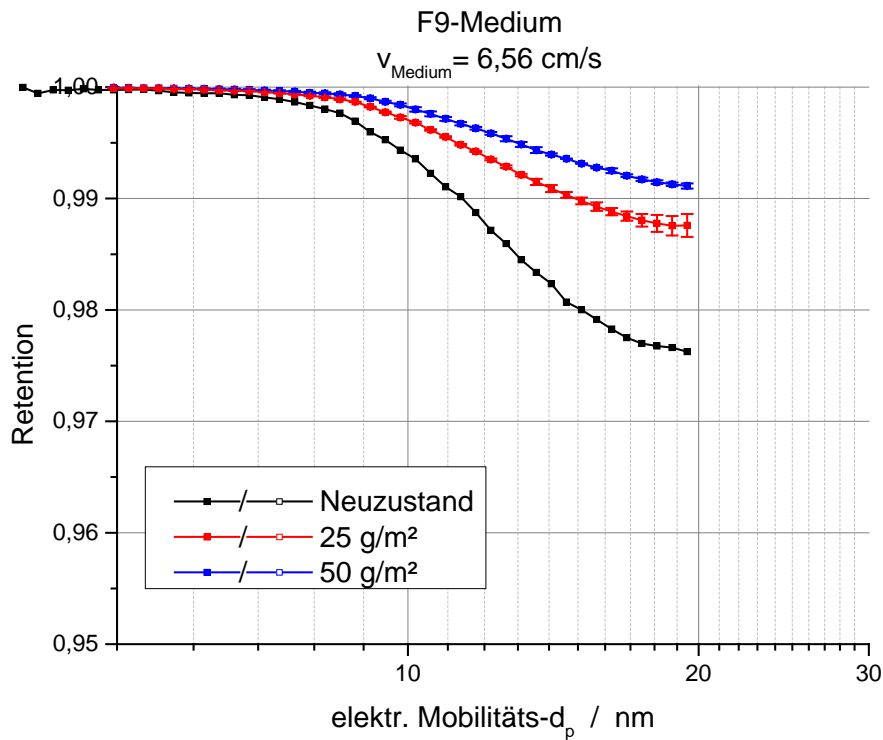


Abbildung 4.1-112: Retention F9-Medien nach Beladung im Nanometerbereich

Zwischenfazit: Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass für alle drei untersuchten Medien die Retentionswerte nach vorheriger Beladung mit dem Teststaub A2 signifikant besser werden. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass der abgeschiedene Staub einen Filterkuchen ausbildet und so die Oberfläche vergrößert, an der sich die Silber- und DEHS-Partikel abscheiden können.

4.2 Abscheidung von Nanopartikeln an Filtermedien mit Nanofaser-Anteil

Durch moderne Technik, wie beispielsweise Elektrosponnen, bei dem Fasern aus einer Polymerlösung durch die Behandlung in einem elektrischen Feld gewonnen werden, ist es möglich, Nanofasern mit Durchmessern von 50 bis einigen hundert Nanometern zu erzeugen.

In diesem Kapitel werden die Untersuchungen an Nanofaserfiltern vorgestellt, bei denen die sonstigen Fasern im Mikrometerbereich mit Nanofasern durchsetzt sind. Bei einer Integration in das Tiefenfiltermedium werden die Nanofasern in die Hohlräume der übrigen Fasern eingearbeitet. Dadurch können gleichartig gute Effizienzen bei geringeren Gesamtpackungsdichten und damit geringeren Druckverlusten erzielt werden. Die Messungen dienen der Quantifizierung der Verbesserungen des Abscheidegrades. Die daraus gewonnenen Ergebnisse bilden die Basis für die Anpassung eines bestehenden Modells in Arbeitspaket 7.

Bei einer weiteren Variante von Nanofaserfiltern ist eine zusätzliche Nanofaserschicht auf ein bestehendes Filtervlies aufgebracht. Hier erfolgt eine erhöhte Abscheidung in und auf dieser Schicht bei gleichzeitig erhöhtem Druckverlust. Inwiefern sich die Abscheidung unterscheidet, je nachdem, ob die Schicht anströmseitig oder im Sinne eines progressiven Aufbaus abströmseitig angeordnet ist, soll im Rahmen dieses Arbeitspaketes experimentell untersucht werden.

Nanofasern, ob als Schichten oder integriert in die Hohlräume konventioneller Filterfasern, werden hauptsächlich in den Feinstaubklassen F5 - F9 eingesetzt. Für dieses Arbeitspaket wurden Druckverlust und Fraktionsabscheidegrade an Medien unterschiedlichster Filterklassen durchgeführt. Diese Medien wurden durch Aufnahmen mit dem Rasterelektronen-Mikroskop (REM) charakterisiert. Mit Hilfe der Ergebnisse wurden Faserdurchmesserverteilungen für jedes Medium erstellt. Anschließend wurden die Retentionen gegenüber Nanopartikeln (Funkengenerator mit Silber- und Kupfer-Elektroden) und im MPPS-Bereich (Atomizer mit DEHS) untersucht sowie der Druckverlust dokumentiert. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für die Modellierung in Arbeitspaket 7.

4.2.1 Untersuchung von Filtermedien mit integrierten Nanofasern

Um einzuordnen, ob und in welchem Ausmaß Nanofasern die Retention beeinflussen, werden in diesem Unterkapitel zunächst Messreihen vorgestellt, bei denen Nanofasern in die Hohlräume des Mediums integriert sind. Im nächsten Unterkapitel wird dann auf Nanofasern im Sinne einer zusätzlichen Schicht eingegangen.

- **Einfluss des Chargenunterschiedes bei Filtermedien mit integrierten Nanofasern**

Unterschiede der Filtermaterialien verschiedener Chargen, die sich auf den Druckverlust auswirken, können bis zu $\pm 10\%$ betragen. Auch die Retentionswerte weisen starke Schwankungen durch Wirrfasern auf, welches Einzelfasern oder Faserbündel sind, die im Gegensatz zu den übrigen Fasern nicht in eine Richtung orientiert sind, sondern in wirrer Streulage vorliegen. In diesem Abschnitt wird eine kurze Untersuchung beschrieben, wie groß diese Streuung bei verschiedenen Chargen von Materialien mit Nanofasern ist. Dazu wurden Messungen von jeweils drei Filterrunden zweier unterschiedlicher Chargen durchgeführt und miteinander verglichen. Die Anströmgeschwindigkeit betrug dabei 3 cm/s. Bei dem untersuchten Medium handelt es sich um ein E12-Glasfasermedium mit einem progressiven Aufbau von Nanofasern auf der Anströmseite, die über die Mediendicke von ca. 800 μm hin zur Abströmseite abnehmen. Die Rohdaten des Mediums, sowohl an- als auch abströmseitig, können Tabelle 4.2-1 entnommen werden, und die Faserverteilung zeigt Abbildung 4.2-1.

Tabelle 4.2-1 Mediendaten - integrierte Nanofasern Medium A

	Anströmseite	Abströmseite
Fasermaterial	Glasfaser	Glasfaser
Faserdicke – Mittelwert	416 nm	8598 nm
Faserdicke – Mittelabweichung	299 nm	2311 nm
Faserdicke – prozentuale Abw.	71,7 %	26,9 %
Anzahl untersuchter Fasern	189	250
Mediendicke	800 μm	
Druckverlust (Mediengeschw.)	179 Pa (3 cm/s)	

Erkennbar ist, dass die Anströmseite hauptsächlich Fasern im Bereich zwischen 0,1

und 1 μm und die Abströmseite zwischen 6 und 10 μm aufweisen.

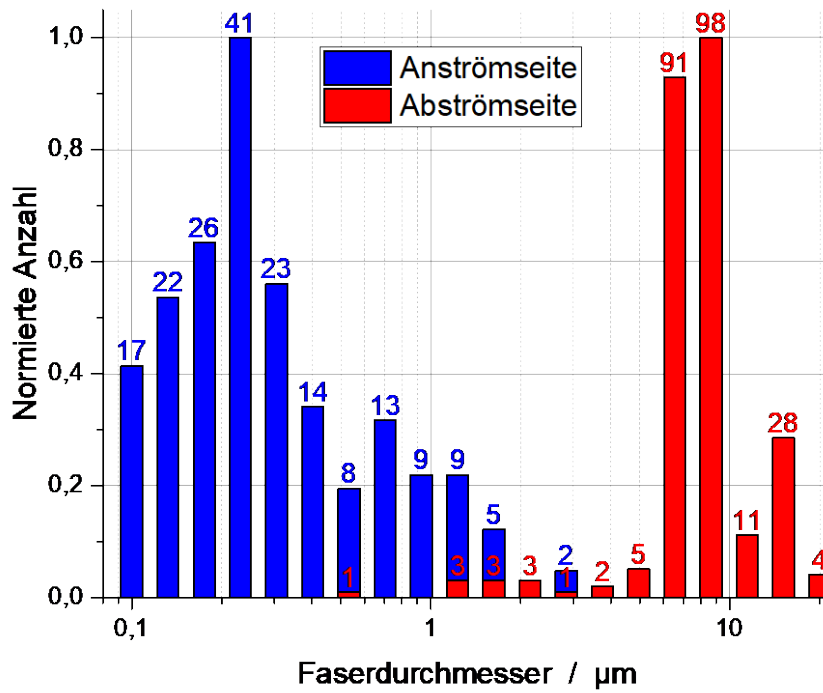


Abbildung 4.2-1: Faserdurchmesserverteilung - integrierte Nanofasern Medium A

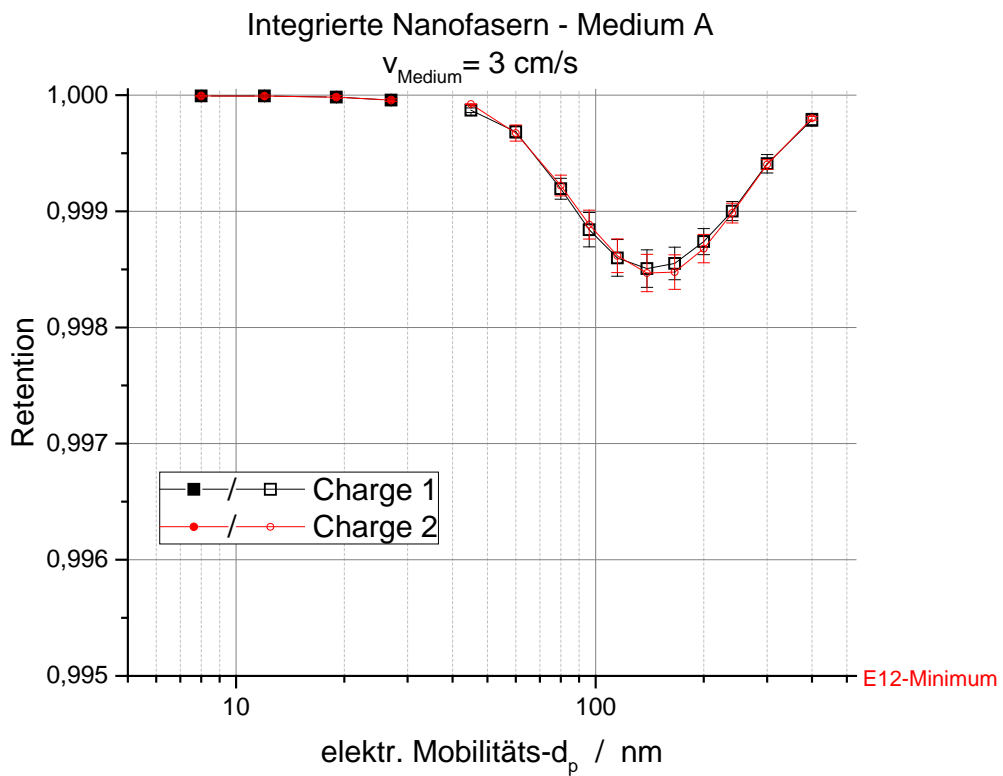


Abbildung 4.2-2: FAG - integrierte Nanofasern Medium A

Abbildung 4.2-2 stellt die Retentionskurven für zwei unterschiedliche Chargen dieses Materials gegenüber. Dabei wurden die Partikel der ausgefüllten Messwerte mittels Kupferelektroden in einem Funkengenerator und die der unausgefüllten mit verdünntem DEHS aus einem Zerstäuber bereitgestellt.

Die Unterschiede zwischen den zwei Chargen liegen in Abbildung 4.2-2 im Bereich der Standardabweichung der verschiedenen Ronden ein- und derselben Charge. Es kann von einer über mehrere Chargen reproduzierbaren Faserverteilung ausgegangen werden. Im Folgenden werden REM-Aufnahmen der An- und Abströmseite sowie des Querschnitts des Mediums gezeigt.

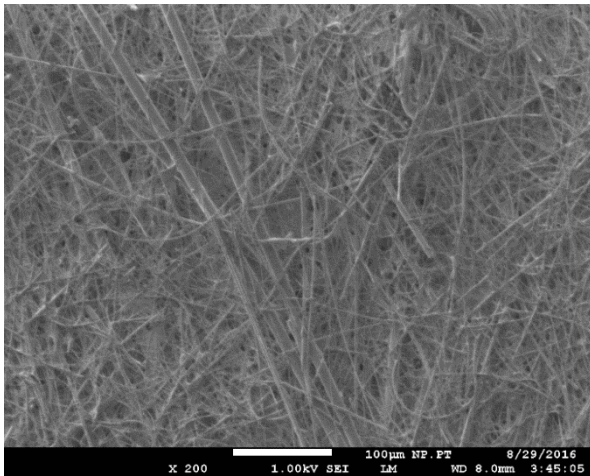


Abbildung 4.2-3: Medium A – Anströmseite bei 200facher Vergrößerung

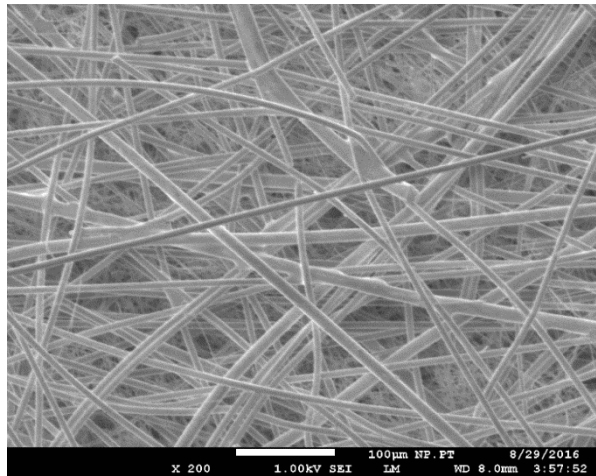


Abbildung 4.2-4: Medium A – Abströmseite bei 200facher Vergrößerung

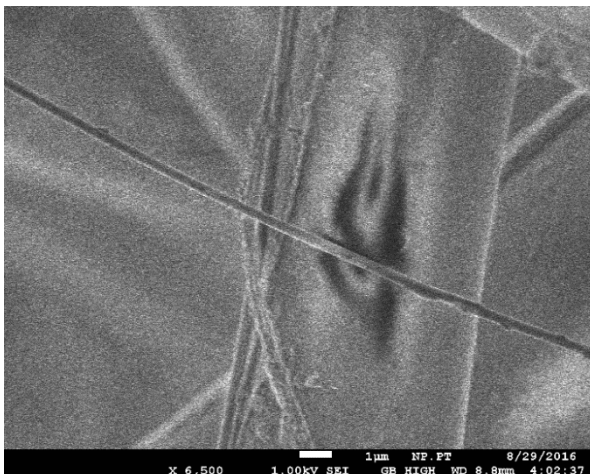


Abbildung 4.2-5: Medium A – Anströmseite bei 6.500facher Vergrößerung

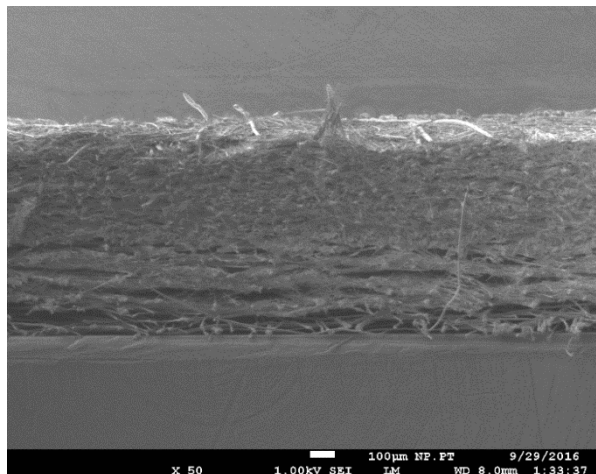


Abbildung 4.2-6: Medium A – Querschnitt bei 50facher Vergrößerung

Anströmseitig sind vereinzelt Nanofasern erkennbar (Abbildung 4.2-3), die bei Vergrößerung noch deutlicher zu sehen sind. Auf der Abströmseite, Abbildung 4.2-4,

zeigen sich keine Nanofasern. Der progressive Aufbau lässt sich vor allem in Abbildung 4.2-6 gut erkennen, wobei die Anströmseite (oben im Bild) eine deutlich höhere Packungsdichte mit Nanofasern aufweist als die Abströmseite, bei der die Hohlräume zwischen den Fasern nicht gefüllt sind.

- **Einfluss der Anströmgeschwindigkeit bei Filtermedien mit integrierten Nanofasern**

In diesem Unterkapitel werden Vergleichsmessungen vorgestellt, die an ein- und demselben Medium vorgenommen wurden, um den Einfluss der Anströmgeschwindigkeit zu ermitteln. Bei diesem Medium sind die Nanofasern in die Hohlräume der übrigen Fasern integriert und nicht als eigenständige Schicht aufgebracht. Die Messungen wurden mit zwei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten mit Silbernanopartikeln und verdünntem DEHS durchgeführt. Tabelle 4.2-2 zeigt die Daten dieses Mediums.

Tabelle 4.2-2 Mediendaten - integrierte Nanofasern Medium B

	Anströmseite	Abströmseite
Faserdicke – Mittelwert	1880 nm	2760 nm
Faserdicke – Mittelabweichung	1045 nm	2849 nm
Faserdicke – prozentuale Abw.	55,6 %	103,3 %
Anzahl untersuchter Fasern	205	223
Mediendicke	700 µm	
Druckverlust (Mediengeschw.)	24 Pa (2 cm/s) 68 Pa (5 cm/s)	

Der Faserverteilung (Abbildung 4.2-7) lässt sich entnehmen, dass die Nanofasern gleichmäßig gut im Filtermedium verteilt vorliegen. Sowohl An- als auch Abströmseite zeigen einen Durchmesserbereich der Fasern zwischen 0,2 und 9 µm mit einem Peak bei ungefähr 1 µm. Abbildung 4.2-8 zeigt die Retentionsverläufe des Mediums. Die Werte der ausgefüllten Symbole wurden mit Silbernanopartikeln und die der nicht ausgefüllten mit verdünntem DEHS gemessen. Bei einer Geschwindigkeit von 2 cm/s erfüllt das Medium eine andere Filterklasse als bei 5 cm/s. Des Weiteren besteht eine gute Übereinstimmung der Kurvenverläufe bei der höheren Geschwindigkeit zwischen den zwei verschiedenen Testaerosolen. Und auch die MPPS-Lage verschiebt sich bei 5 cm/s nicht.

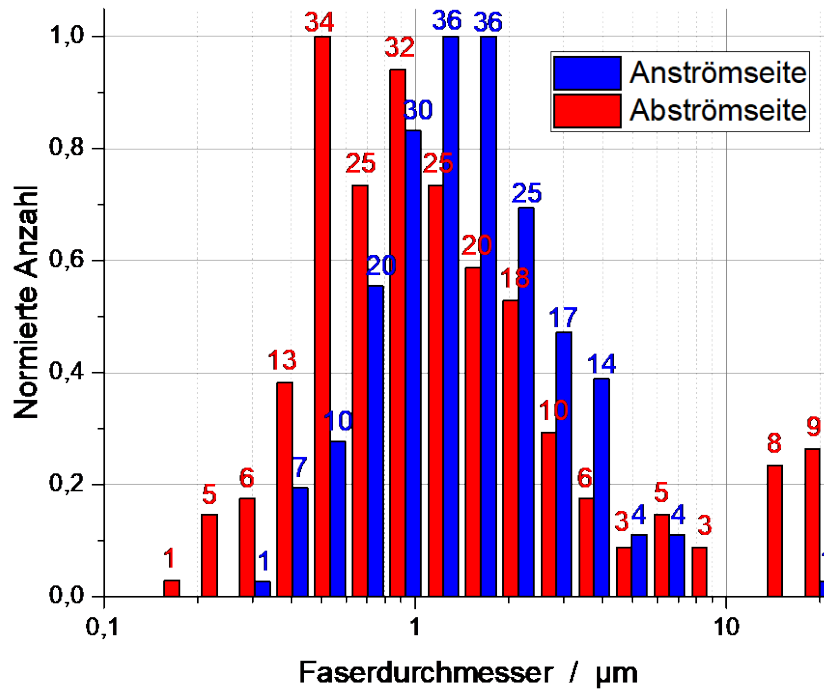


Abbildung 4.2-7: Faserdurchmesserverteilung - integrierte Nanofasern Medium B

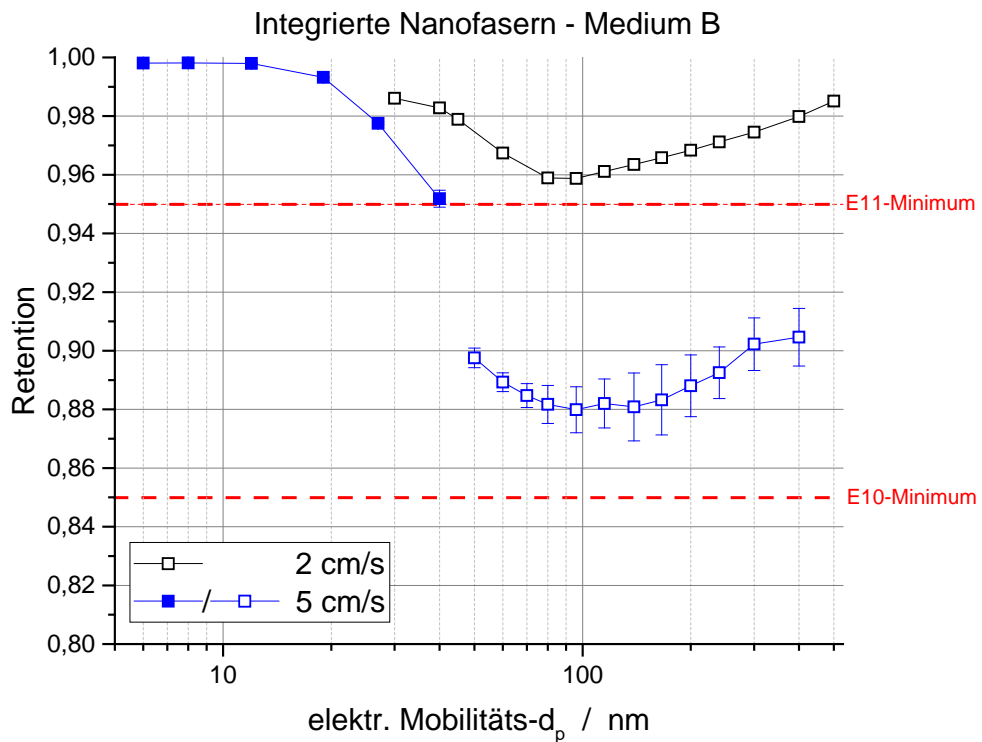


Abbildung 4.2-8: FAG - integrierte Nanofasern Medium B

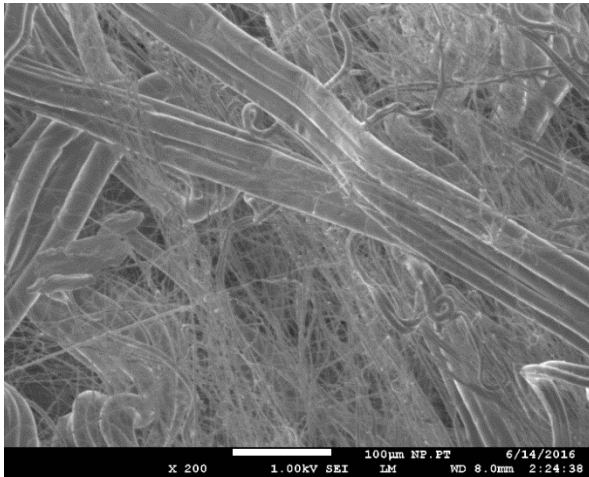


Abbildung 4.2-9: Medium B – Anströmseite bei 200facher Vergrößerung

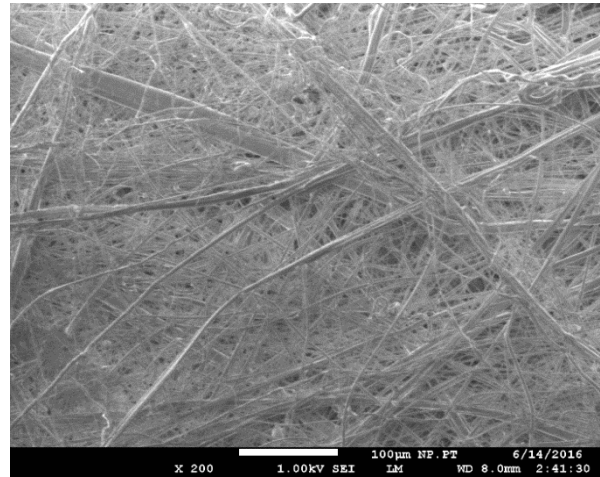


Abbildung 4.2-10: Medium B – Abströmseite bei 200facher Vergrößerung

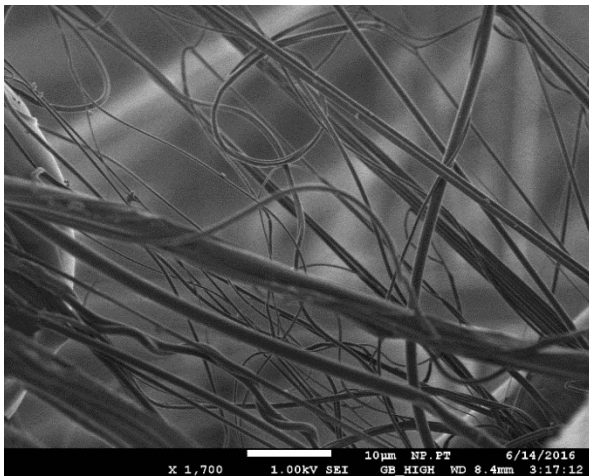


Abbildung 4.2-11: Medium B – Nanofasern bei 1.700facher Vergrößerung

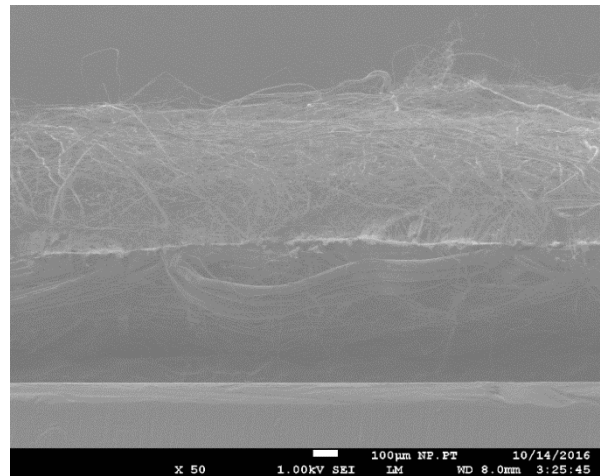


Abbildung 4.2-12: Medium B – Querschnitt bei 50facher Vergrößerung

Auf den REM-Aufnahmen (Abbildung 4.2-9 - Abbildung 4.2-12) sind die Nanofasern auf beiden Seiten des Mediums gut sichtbar. Vor allem bei der Vergrößerung in Abbildung 4.2-11 sind die feinen Nanofasern deutlich zu sehen. Bei der Aufnahme des Querschnittes scheint das Medium aus zwei Schichten zu bestehen, wobei abströmseitig einige sehr große Fasern von fast 100 µm vorliegen. Diese sind in der abströmseitigen Faserverteilung durch einen leicht erhöhten Faseranteil im zweistelligen Mikrometerbereich zu erahnen.

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass die Anströmgeschwindigkeit auf Medien mit Nanofasern scheinbar keinen auffallend anderen Einfluss hat als auf andere Medien. Bei höheren Geschwindigkeiten wird der Theorie entsprechend die Retention etwas schlechter, allerdings verschiebt sich die MPPS-Lage zumindest bei diesem Medium nicht zu kleineren Partikelgrößen.

- **Untersuchung einer einzelnen Nanofaserschicht**

Dieses Kapitel beschreibt die Untersuchung einer einzelnen Nanofaserschicht. Dazu wurde ein mehrschichtiges Medium so präpariert, dass die Schicht der Nanofasern von dem Stützvlies getrennt wurde und separat vermessen werden konnte. Die Messreihen geben Aufschluss darüber, welchen Beitrag die eigentlichen Nanofasern am Gesamtabscheidegrad haben, und dienen als Grundlage für die Modellierung in Arbeitspaket 7.

Tabelle 4.2-3 und Abbildung 4.2-13 geben über die Daten der Nanofaserschicht und die Faserverteilung Auskunft.

Tabelle 4.2-3 Mediendaten – Nanofaserschicht Medium C

	Anströmseite	Abströmseite
Fasermaterial	PVDF	PVDF
Faserdicke – Mittelwert	77 nm	80 nm
Faserdicke – Mittelabweichung	27 nm	19 nm
Faserdicke – prozentuale Abw.	34,7 %	23,7 %
Anzahl untersuchter Fasern	322	131
Mediendicke	ca. 7 bis 20 μm	
Druckverlust (Mediengeschw.)	288 Pa (2 cm/s)	

Die Schicht besteht aus Polyvinylidenfluorid-Fasern, die durch Elektrospinning hergestellt wurden. Laut Herstellerangabe haben die Faserdurchmesser einen Mittelwert von 250 nm mit einer Abweichung von $\pm 40\%$.

Wie aus Abbildung 4.2-13 hervorgeht, sind die Nanofasern in der Schicht homogen verteilt und haben zum Großteil Durchmesser von um die 70 nm. Welchen Fraktionsabscheidegrad die Schicht aufweist, kann Abbildung 4.2-14 entnommen werden.

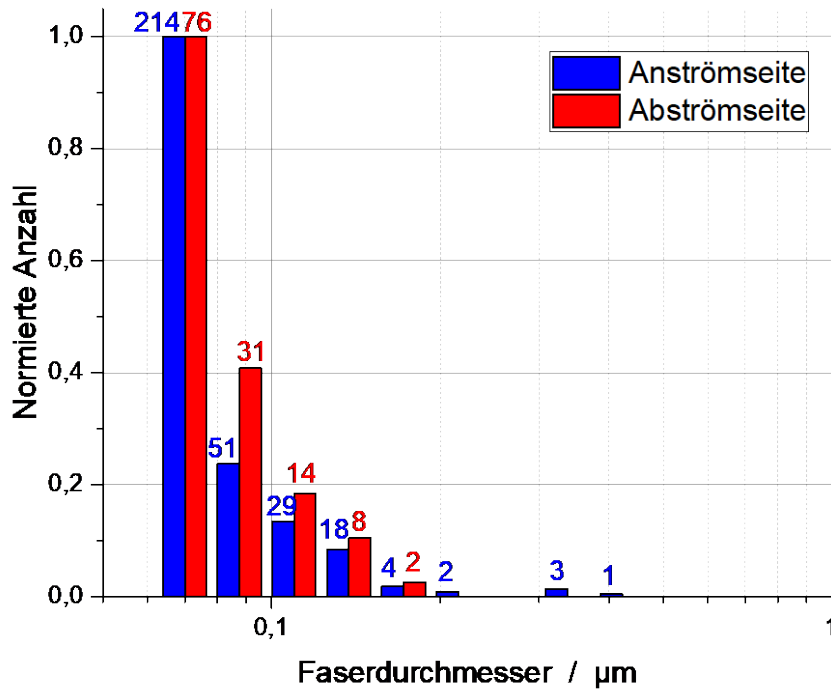


Abbildung 4.2-13: Faserdurchmesserverteilung – Nanofaserschicht Medium C

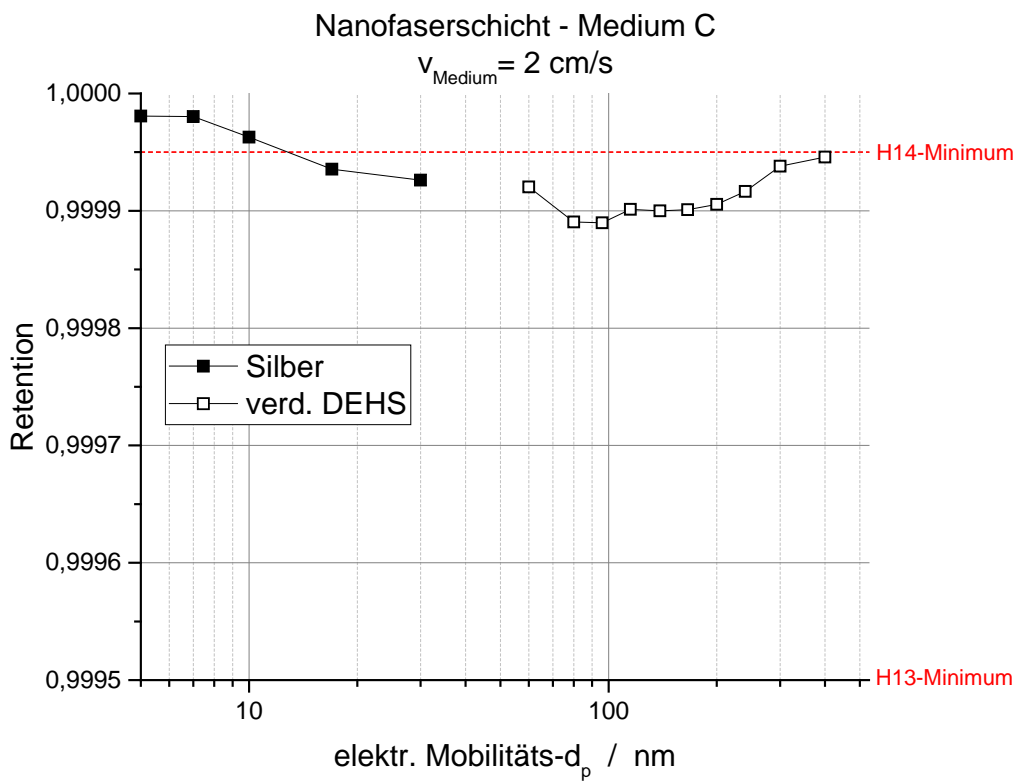


Abbildung 4.2-14: FAG – Nanofaserschicht Medium C

Die Nanofaser-Schicht hat einen sehr hohen Fraktionsabscheidegrad über den gesamten vermessenen Durchmesserbereich. Wie auch in den REM-Aufnahmen (Abbildung 4.2-15 - Abbildung 4.2-18) zu sehen ist, bildet die Nanofaser-Schicht ein dichtes Netz, ähnlich einer Membran-Schicht aus. Das Stützvlies, auf das die Schicht normalerweise aufgebracht ist, dient scheinbar nur der Stabilität und wurde deswegen hier nicht weiter untersucht, da die Nanofaserschicht ausschlaggebend für die Gesamtretention zu sein scheint.

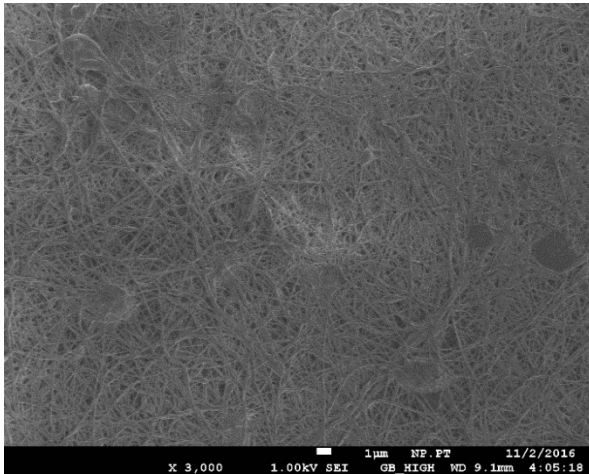


Abbildung 4.2-15: Medium C – Anströmseite bei 3.000facher Vergrößerung

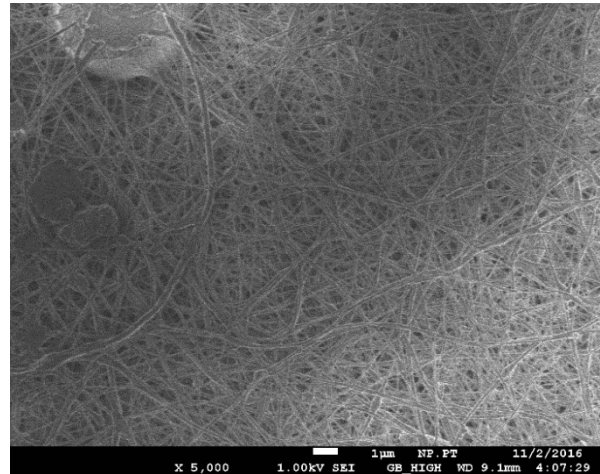


Abbildung 4.2-16: Medium C – Abströmseite bei 5.000facher Vergrößerung

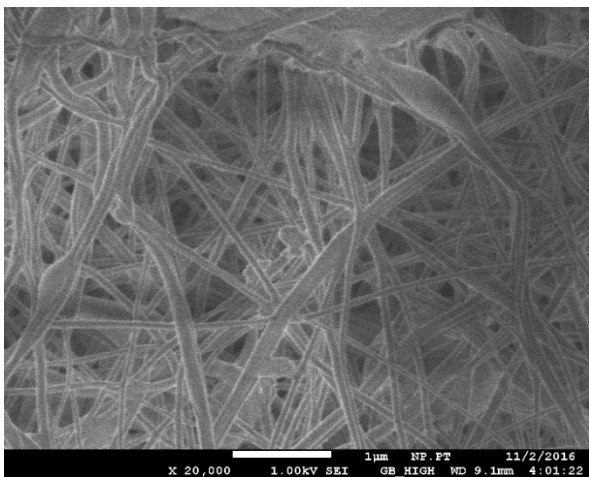


Abbildung 4.2-17: Medium C - Nanofasern bei 20.000facher Vergrößerung

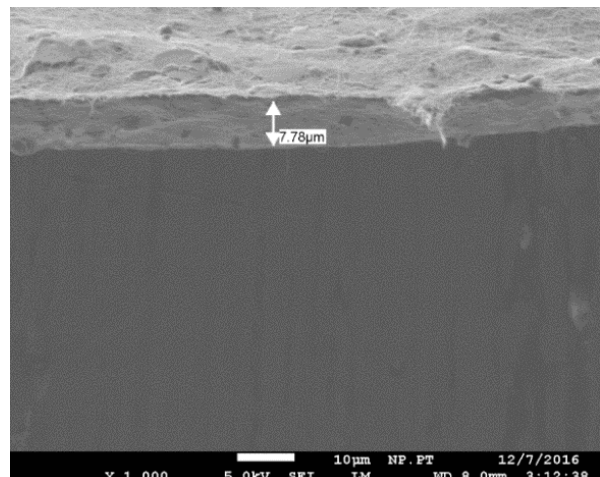


Abbildung 4.2-18: Medium C - Querschnitt bei 1.000facher Vergrößerung

4.2.2 Untersuchung von Filtermedien mit anströmseitigen Nanofasern

In diesem Unterkapitel werden die Messreihen an Filtermedien beschrieben, bei denen die Schichten mit Nanofasern auf der Anströmseite aufgebracht wurden. Im nächsten Unterkapitel wird darauf eingegangen, wie sich die Fraktionsabscheidegrade ändern, wenn die Nanofaserschicht abströmseitig vorliegt. Die Daten des zuerst untersuchten Mediums zeigt die Tabelle 4.2-4. Dieses Medium ist mit Abstand das dickste Medium der hier untersuchten. Die anderen haben eine Dicke von um die 300 µm, mit einer weiteren Ausnahme von 490 µm.

Tabelle 4.2-4 Mediendaten – Anströmseitige Nanofasern Medium D

	Anströmseite	Abströmseite
Faserdicke – Mittelwert	832 nm	19282 nm
Faserdicke – Mittelabweichung	1272 nm	4333 nm
Faserdicke – prozentuale Abw.	152,9 %	22,5 %
Anzahl untersuchter Fasern	137	41
Mediendicke	ca. 700 µm	
Druckverlust (Mediengeschw.)	39 Pa (2 cm/s)	

Bei der Faserverteilung in Abbildung 4.2-19 wird ersichtlich, dass die Anströmseite fast ausschließlich Nanofasern im Bereich bis 40 nm aufweist, wohingegen die Abströmseite aus Fasern mit Durchmessern über 10 µm besteht.

Für Kupfernanopartikel und verdünntes DEHS ist die Retention in Abbildung 4.2-20 dargestellt. Im Bereich bis 30 nm liegt diese noch bei über 0,9, erst hin zu größeren Partikeldurchmessern verschlechtert sich der Fraktionsabscheidegrad und erreicht seinen MPFS für um die 100 nm-Partikel bei einem Wert von ungefähr 0,77.

Auf den REM-Aufnahmen erscheint die Nanofaserschicht flächig (Abbildung 4.2-21). Nachdem die Schicht entfernt wurde, werden allerdings die deutlich größeren Stützfaser sichtbar (Abbildung 4.2-22).

Das nächste Medium hat abströmseitig im Mittel nur etwa halb so große Fasern wie das vorherige Medium, die Nanofasern auf der Anströmseite sind dagegen etwas dicker (Vgl. Tabelle 4.2-4).

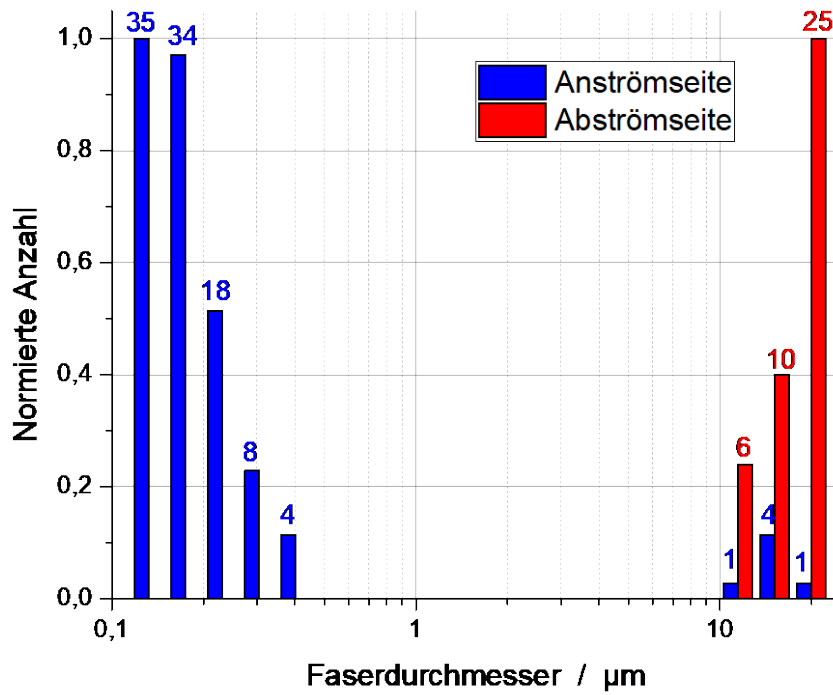


Abbildung 4.2-19: Faserdurchmesserverteilung– Anströmseitige Nanofasern Medium D

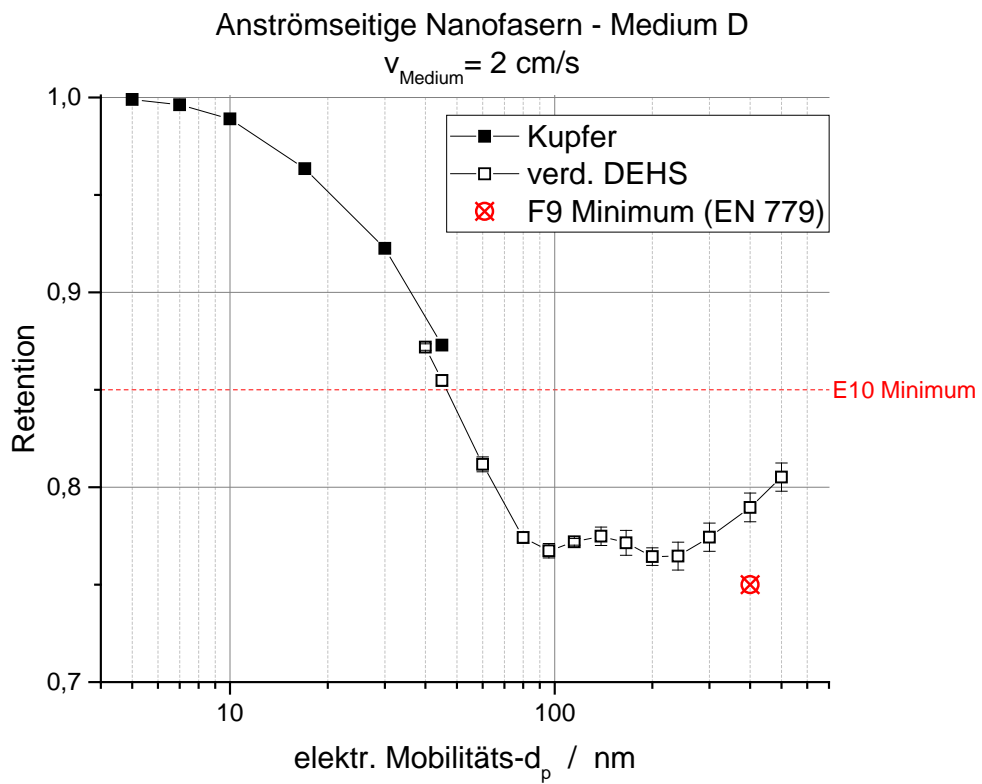


Abbildung 4.2-20: FAG – Anströmseitige Nanofasern Medium D

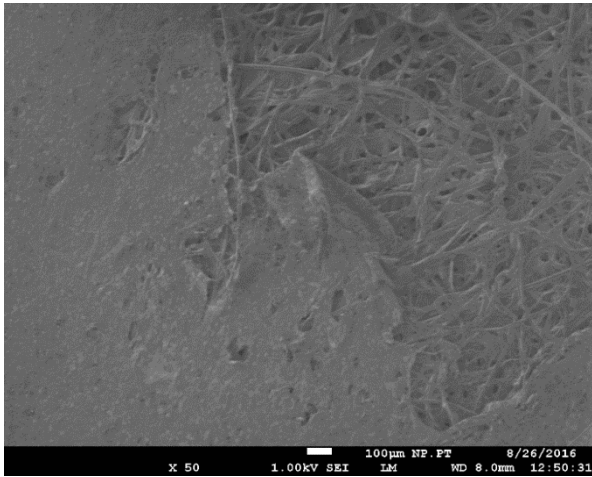


Abbildung 4.2-21: Medium D – Anströmseite bei 50facher Vergrößerung

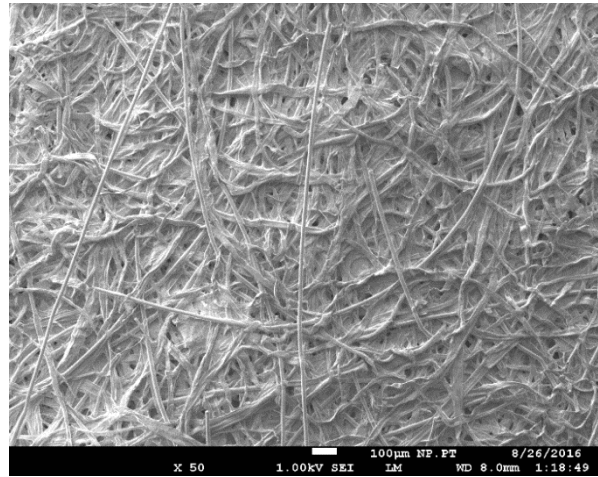


Abbildung 4.2-22: Medium D – Abströmseite bei 50facher Vergrößerung

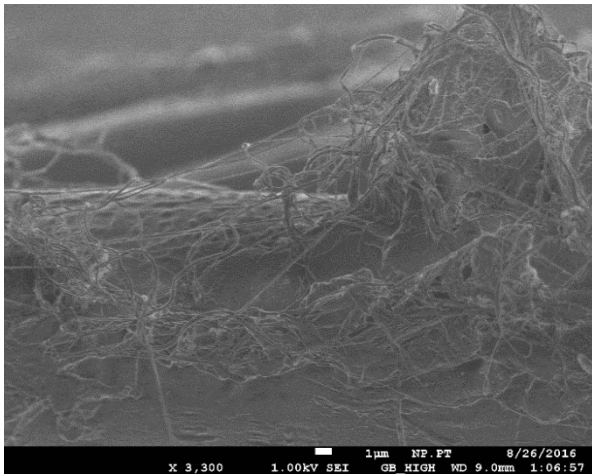


Abbildung 4.2-23: Medium D – Nanofasern bei 3.300facher Vergrößerung

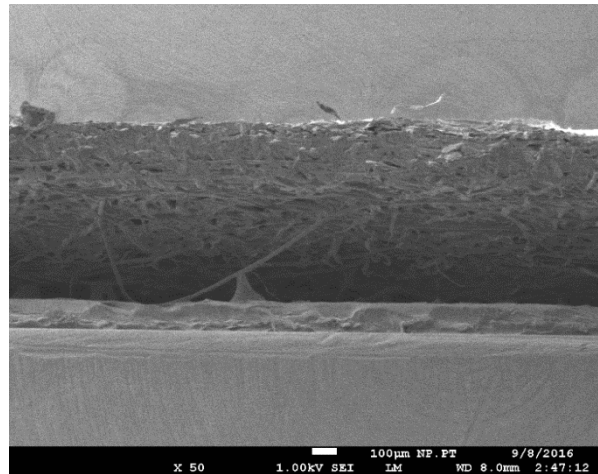


Abbildung 4.2-24: Medium D – Querschnitt bei 50facher Vergrößerung

Tabelle 4.2-5 Mediendaten – Anströmseitige Nanofasern Medium E

	Anströmseite	Abströmseite
Faserdicke – Mittelwert	948 nm	10040 nm
Faserdicke – Mittelabweichung	1320 nm	5394 nm
Faserdicke – prozentuale Abw.	139,3 %	53,7 %
Anzahl untersuchter Fasern	262	75
Mediendicke	ca. 300 µm	
Druckverlust (Mediengeschw.)	38 Pa (2 cm/s)	

An der Faserdistribution (Abbildung 4.2-25) wird ersichtlich, dass sowohl die Nano- als auch die Stützfasern einen deutlich größeren Durchmesserbereich abdecken als beim vorherigen Medium, bei dem die Faserdurchmesser für beide Schichten deutlich schärfer begrenzt waren. Dieses Medium weist sowohl an- als auch abströmseitig die breitesten Verteilungen aller in diesem Kapitel untersuchten Medien auf.

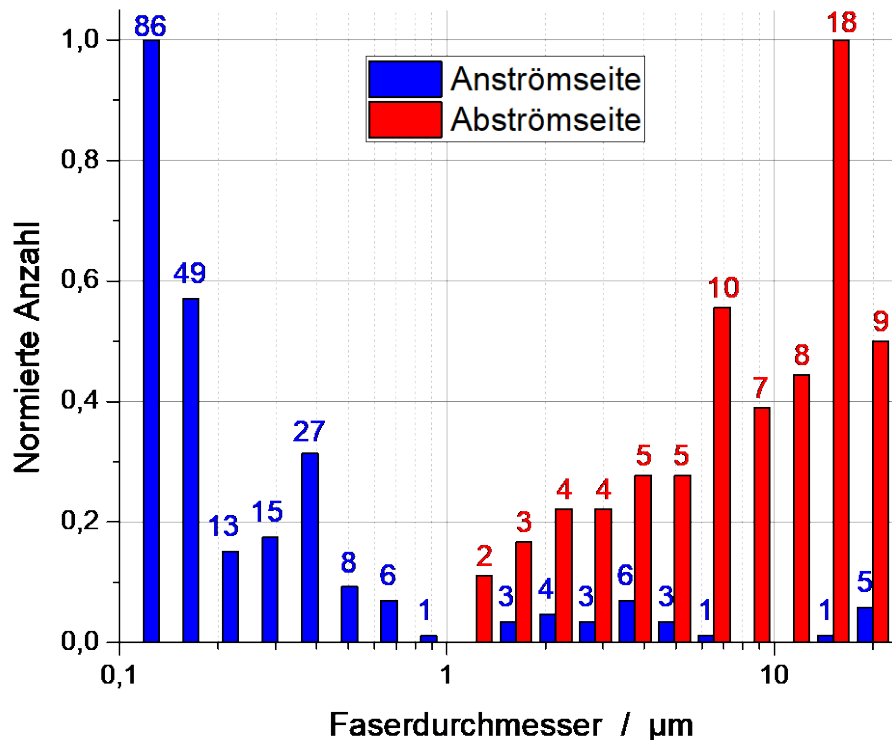


Abbildung 4.2-25: Faserdurchmesserverteilung – Anströmseitige Nanofasern Medium E

Die Retentionskurve (Abbildung 4.2-26) zeigt, dass der Fraktionsabscheidegrad für Partikel ab 20 nm Durchmesser etwas schlechter ist als der des vorherigen Mediums, für kleinere Partikel liegen die Retentionswerte allerdings etwas höher. Dieses Medium zeigt seinen MPPS ebenfalls bei um die 100 bis 110 nm, erreicht dabei aber einen Wert von 0,68. Im Vergleich dazu lag das vorherige Medium bei ungefähr 0,77.

Die folgenden REM-Aufnahmen zeigen ebenfalls Unterschiede auf. Zum einen ist in Abbildung 4.2-27 zu sehen, dass die Nanofaserschicht auf der Anströmseite Lücken von mehreren Mikrometern Größe aufweist, was erklären kann, wieso größere Partikel schlechter abgeschieden werden. Zum anderen zeigen sich in Abbildung 4.2-29 bei weiterer Vergrößerung feine Netze aus Nanofasern, an denen Partikel unter 20 nm scheinbar besser haften. Des Weiteren ist anzumerken, dass dieses Medium deutlich dünner ist als das vorher untersuchte.

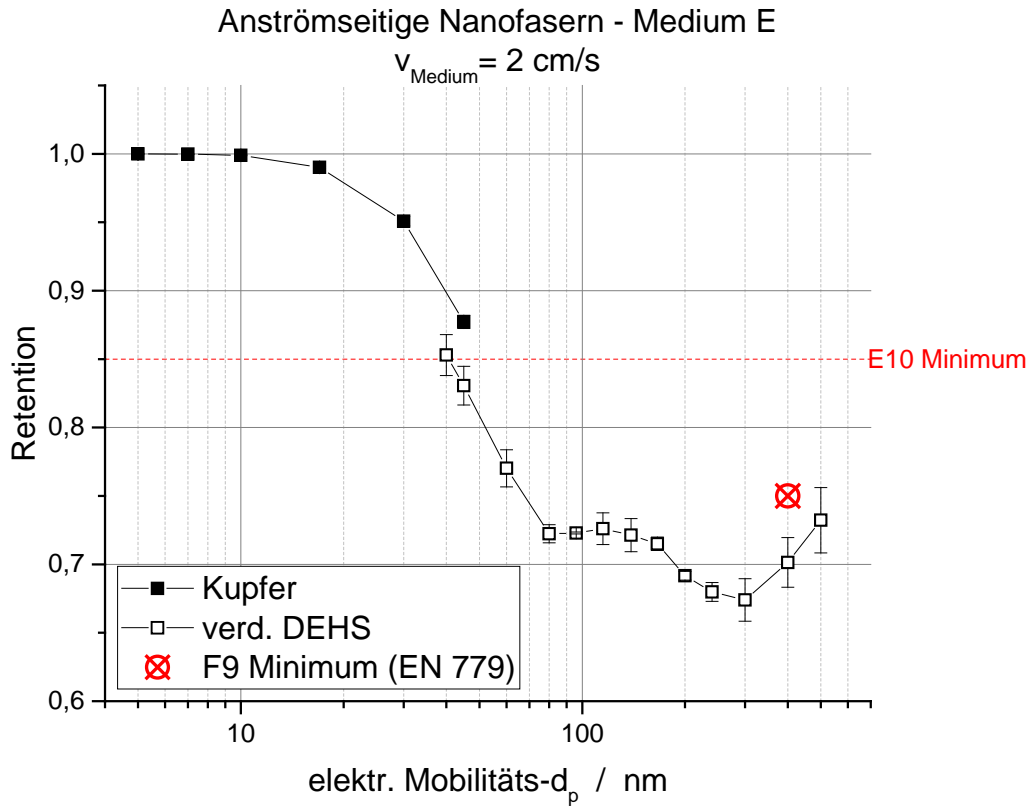


Abbildung 4.2-26: FAG – Anströmseitige Nanofasern Medium E

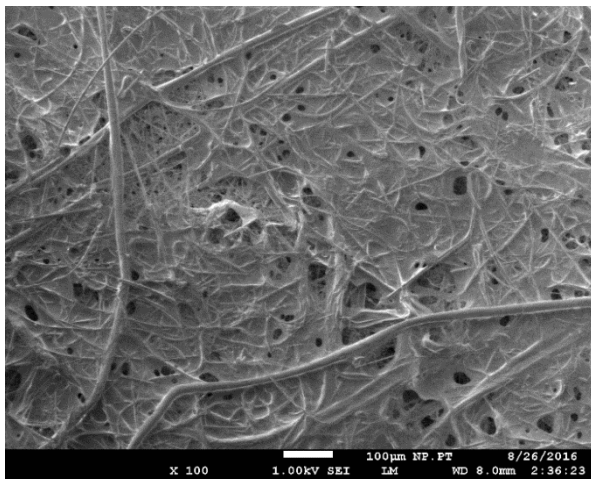


Abbildung 4.2-27: Medium E – Anströmseite bei 100facher Vergrößerung

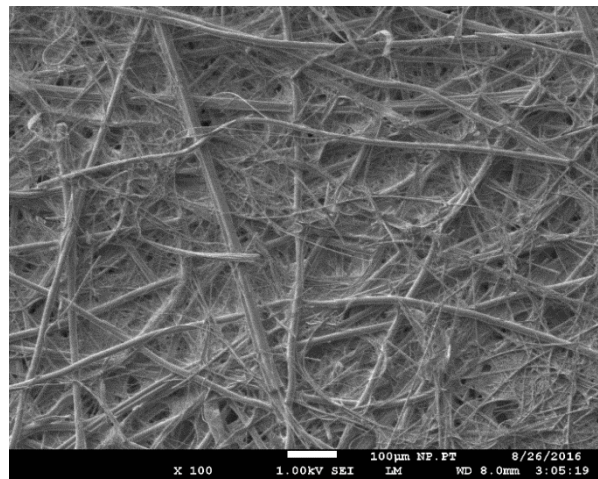


Abbildung 4.2-28: Medium E – Abströmseite bei 100facher Vergrößerung

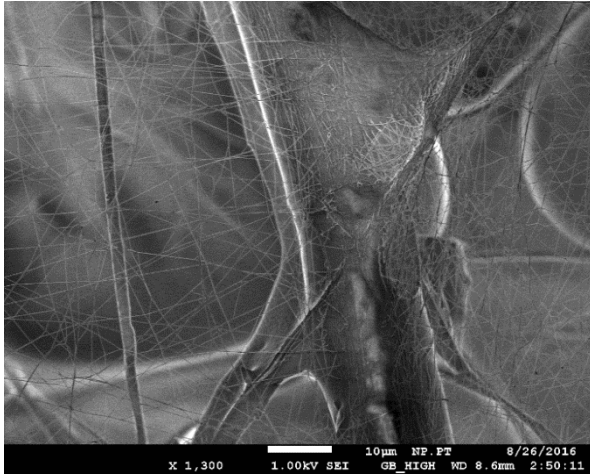


Abbildung 4.2-29: Medium E – Nanofasern bei 1.300facher Vergrößerung

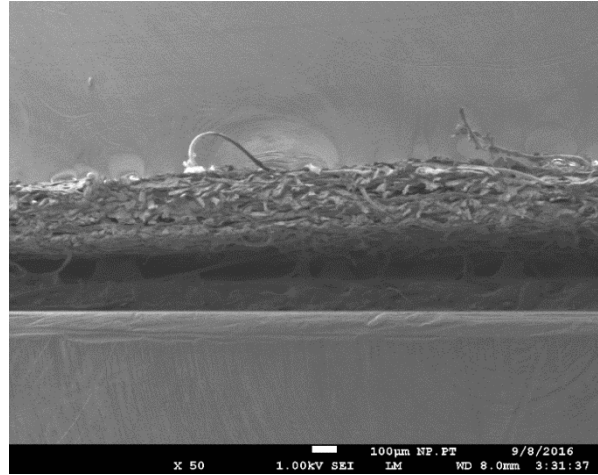


Abbildung 4.2-30: Medium E – Querschnitt bei 50facher Vergrößerung

Tabelle 4.2-6 gibt eine Übersicht über die Daten des nächsten Mediums. Dieses weist von allen die größten Nanofasern auf und ist gleichzeitig das dünnste Medium der hier untersuchten. Die Faserverteilung in Abbildung 4.2-31 zeigt eine ähnlich schmale Verteilung wie beim ersten Medium.

Tabelle 4.2-6 Mediendaten – Anströmseitige Nanofasern Medium F

	Anströmseite	Abströmseite
Faserdicke – Mittelwert	1087 nm	16949 nm
Faserdicke – Mittelabweichung	1746 nm	6454 nm
Faserdicke – prozentuale Abw.	160,6 %	38,1 %
Anzahl untersuchter Fasern	227	60
Mediendicke	ca. 240 µm	
Druckverlust (Mediengeschw.)	39 Pa (2 cm/s)	

Die Retentionskurve des dritten untersuchten Mediums zeigt Abbildung 4.2-32. Diese hat einen sehr ähnlichen Verlauf wie die des ersten Mediums, obwohl dieses nur etwa ein Drittel so dick ist. Auch hier liegt der MPPS im Bereich von 100 bis 110 nm bei einem Wert um die 0,77.

Auf der REM-Aufnahme der Anströmseite (Abbildung 4.2-33) ist die Nanofaserschicht kaum erkennbar, lediglich im Vergleich mit der Vergrößerung in Abbildung 4.2-35 kann man die dicken Kreuzungspunkte der Nanofasern erahnen. Dies resultiert wahrscheinlich aus der geringen Dicke des Mediums und folglich auch

der Nanofaserschicht.

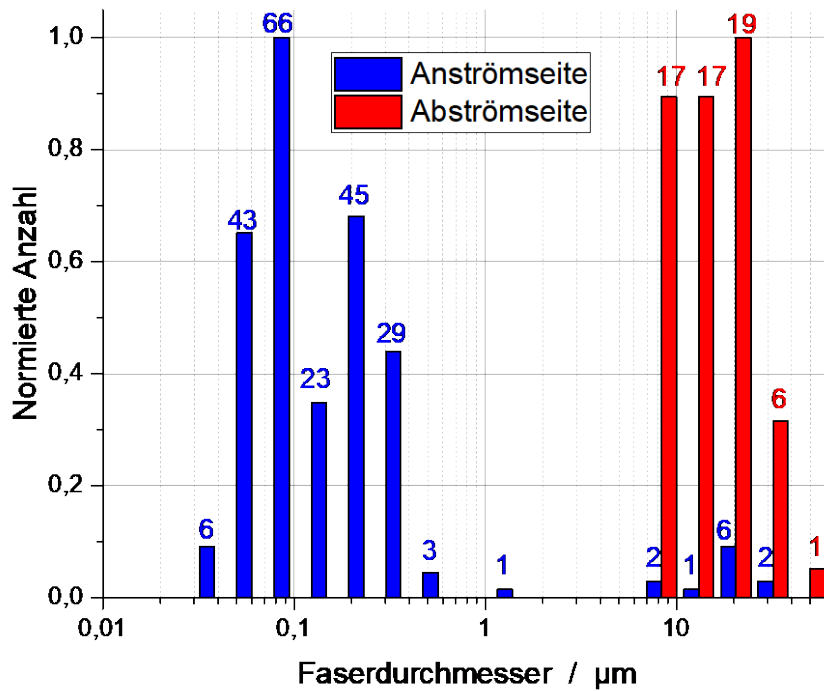


Abbildung 4.2-31: Faserdurchmesserverteilung – Anströmseitige Nanofasern Medium F

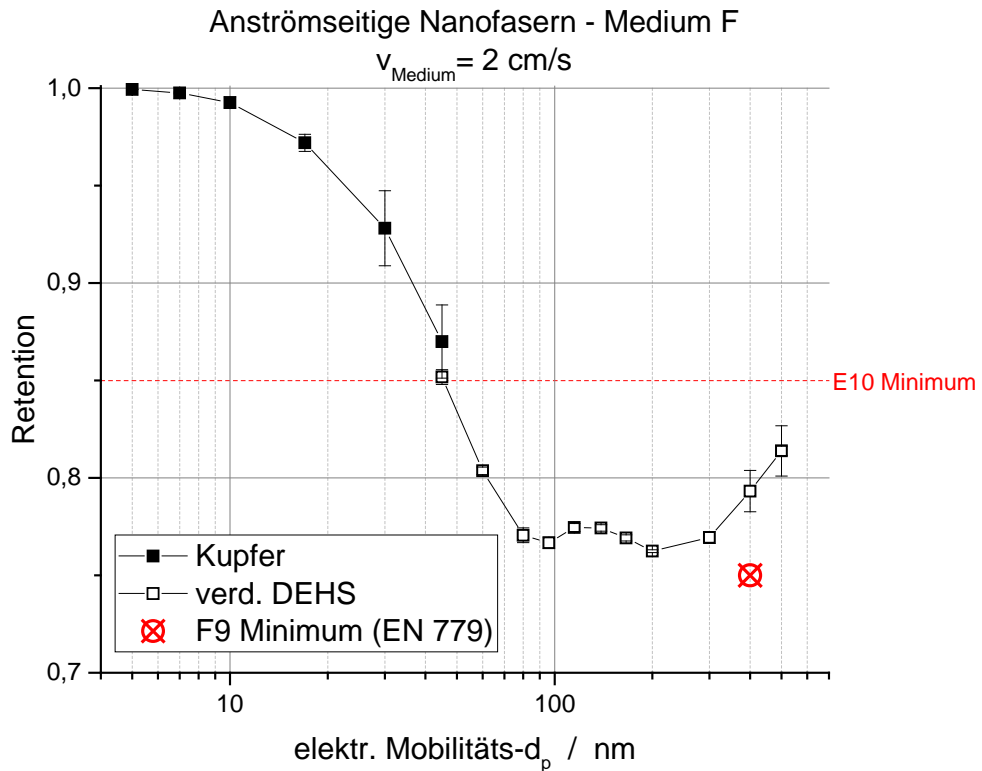


Abbildung 4.2-32: FAG – Anströmseitige Nanofasern Medium F

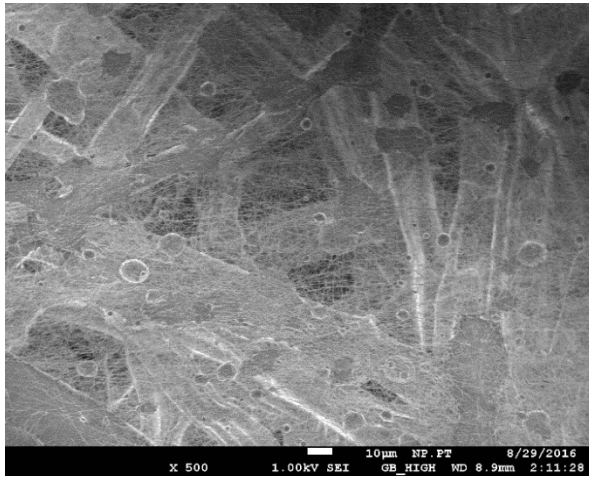


Abbildung 4.2-33: Medium F - Anströmseite bei 500facher Vergrößerung

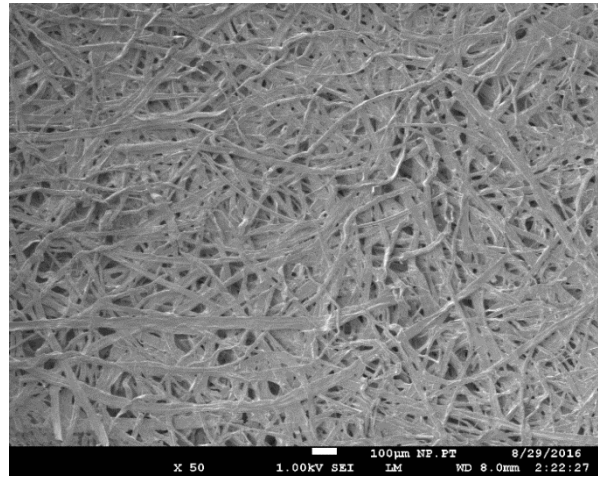


Abbildung 4.2-34: Medium F - Abströmseite bei 50facher Vergrößerung

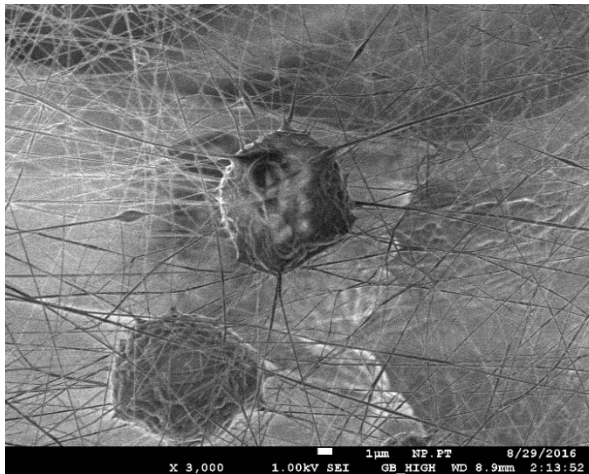


Abbildung 4.2-35: Medium F - Nanofasern bei 3.000facher Vergrößerung

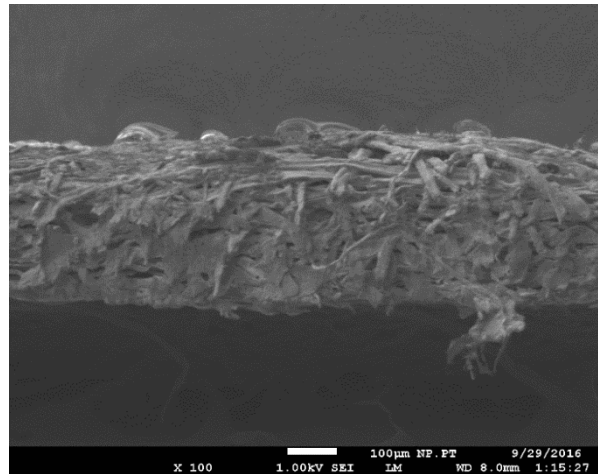


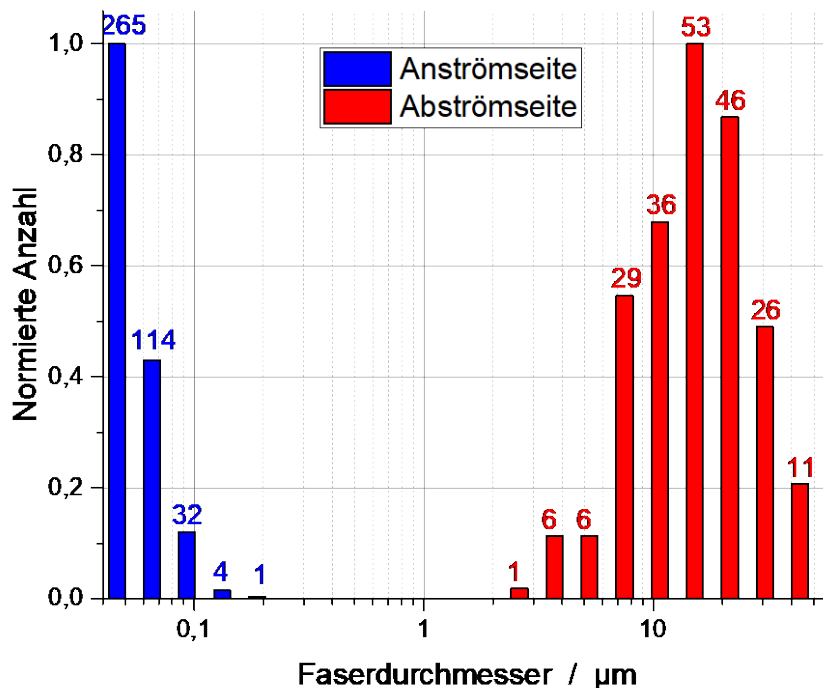
Abbildung 4.2-36: Medium F - Querschnitt bei 100facher Vergrößerung

Die nächsten Medien bestehen aus Nanofaserschichten, die bei der Produktion zur Stabilisierung auf ein Substrat aufgebracht werden. Jedoch ist bei diesen Medien die Trennung der Schicht vom Stützvlies nicht möglich gewesen, sodass die Probe als Gesamtes untersucht wurde.

Das folgende Medium hat mit Abstand die kleinsten Faserdurchmesser der Nanofasern, wie aus Tabelle 4.2-7 hervorgeht. Dies verdeutlicht auch die Faserverteilung in Abbildung 4.2-37. Des Weiteren zeigt sich, dass die Abströmseite annähernd so dicke Fasern aufweist wie beim vorherigen Medium und die Mediendicke ähnlich gering ist. Laut Hersteller bestehen die Nanofasern aus Polycaprolactam mit einem mittleren Durchmesser von $75 \text{ nm} \pm 15 \%$. Diese sind auf einem flachen Filterpapier aufgetragen, welches der Stabilität dient.

Tabelle 4.2-7 Mediendaten – Anströmseitige Nanofasern Medium G

	Anströmseite	Abströmseite
Faserdicke – Mittelwert	59 nm	16236 nm
Faserdicke – Mittelabweichung	14 nm	7023 nm
Faserdicke – prozentuale Abw.	24,3 %	43,3 %
Anzahl untersuchter Fasern	416	214
Mediendicke	ca. 280 µm	
Druckverlust (Mediengeschw.) <i>Herstellerangabe</i>	342 Pa (5 cm/s) 595 Pa (8,3 cm/s)	

**Abbildung 4.2-37: Faserdurchmesserverteilung – Anströmseitige Nanofasern Medium G**

Die Retentionskurve in Abbildung 4.2-38 wurde bei diesem Medium bei 5 cm/s aufgenommen. Spätere Untersuchungen bei einer Anströmgeschwindigkeit von 2 cm/s zur Vergleichbarkeit ergaben, wie auch bei dem folgenden Medium, keine sinnvollen Ergebnisse mehr, da das Medium vermutlich bereits durch das abgeschiedene DEHS verändert wurde.

Obwohl dieses Medium bei einer Anströmgeschwindigkeit von 5 cm/s vermessen wurde, zeigt es einen Fraktionsabscheidegrad auf einem ähnlichen Niveau wie die

vorangegangenen Medien, bei denen die Messreihen bei 2 cm/s durchgeführt wurden. Wird die Theorie berücksichtigt, dass sich die Retention für niedrigere Geschwindigkeiten verbessert, und eine Vergleichbarkeit mit Abbildung 4.2-8 vorausgesetzt, kann von einem besseren Fraktionsabscheidegrad als bei den vorherigen Medien ausgegangen werden.

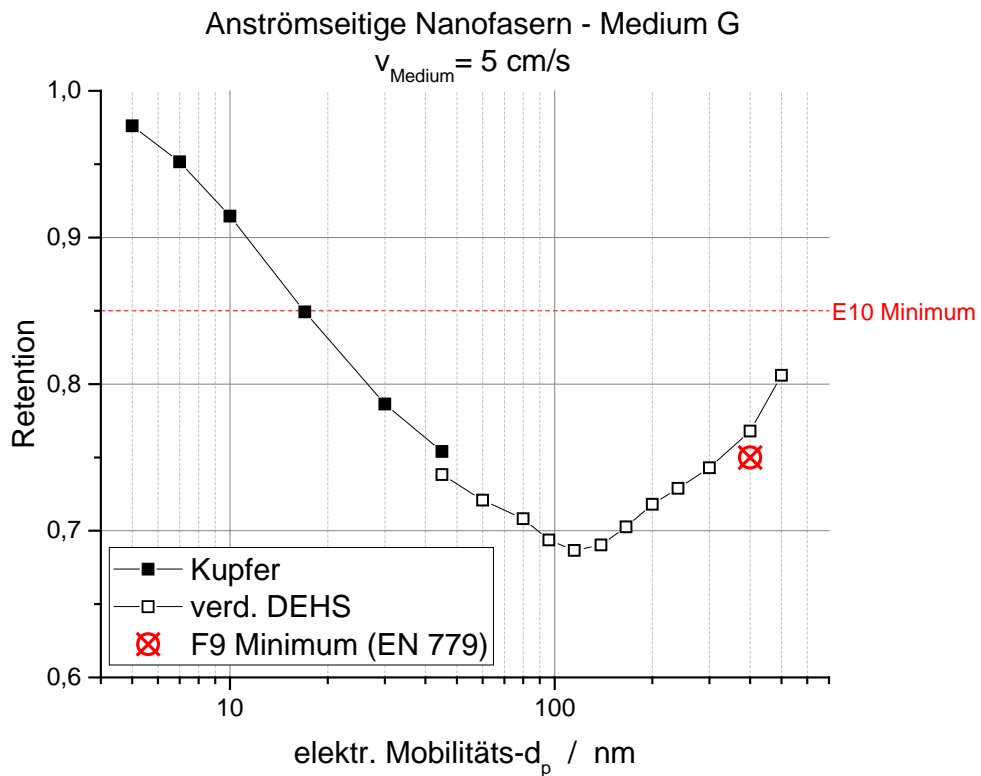


Abbildung 4.2-38: FAG – Anströmseitige Nanofasern Medium G

Die REM-Aufnahmen zu diesem Medium (Abbildung 4.2-39 - Abbildung 4.2-42) verdeutlichen die Feinheit der Nanofaserschicht. Auf dem ersten Bild wirkt die Schicht flächig mit einigen Löchern. Erst bei vielfacher Vergrößerung sind überhaupt einzelne Fasern zu erkennen.

Ein weiteres Medium, das untersucht wurde, weist mit Abstand die größten Fasern auf der Abströmseite auf, wie aus Tabelle 4.2-8 zu entnehmen ist.

Die Nanofasern bestehen ebenfalls aus Polycaprolactam und haben laut Hersteller einen mittleren Durchmesser von $119 \text{ nm} \pm 15 \%$. Die Nanoschicht ist bei diesem Medium nicht auf einem flachen, sondern auf einem gewellten Filterpapier aufgetragen. Die dazugehörige Faserverteilung zeigt Abbildung 4.2-43.

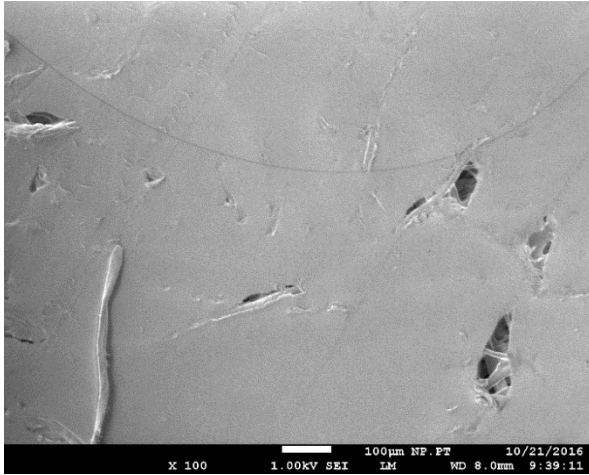


Abbildung 4.2-39: Medium G - Anströmseite bei 100facher Vergrößerung

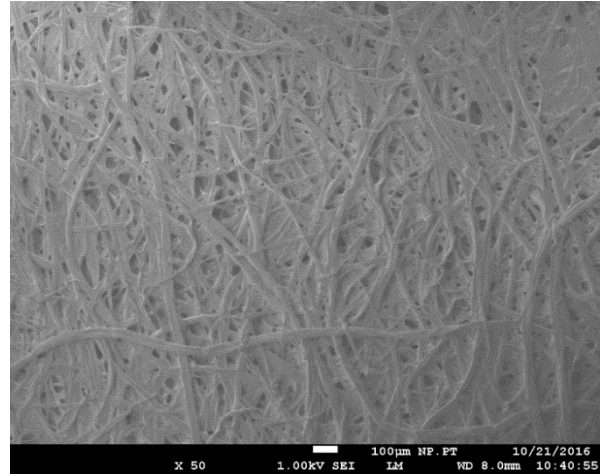


Abbildung 4.2-40: Medium G - Abströmseite bei 50facher Vergrößerung

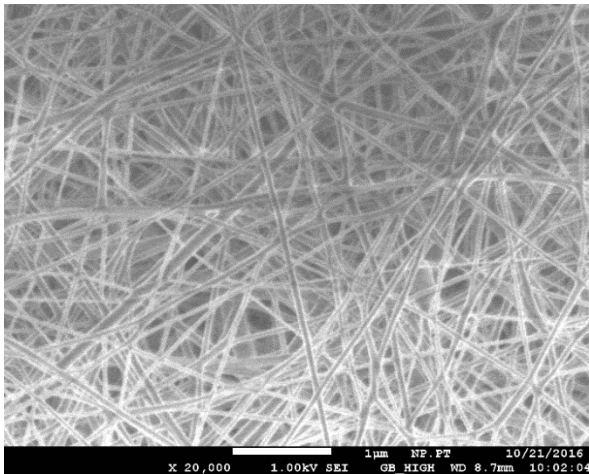


Abbildung 4.2-41: Medium G - Nanofasern bei 20.000facher Vergrößerung

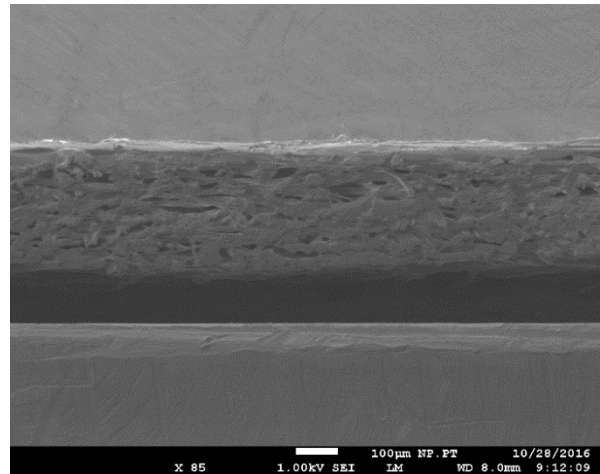


Abbildung 4.2-42: Medium G - Querschnitt bei 85facher Vergrößerung

Tabelle 4.2-8 Mediendaten – Anströmseitige Nanofasern Medium H

	Anströmseite	Abströmseite
Faserdicke – Mittelwert	88 nm	28.802 nm
Faserdicke – Mittelabweichung	26 nm	9547 nm
Faserdicke – prozentuale Abw.	29,2 %	33,2 %
Anzahl untersuchter Fasern	342	55
Mediendicke	ca. 490 µm	
Druckverlust (Mediengeschw.) <i>Herstellerangabe</i>	14 Pa (3 cm/s) 31 Pa (8,3 cm/s)	

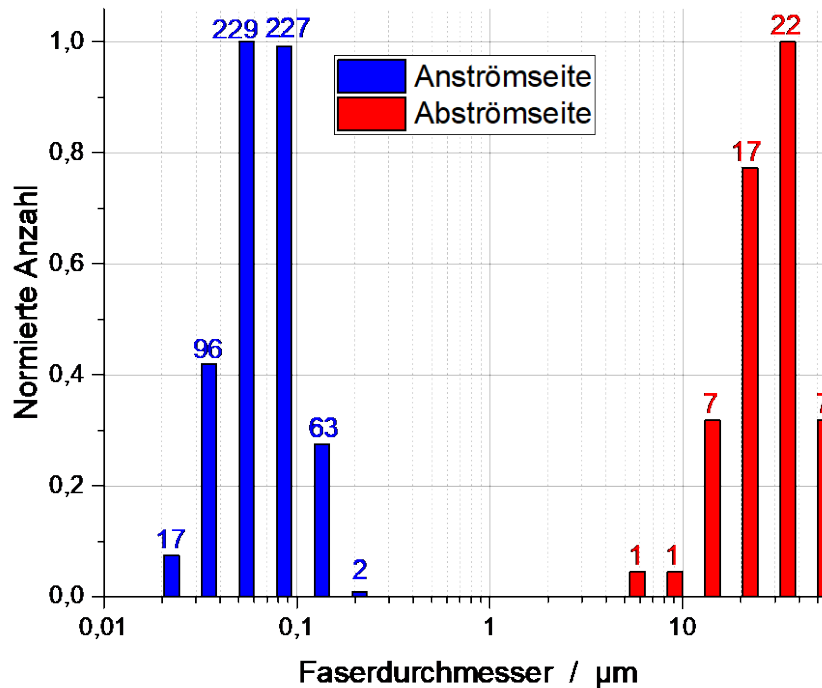


Abbildung 4.2-43: Faserdurchmesserverteilung – Anströmseitige Nanofasern Medium H

Die Retentionskurve dieses Mediums wurde zunächst bei 3 cm/s aufgenommen. Anschließende Messungen bei 2 cm/s ergaben, wie bei dem vorherigen Medium, keine sinnvollen Ergebnisse und werden daher hier nicht dargestellt. Auffallend ist die schlechte Abscheideleistung des Mediums über den gesamten Durchmesserbereich. Im MPPS bei um die 100 nm beträgt der Retentionswert ca. 0,1. Auch wenn die höhere Anströmgeschwindigkeit berücksichtigt wird, erreicht dieses Medium bei weitem nicht das gleiche Retentionsniveau wie die übrigen Medien, die in diesem Arbeitspaket untersucht wurden.

Eventuell sind die schlechten Retentionswerte durch die Wellung des Stützmediums zu begründen. Da die Prüffilteraufnahme hydraulisch zusammengedrückt wird, wurde das Filtermedium eventuell nicht gleichmäßig eingespannt, was die Messwerte verfälscht haben könnte. Der Verlauf der Retentionskurve zwischen 80 und 200 nm lässt auf ein Messartefakt schließen, was vermutlich aufgrund von mehrfach geladenen Partikeln auftritt. Wenn Partikel mit größerem Durchmesser von um die 140 nm, die eigentlich im MPPS des Mediums liegen, eine zweifache Ladung haben, werden diese im ersten Neutralisator als 80 nm Partikel klassiert. Da die Auftragung des Retentionsdiagramms von den Durchmessern dieser Klassierung ausgeht, wird die Penetration bei 80 nm überprognostiziert.

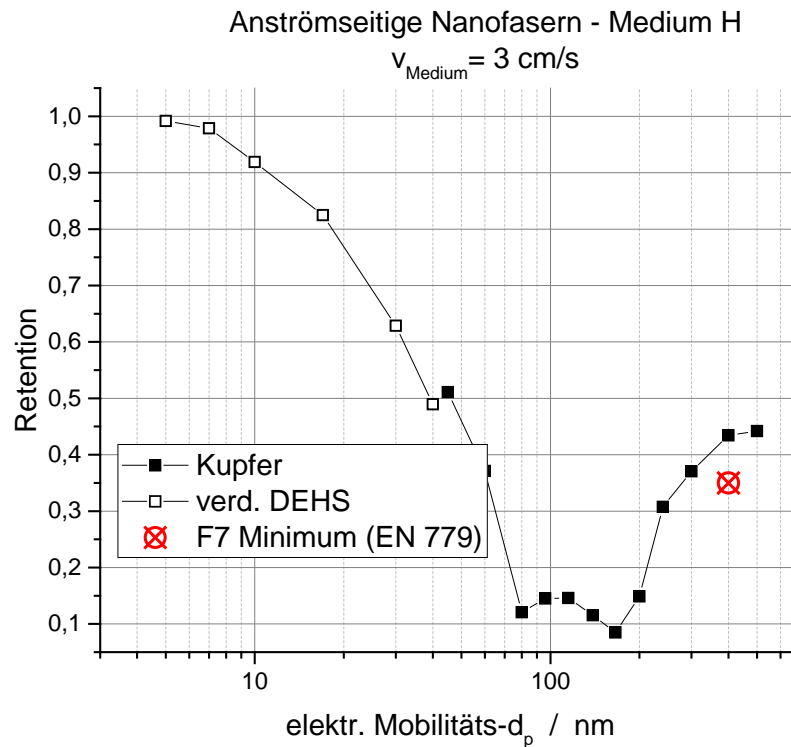


Abbildung 4.2-44: FAG – Anströmseitige Nanofasern Medium H

Anhand der REM-Aufnahmen wird ein weiterer Unterschied deutlich. Obwohl die Faserdicke der Nanoschicht im Mittel bei 88 nm liegt, scheint es in Abbildung 4.2-46 eher so, als würden sich die Nanofasern zu größeren Strängen im Größenbereich von einigen μm zusammenlagern und nicht wie bei anderen Medien eine flächige Schicht ausbilden. Abbildung 4.2-47 zeigt die Nanofasern bei größerer Auflösung. In der Querschnitt-Aufnahme (Abbildung 4.2-48) lässt sich die gewellte Form des Mediums erahnen.

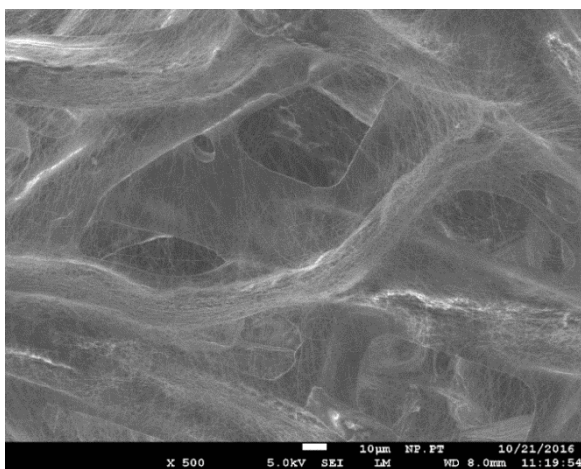


Abbildung 4.2-45: Medium H - Anströmseite bei 500facher Vergrößerung

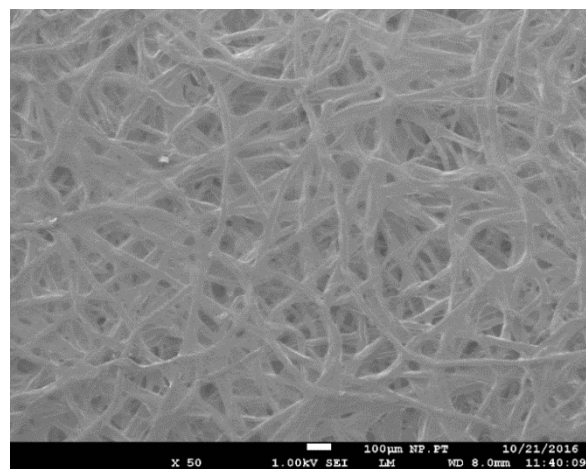


Abbildung 4.2-46: Medium H - Abströmseite bei 50facher Vergrößerung

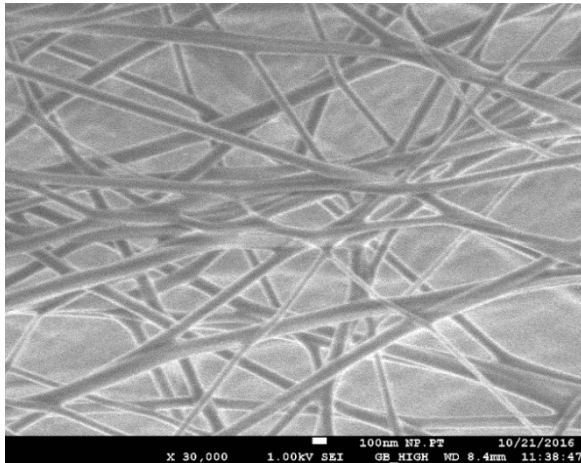


Abbildung 4.2-47: Medium H - Nanofasern bei 30.000facher Vergrößerung

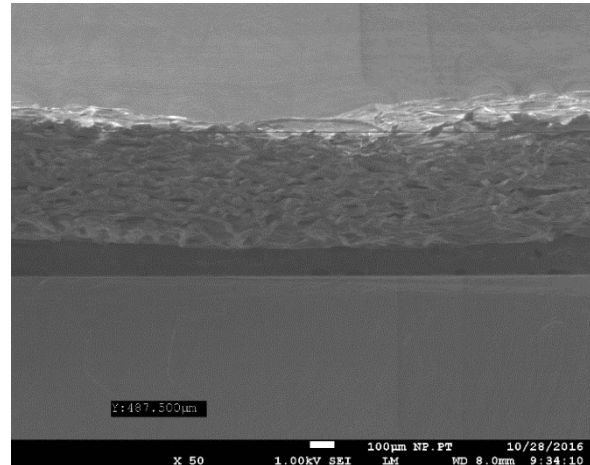


Abbildung 4.2-48: Medium H - Querschnitt bei 50facher Vergrößerung

Das letzte in diesem Kapitel untersuchte Medium hat ebenfalls anströmseitig eine Nanofaserschicht aus Polycaprolactam. Die Nanofasern haben laut Hersteller einen mittleren Durchmesser von $185 \text{ nm} \pm 15 \%$ und sind auch auf einem gewellten Filterpapier aufgebracht. Die folgende Tabelle zeigt die Daten des Mediums.

Tabelle 4.2-9 Mediendaten – Anströmseitige Nanofasern Medium I

	Anströmseite	Abströmseite
Faserdicke – Mittelwert	225 nm	17288 nm
Faserdicke – Mittelabweichung	45 nm	4806 nm
Faserdicke – prozentuale Abw.	19,9 %	27,8 %
Anzahl untersuchter Fasern	216	128
Mediendicke	ca. 290 µm	
Druckverlust (Mediengeschw.)	87 Pa (2 cm/s)	

Dieses Medium hat die geringste prozentuale Abweichung der Nanofaserdicke, was auch in der Faserverteilung in Abbildung 4.2-49 sichtbar wird, und eine relativ geringe Dicke.

Im Vergleich zu den anderen untersuchten Medien weist dieses mit Abstand den besten Fraktionsabscheidegrad bei einer Anströmgeschwindigkeit von 2 cm/s auf (Abbildung 4.2-50). Der MPPS liegt auch hier bei einer Partikelgröße von um die 100 nm, das Medium erreicht hier aber einen Retentionswert von 0,96. Vor allem im Bereich der Kupfernanopartikel bis 30 nm liegt die Abscheidung bei Werten über

0,995.

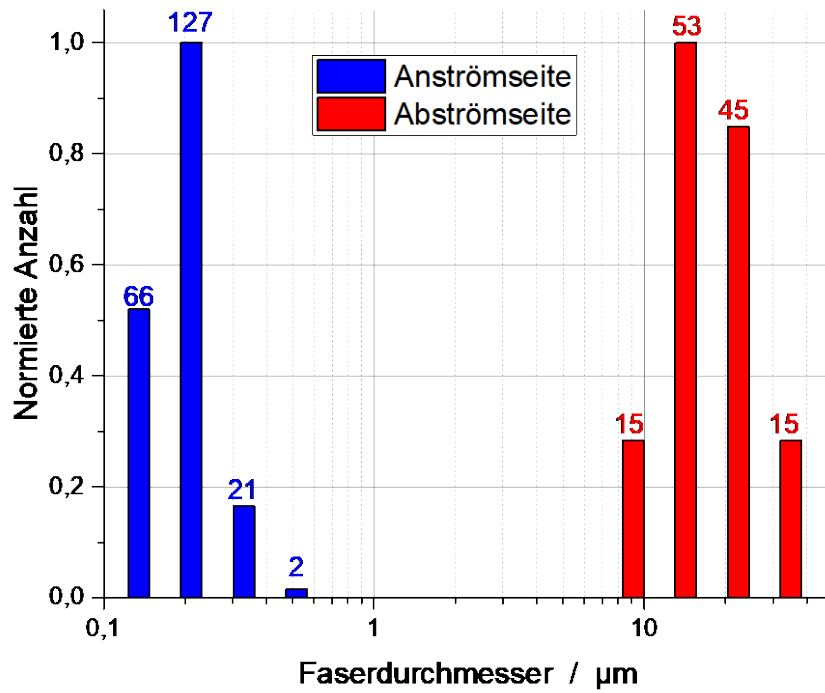


Abbildung 4.2-49: Faserdurchmesserverteilung – Anströmseitige Nanofasern Medium I

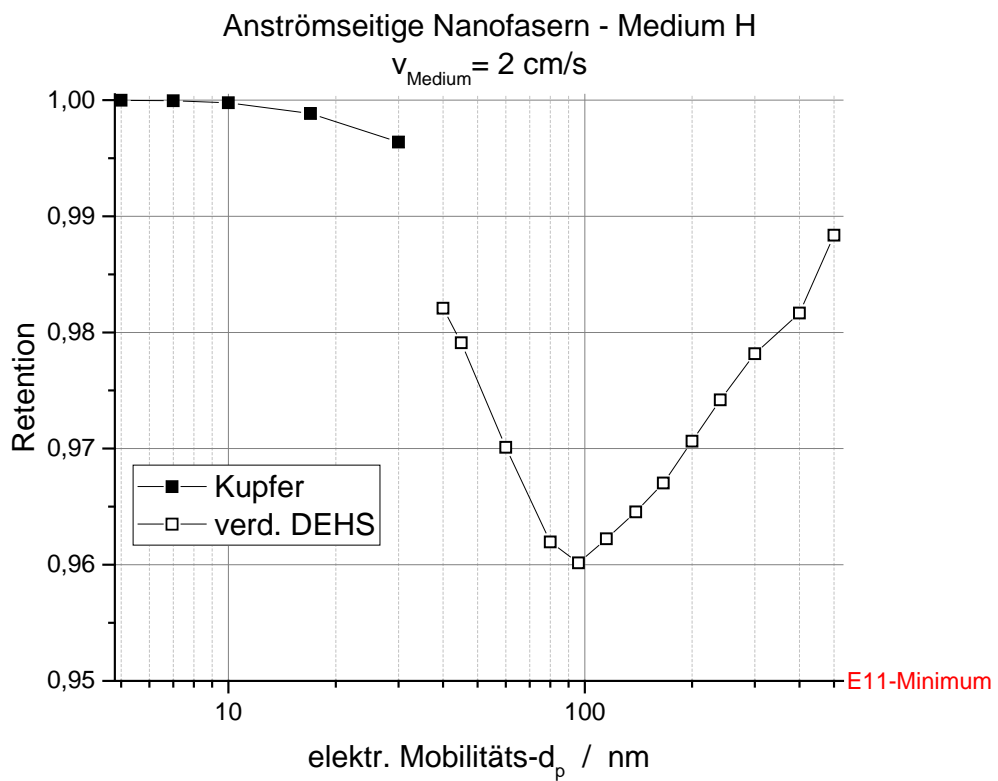


Abbildung 4.2-50: FAG – Anströmseitige Nanofasern Medium I

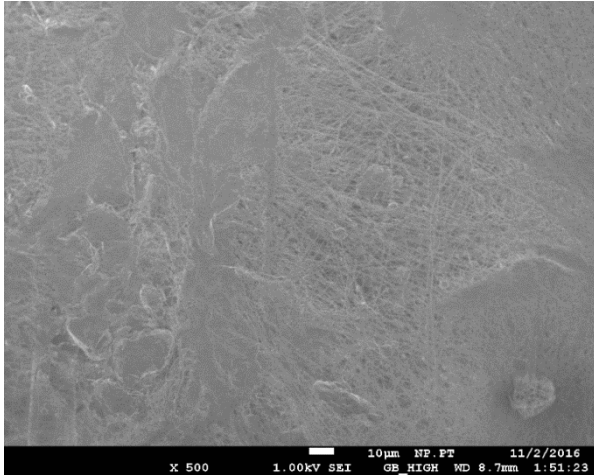


Abbildung 4.2-51: Medium I - Anströmseite bei 500facher Vergrößerung

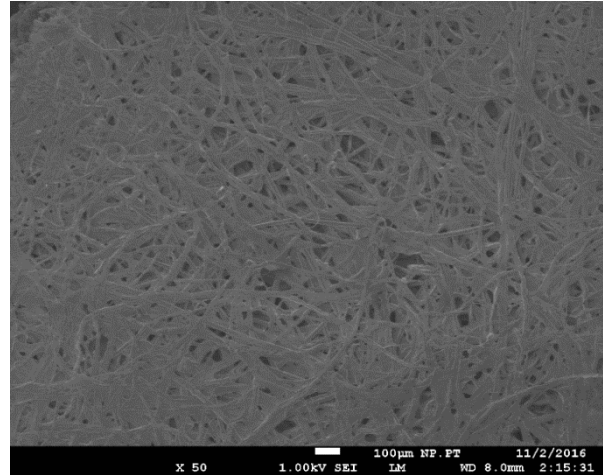


Abbildung 4.2-52: Medium I - Abströmseite bei 50facher Vergrößerung

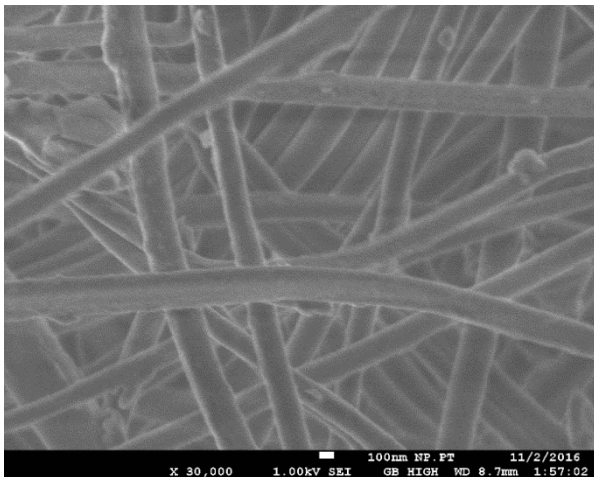


Abbildung 4.2-53: Medium I - Nanofasern bei 30.000facher Vergrößerung

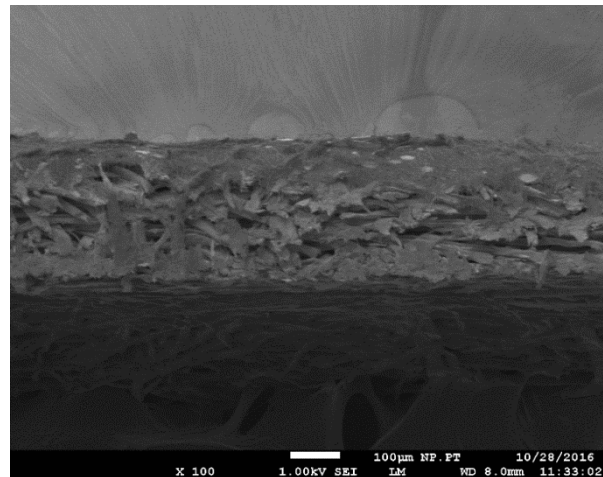


Abbildung 4.2-54: Medium I - Querschnitt bei 100facher Vergrößerung

Auf den REM-Aufnahmen zeigt sich ein feines Netz der Nanofasern mit einigen flächigen Stellen (Abbildung 4.2-51). Ob diese Flächen Verunreinigungen oder eng zusammengelagerte Nanofasern sind, lässt sich an dieser Stelle nicht sicher beantworten. Bei Vergrößerung des Maßstabes in Abbildung 4.2-53 zeigen sich einheitlich dicke Nanofasern von um die 200 nm. Diese spannen ein gleichmäßiges Netz auf, bei dem keine größeren Lücken erkennbar sind (Vergleich Abbildung 4.2-27 und Abbildung 4.2-39), aber auch keine größeren Knotenpunkte wie in Abbildung 4.2-33. Im Querschnitt (Abbildung 4.2-54) wirkt dieses Medium wie zerrissen, was darauf hindeutet, dass die flächigen Stellen in Abbildung 4.2-51 in der Tat zusammengelagerte Faserschichten sind, die sich auch über die Tiefe des Mediums erstrecken. Die gewellte Form des Stützvlieses kann auf den REM-Aufnahmen nicht erkannt

werden.

Zwischenfazit: Insgesamt wurden in diesem Kapitel die gesammelten Messergebnisse der Filtermedien mit anströmseitigen Nanofasern vorgestellt und diskutiert. Der Nachweis, dass die Feinstfasern überwiegend oder ausschließlich auf der Anströmseite vorhanden sind, konnte über REM-Aufnahmen und anschließende Faserdurchmesserstatistik erbracht werden. Zum Teil konnten die ermittelten Fasermittelwerte mit Herstellerangaben verglichen werden. Gleiches gilt für Druckverlustdaten der Hersteller, sofern diese vorlagen. Zur Vergleichbarkeit der Retentionsdaten wurden die meisten Medien bei einer Anströmgeschwindigkeit von 2 cm/s durchströmt. Die Abscheideleistung der Medien zeigte eine große Spannweite von etwa 10 % Abscheidung (vgl. Abbildung 4.2-44) bis hin zu einer Abscheideleistung im Schwebstofffilterbereich von etwa 99,99 % (Vgl. Abbildung 4.2-14).

Filtermedien eines Herstellers mit einer Schicht aus besonders kleinen Nanofasern bilden die Grundlage für die Modellierung. Diese Medien wurden mit einem speziellen Herstellungsverfahren zur Stabilisierung auf Stützsichten gesponnen. In den meisten Fällen konnten diese leider nicht von den Nanoschichten separiert werden, so dass die Abscheidebeiträge der einzelnen Schichten messtechnisch nicht erfasst werden konnten, sondern im Kapitel 4.7.2 durch Modellierung der Einzelschichten verglichen werden. Die gesammelten Ergebnisse der Abscheidegrad- und Druckverlustmessungen sowie der Faserdurchmesser-Verteilung werden für die Modellbildung in Kapitel 4.7.2 genutzt.

4.2.3 Untersuchung von Filtermedien mit abströmseitigen Nanofasern

In diesem Kapitel werden Messreihen vorgestellt, bei denen Filter mit Nanofaserschichten auf der Abströmseite untersucht wurden. Dazu wurden die bereits untersuchten Medien „nanocoated on top“ einfach gedreht (mangels Alternativen – andere Medien standen nicht zur Verfügung), um die Nanofasern abströmseitig vorliegen zu haben.

Die folgenden Retentionskurven (Abbildung 4.2-55 - Abbildung 4.2-57) zeigen daher die Fraktionsabscheidegrade von ein und demselben Medium, bei dem die Nanoschicht zunächst anströmseitig (blaue Kurve) und bei den nächsten Messungen abströmseitig (rote Kurve) vorlag. Die ausgefüllten Symbole sind dabei Retentionswerte, die durch aus dem Funkengenerator bereitgestellte Nanopartikel gemessen wurden. Die unausgefüllten Symbole zeigen die Retentionswerte, die durch einen mit verdünntem DEHS befüllten Zerstäuber gemessen wurden. Alle

Verläufe wurden bei einer Anströmgeschwindigkeit von 2 cm/s aufgenommen.

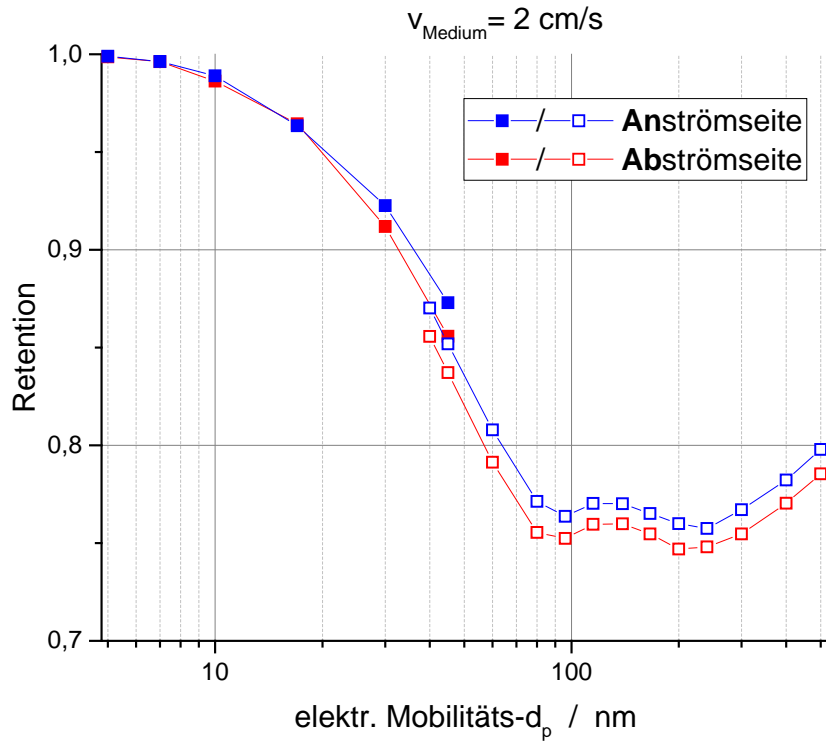


Abbildung 4.2-55: FAG – Vergleich der Anströmseiten Medium D

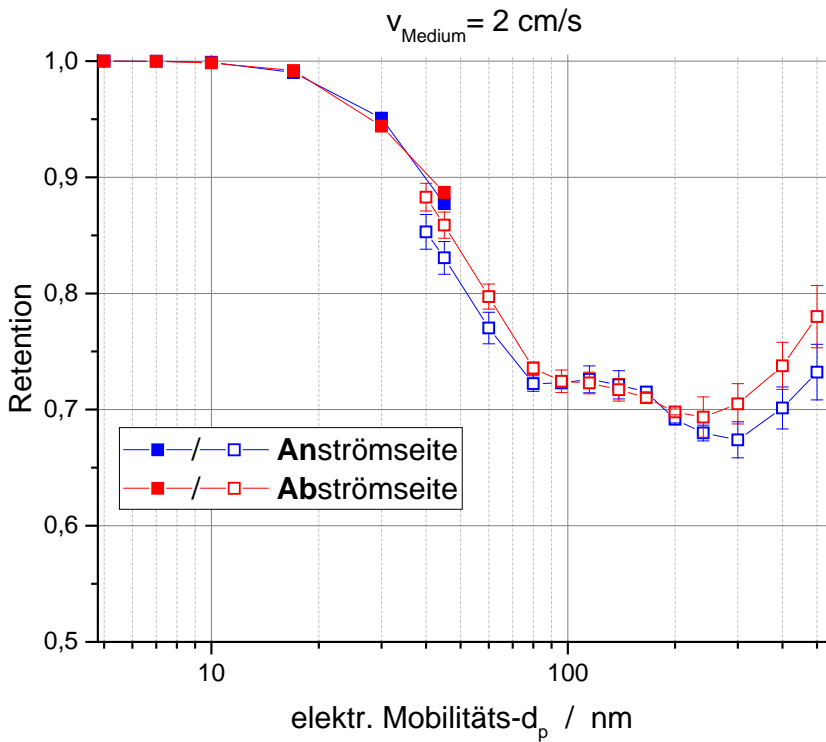


Abbildung 4.2-56: FAG – Vergleich der Anströmseiten Medium E

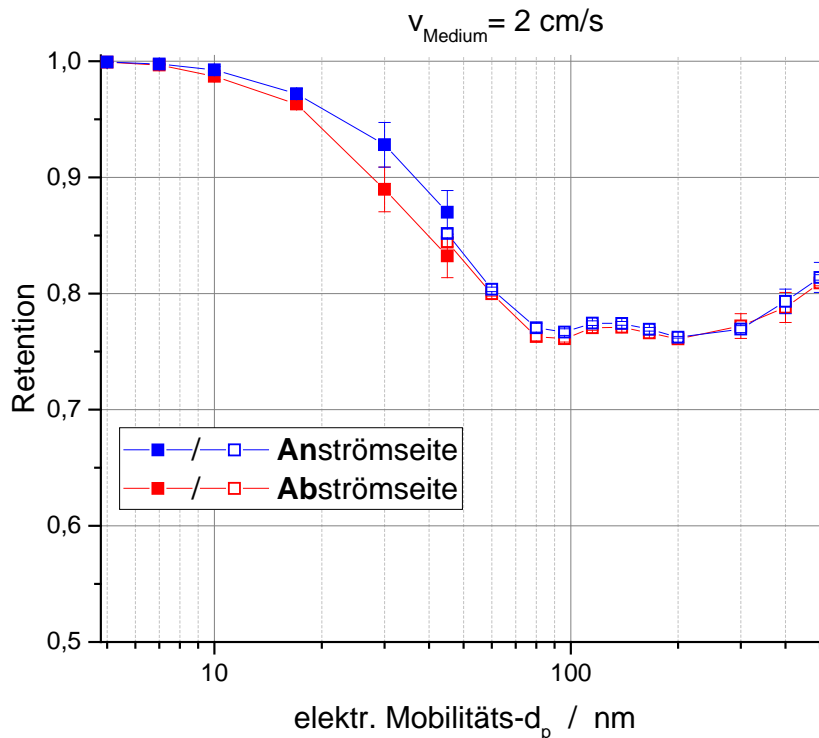


Abbildung 4.2-57: FAG – Vergleich der Anströmseiten Medium F

Die Daten des ersten Mediums wurden in Tabelle 4.2-4 gezeigt und auch auf die Faserverteilung wurde bereits eingegangen. Die Retentionskurven (Abbildung 4.2-55) haben sehr ähnliche Verläufe, wobei die Messreihe mit der anströmseitigen Nanofaserschicht zu besseren Retentionswerte führte.

Die Daten zu dem zweiten Medium sind in Tabelle 4.2-5 zu finden. Bei diesem Medium zeigt die Anordnung der Nanofaserschicht auf der Anströmseite tendenziell etwas schlechtere Retentionswerte (Abbildung 4.2-56). Diese liegen im MPPS bei ca. 120 nm bei Werten um die 0,68, wohingegen die abströmseitige Nanofaserschicht Werte von ungefähr 0,7 ergeben. Im Nanometerbereich bis knapp 30 nm erreicht dieses Medium die besten Retentionswerte. Das Stützvlies dieses Mediums hat nur etwa halb so dicke Fasern wie bei dem vorherigen Medium. Vergleicht man dieses Medium mit dem nächsten, welches wieder ähnlich dicke Stützfasern hat wie das erste Medium, scheint eine Kausalität zwischen der Stützfaserdicke und den Retentionswerten zu bestehen.

Bei dem dritten Medium ist der Fraktionsabscheidegrad für die anströmseitige Nanofaserschicht auch wieder besser als für die abströmseitige, wie in Abbildung 4.2-57 zu erkennen. Ab einer Partikelgröße von ca. 100 nm liegen beide Retentionsverläufe quasi übereinander und erreichen ihren MPPS bei ungefähr 0,75. In dem unteren Partikelgrößenbereich weisen die beiden Kurven Unterschiede von

bis zu 0,05 auf.

Bei diesen drei Medien zeigt sich ein ähnlicher Kurvenverlauf im Bereich zwischen 80 und 200 nm wie in Abbildung 4.2-44. Auch bei diesen Messreihen lässt das auf mehrfach geladene Partikel schließen, wodurch die Penetration bei Werten knapp unter 100 nm überprognostiziert wird.

Als Fazit aus diesen drei Messreihen kann die Theorie aufgestellt werden, dass, je dünner die Stützfasern sind, umso besser die abströmseitige Anordnung ist. Sind die Stützfasern im Bereich um 2 μm , ist die anströmseitige Anordnung besser. Ein Grund könnte sein, dass dickere Fasern bei gleicher Packungsdichte engere Zwischenräume ergeben und somit kürzere Verweilzeit für die Partikel.

Bei einer anströmseitigen Nanofaserschicht ist es denkbar, dass es zu einer vermehrten Partikelabscheidung nahe der Filteroberfläche (innerhalb der dünneren Nanofaserschicht) kommt, und somit fortlaufend Partikel an bereits abgeschiedenen Partikeln abgeschieden werden. Darin kann die tendenziell verbesserte Abscheideleistung bei der anströmseitigen im Gegensatz zur abströmseitigen Nanofaserschicht begründet sein.

Für alle drei Medien lässt sich jedoch zusammenfassen, dass bis zu einem Größenbereich von ca. 30 nm kaum Unterschiede in den Retentionsverläufen zu erkennen sind, wenn die Streuung innerhalb einzelner Filterrunden berücksichtigt wird (Kapitel 4.1.2 Vergleichsmessungen mit anderen Prüfinstituten). Jedes der drei Medien erreicht bei einem Partikeldurchmesser von ca. 17 nm einen Retentionswert über 0,95.

4.3 Aufrüstung des EN 779 Prüfstandes für Messungen mit Nanopartikeln

Aufgrund der zu erwartenden hohen Abscheideeffizienz von insbesondere HEPA und ULPA Filtern für Nanopartikel müssen Vorkehrungen getroffen werden, um sicherzustellen, dass hinter dem Filter in einem geeigneten Prüfstand gemessene Partikel ausschließlich diejenigen sind, die durch den Filter hindurchgetreten sind und nicht solche, die anderweitig, z. B. durch kleine Leckagen in den Prüfstand gelangen konnten. Zur Vermessung von Filtern für die allgemeine Raumlufttechnik (RLT) stand bei Projektbeginn im IUTA ein Prüfstand gemäß EN779 zur Verfügung. Dieser verfügt über die Vorgaben der Norm hinaus über eine vollständige Luftkonditionierung, sodass Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit einstellbar sind. Bei dem ursprünglichen Prüfstand handelte es sich um einen Eigenbau, der sämtliche Vorgaben der EN779 erfüllte, dessen Dichtigkeit aber für die o.g. Untersuchungen der Abscheideeffizienz von Filtern für Nanopartikel nicht ausreichend war. Darüber

hinaus war der Einbau der Testfilter umständlich und daher sehr zeitaufwändig. Zu Beginn des Projektes wurde der Bereich des Prüfstandes, in dem sich die Filteraufnahme befindet daher durch ein professionelles System (Modell ALF 114) der Firma Topas GmbH (Dresden) ersetzt. Dieses erlaubt nicht nur einen erheblich einfacheren Einbau der zu prüfenden Filter. Der neue Prüfstand verfügt auch über Silikondichtungen, die beim Verschließen des Prüfkanals per Druckluft aufgeblasen werden und somit das Innere hermetisch gegen die Umwelt abdichten. Ein Eindringen von Partikeln von außen ist somit ausgeschlossen. Darüber hinaus ist die Filteraufnahme derart gestaltet, dass das Filtergehäuse absolut dicht mit dem Filterhalter verbunden ist, sodass ebenfalls ausgeschlossen werden kann, dass Partikel durch Leckagen in der Filteraufnahme den Filter umgehen und so ins Reingas gelangen können. Abbildung 4.3-1 zeigt den aufgerüsteten Prüfstand des IUTA.



Abbildung 4.3-1: Neuer Prüfstand ALF 114 der Firma Topas GmbH am IUTA

Die zweite, wesentlich größere Herausforderung bei der Prüfung von Filtern mit Nanopartikeln war die Bereitstellung von Partikeln in einer ausreichend hohen Konzentration, sodass auch bei sehr hohen Abscheideeffizienzen in vertretbarer Messzeit im Reingas noch eine gute Zählstatistik erreicht wird. Dieses Problem ist

prinzipiell ähnlich wie bei der Prüfung von Filterronden (s. Abschnitt 4.1.1), jedoch aufgrund der wesentlich höheren Volumenströme noch herausfordernder. Ähnlich wie bei der Medienprüfung soll hier ebenfalls angenommen werden, dass mindestens 100 Partikel gezählt werden müssen, um statistisch gesicherte Messergebnisse zu erhalten. Eine überschlägige Abschätzung ergab, dass hierzu Reingsaskonzentrationen von mindestens 10^6 1/cm³ nötig sind. Dabei sollten Abscheideeffizienzmessungen mit Partikelgrößen bis hinunter zu 5 nm realisiert werden. Mit den herkömmlich gemäß EN779 vorgesehenen Aerosolgeneratoren (Atomizer und/oder Staubdispargierer) lassen sich weder die benötigten Partikelgrößen noch die notwendigen Konzentrationen bereitstellen. Daher wurde hier ein im Rahmen des Projekts ein Flammengenerator FG2 (Fa. MoTec Konzepte, Bochum) beschafft. In diesem Generator wird eine Precursorlösung in eine Knallgasflamme gesprüht. Abbildung 4.3-2 zeigt eine schematische Darstellung des Flammengenerators.

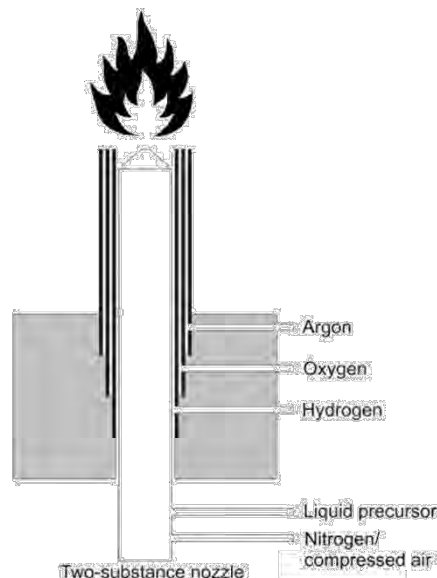


FIG. 1. Pictorial schematic of the burner head of the nanoparticle generator.

Abbildung 4.3-2: Schematische Darstellung des Flammengenerators FG2 (MoTec Konzepte, [24])

Durch die Einbringung der Lösung in die Flamme verdampft diese. Bei der anschließenden Abkühlung kommt es zur Übersättigung des gelösten Stoffes und somit zur homogenen Nukleation und anschließender Kondensation auf den neu gebildeten Partikeln. Bei der Nukleation handelt es sich um eine Partikelneubildung, bei der sich zunächst Moleküle zu Molekülclustern verbinden und dann weiter anwachsen, um letztlich eine Größe im Nanometerbereich und somit den Größenbereich von Partikeln zu erreichen. Je nach Material und Konditionierung des frisch gebildeten Aerosols können somit sehr kleine Partikel erzeugt werden. Darüber hinaus ist bekannt, dass die Nukleation immer sehr hohe

Partikelanzahlkonzentrationen von 10^{10} 1/cm³ und mehr erzeugt. Hierdurch bedingt kommt es quasi zeitgleich mit der Partikelbildung immer auch zur Koagulation und damit zu einem Partikelwachstum. Im vorliegenden Fall wird eine Kochsalzlösung als Precursor verwendet. Der Prozess der Partikelbildung und des Partikelwachstums ist in Abbildung 4.3-3 gezeigt. Diese Abbildung stammt aus einer Publikation, von Mäkelä et al. [25], welche allgemein die Partikelerzeugung mit Knallgasflammen bei Verwendung unterschiedlicher Precursorlösungen beschreibt. Für den hier verwendeten Generator mit NaCl Lösung als Precursor ist lediglich der linke Pfad relevant, bei dem sowohl das Lösemittel als auch die gelösten Bestandteile vollständig verdampfen, relevant.

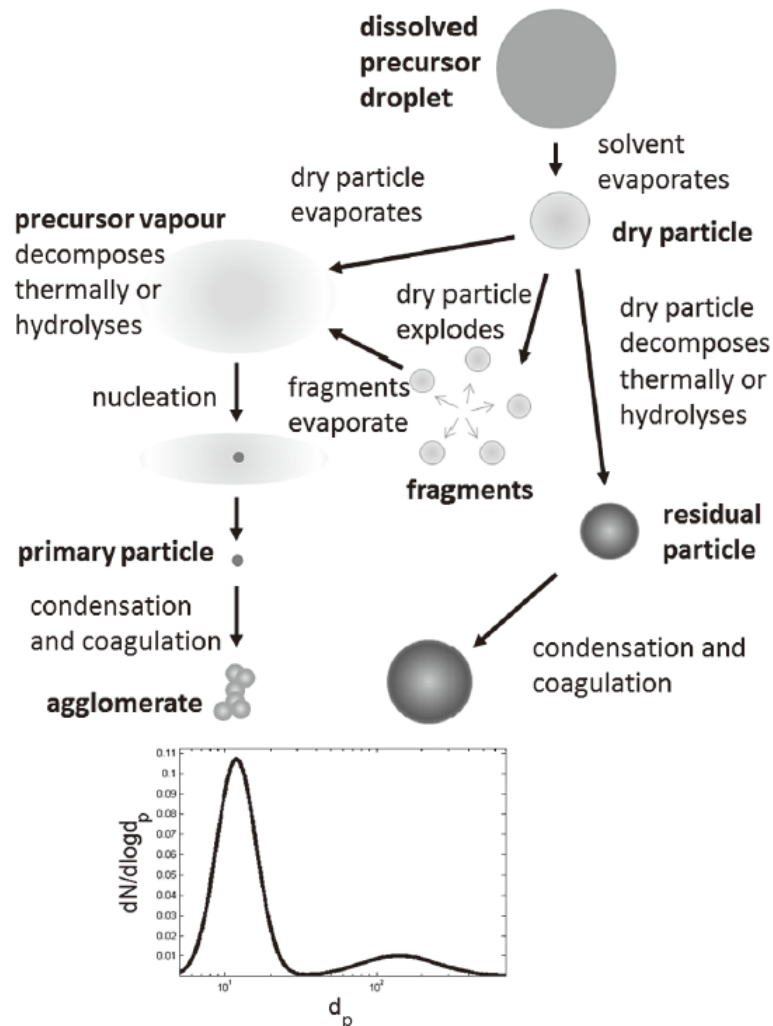


Abbildung 4.3-3: Schematische Darstellung der Bildung von Nanopartikeln in einer Knallgasflamme aus flüssigen Precursoren (Mäkelä et al. [25])

Der Flammengenerator wurde ursprünglich für die Erzeugung von ZnO Nanopartikeln aus Zinkacetatlösung für Humanexpositionsstudien entwickelt [24] [26], kann aber

auch mit anderen Precursorlösungen verwendet werden. Im vorliegenden Projekt wurden hierzu wässrige Kochsalzlösungen verwendet, um NaCl Nanopartikel zu erzeugen. Die wesentlichen Vorteile von NaCl gegenüber ZnO sind, dass es nicht toxisch und zudem jederzeit und kostengünstig verfügbar ist. Hierbei wird die NaCl Lösung über eine Spritzenpumpe mit einstellbarem Vorschub in den Generator eingebracht. Die Größe der Partikel lässt sich zudem neben dem Vorschub auch über die Menge an NaCl in der Vorlagelösung einstellen. In Voruntersuchungen konnte bereits gezeigt werden, dass sich durch eine Anbindung des Flammengenerators an den EN779 Prüfstand sehr hohe Konzentrationen an NaCl Partikeln von mitunter $>10^7$ 1/cm³ mit Partikelgrößen bis hinunter zu 5 nm (Modaldurchmesser) und sehr schmalen Verteilungsbreiten im Prüfkanal bereitstellen lassen, sodass dieser als geeignet für die Aufgaben in diesem Projekt erachtet wurde. Nach Beschaffung des Generators erfolgte zunächst eine gründliche Evaluierung der hiermit in Verbindung mit dem Prüfstand produzierbaren NaCl- Prüfaerosole. Diese ist im folgenden Abschnitt erläutert.

4.4 Entwicklung einer Messmethodik zur NP-Abscheidung an Filterkassetten

4.4.1 Evaluierung der Prüfaerosole

NaCl- Nanopartikel werden, wie oben beschrieben, mit dem Flammengenerator durch Eindüsen einer wässrigen NaCl Lösung in eine Knallgasflamme erzeugt. Hierbei entstehen durch Nukleation sehr kleine Nanopartikel in sehr hohen Konzentrationen. Solange die Sättigung des NaCl Dampfes hinter der Flamme nicht abgebaut ist, wachsen die Partikel aufgrund von heterogener Kondensation des Dampfes auf den neu entstandenen Partikeln weiter an. Zudem bilden die Partikel wegen der sehr hohen Anzahlkonzentration durch Koagulation Agglomerate und wachsen somit weiter. Das Partikelwachstum durch Koagulation und Kondensation kann durch schlagartiges, starkes Verdünnen der Dampf- und Partikelphase (sog. Quenchen) gestoppt werden. Um dies zu erreichen, befindet sich seitlich im Prüfkanal des EN779 Prüfstandes eine Öffnung, durch die das Aerosol in den Kanal eingebracht werden kann. Da sich der Prüfstand im Betrieb stets in einem leichten Unterdruck befindet, wird durch diese Öffnung Luft angesogen. Der Nanopartikelgenerator wird so positioniert, dass das NaCl- Aerosol direkt in diesem Luftzug produziert, in den Prüfkanal eingebracht und dort mit dem Filterprüfvolumenstrom vermischt wird. Der Aufbau ist in Abbildung 4.4-1 gezeigt.

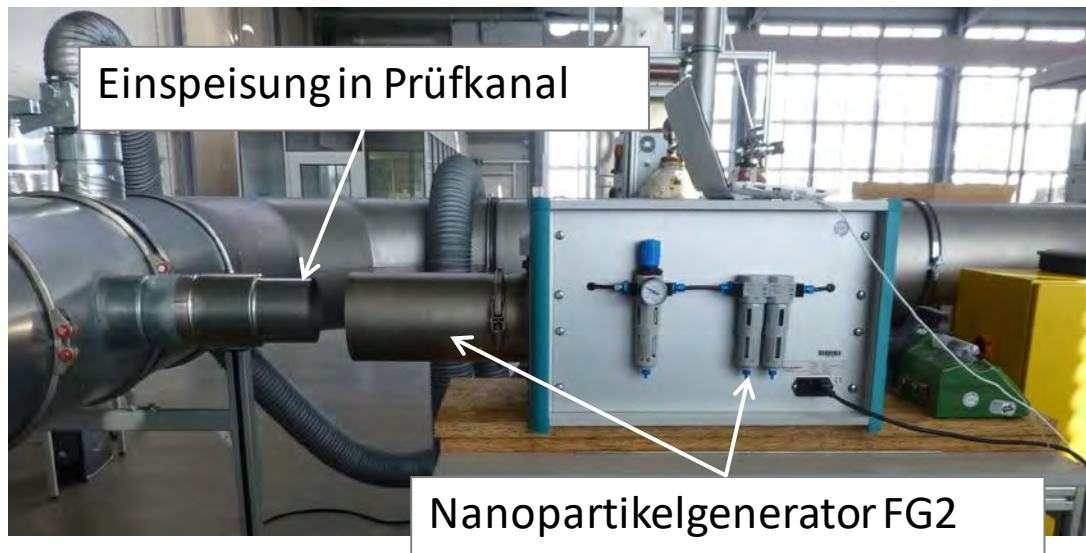


Abbildung 4.4-1: Anbindung des Nanopartikelgenerators an den Prüfstand

Die im Rahmen dieses Vorhabens untersuchten Filter haben Nennvolumenströme zwischen 1.700 m³/h und 4.250 m³/h. Der Volumenstrom des Generators beträgt nur ca. 20 l/min, sodass die Vermischung mit dem Filterprüfvolumenstrom im Prüfkanal zu einer nahezu instantanen starken Verdünnung und damit zum Quenchen der Koagulation und Kondensation führt. Abbildung 4.4-2 zeigt den schematischen Aufbau des aufgerüsteten Prüfstandes mit dem Nanopartikelgenerator FG2.

Die Partikelgröße lässt sich durch Variation der NaCl Konzentration in der Lösung, sowie deren Förderrate verändern. Die NaCl-Lösung wird mittels einer Spritzenpumpe mit einstellbarem Vorschub in den Partikelgenerator befördert. Aufgrund der unterschiedlichen Verdünnungen des Aerosols ist die entstehende Partikelgrößenverteilung ebenso wie die entstehende Anzahlkonzentration auch vom Volumenstrom im Prüfkanal abhängig. Dieser ist jedoch nicht frei wählbar, sondern durch den zu testenden Filter bzw. dessen Nennvolumenstrom vorgegeben.

Um den Einfluss der NaCl Konzentration in der Lösung, der Förderrate sowie der Filtertestvolumenströme zu eruieren, wurden zunächst die entstehenden Größenverteilungen des Prüfaerosols an der Position der Rohgasmessung (s. Abbildung 4.4-2) gemessen. Hierzu kam ein Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS, Modell 3936) der Firma TSI zum Einsatz. Als Klassierer wurden zwei verschiedene DMAs verwendet (jeweils mit 1,5 l/min Aerosolstrom und 15 l/min Schleierluftstrom), zum einen ein nano-DMA (Modell 3085, [27]), der es erlaubt Partikel mit Größen zwischen ca. 2 nm und 65 nm zu charakterisieren und zum anderen ein langer DMA (Modell 3081) für Partikelgrößen zwischen ca. 6 nm und ca. 230 nm. Zur Bestimmung der Anzahlkonzentrationen kam überwiegend ein Ultrafine Condensation Particle Counter (UCPC, Modell 3776) zum Einsatz, der die

Anzahlkonzentration ab einer Partikelgröße von 2,5 nm bestimmen kann.

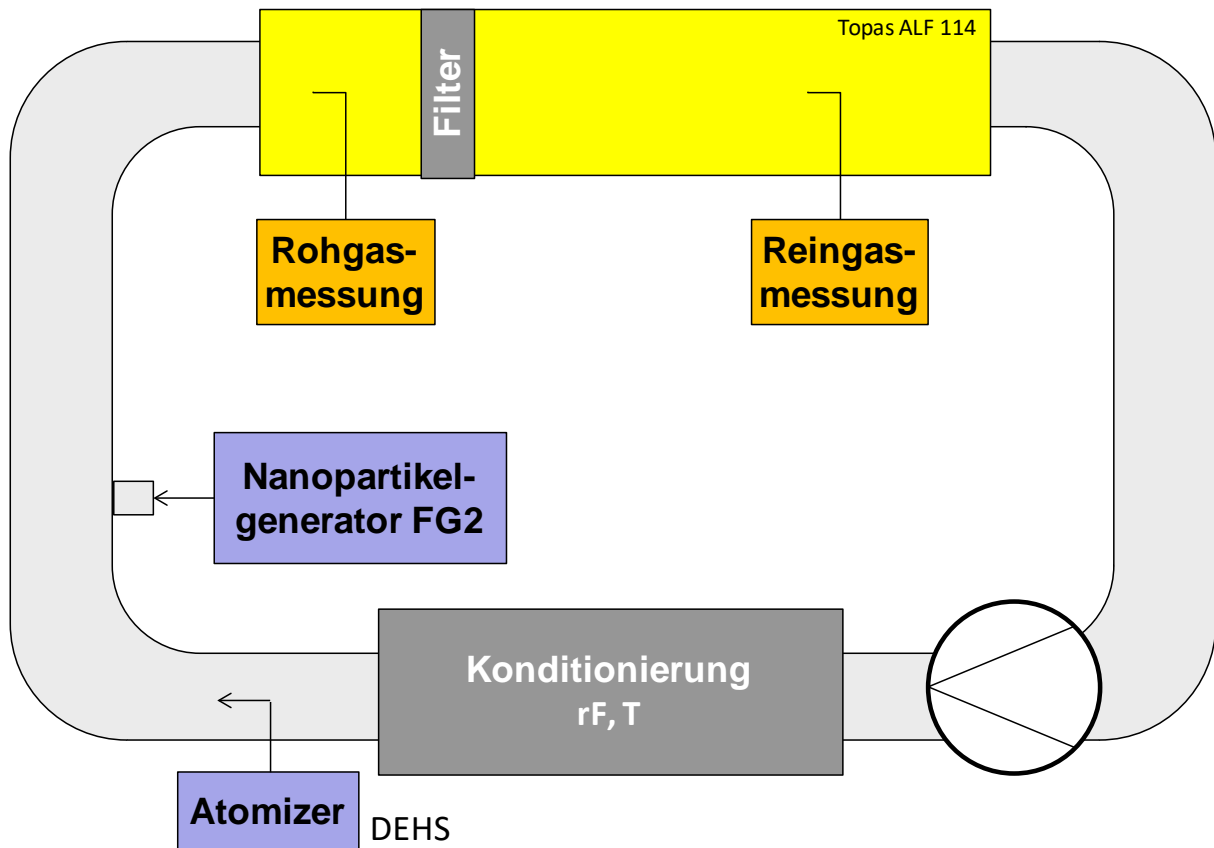


Abbildung 4.4-2: Schematischer Aufbau des aufgerüsteten Prüfstandes zur Vermessung konfektionierter Filterkassetten

Abbildung 4.4-3 zeigt exemplarisch die Größenverteilungen der Prüfaerosole für die beiden am häufigsten verwendeten Volumenströme von 3.400 m³/h und 4.250 m³/h, zum einen gemessen mit einer 0,5 g/l NaCl-Lösung bei Förderraten von 30 ml/h, 50 ml/h und 90 ml/h und zum anderen gemessen bei einer Förderrate von 90 ml/h mit NaCl Konzentrationen von 1 g/l, 10 g/l und 50 g/l. Um eine bessere grafische Darstellung zu gewährleisten, wurden die Größenverteilungen jeweils auf die Konzentration im Modaldurchmesser normiert. Die Gesamtanzahlkonzentrationen der dargestellten Verteilungen lagen in allen Fällen bei $>10^7$ 1/cm³. Man erkennt, dass die entstehenden Größenverteilungen der Prüfaerosole alle lognormal verteilt sind. Zudem zeigt die Abbildung, dass eine Variation der Förderrate lediglich sehr geringe Änderungen der entstehenden Partikelgrößen bewirkt. Bei Verwendung einer 0,5 g/l Lösung führte die Erhöhung der Förderrate von 30 ml/h auf 90 ml/h lediglich zu einer Vergrößerung des Modaldurchmessers von 4,4 nm auf 5,3 nm bei 3.400 m³/h und von 3,5 nm auf 4,6 nm bei 4.250 m³/h. Bei Erhöhung der NaCl-Konzentration in der Vorlagelösung von 1 g/l auf 50 g/l hingegen führte bei einer Förderrate von 90 ml/h zur Vergrößerung von 6,2 nm auf 21,3 nm bei 3.400 m³/h und

von 5,1 nm auf 15,7 nm bei 4.250 m³/h. Theoretisch lassen sich bei 20°C bis zu 358 g NaCl pro Liter Wasser lösen. Es wurde jedoch festgestellt, dass zu hohe NaCl Konzentrationen in der Düse des Nanopartikelgenerators zu Verkrustungen und damit nach bereits relativ kurzer Zeit zur Verstopfung der Düse führen, sodass die hier maximal einsetzbare Konzentration bei 80 g/l liegt. Der Unterschied der Größenverteilungen bei 50 g/l und 80 g/l ist jedoch so gering, dass auf deren Darstellung in Abbildung 4.4-3 verzichtet wurde. Eine vollständige Übersicht über die Parameter der Lognormaverteilungen der Prüfaerosole bei unterschiedlichen Bedingungen ist in Tabelle 4.4-1 gegeben.

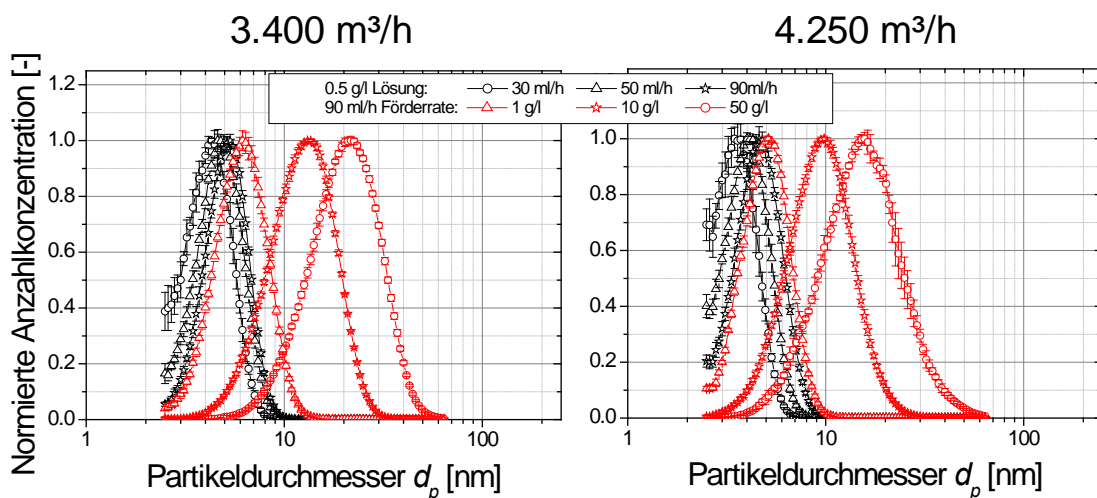


Abbildung 4.4-3: Partikelgrößenverteilungen im Prüfkanal, gemessen mit einer Lösung von 0,5 g NaCl pro Liter Wasser für verschiedene Förderraten (schwarz), sowie mit verschiedenen NaCl Konzentrationen bei einer Förderrate von 90 ml/h (rot); Filterprüfvolumenströme 3.400 m³/h (links) und 4.250 m³/h (rechts)

Tabelle 4.4-1 und Abbildung 4.4-3 zeigen, dass die gewünschte minimale Partikelgröße von 5 nm erreicht und sogar unterschritten wird. Auch die Forderung nach einer sehr hohen Anzahlkonzentration im Prüfkanal ist für alle Prüfaerosole gewährleistet. Während auf der einen Seite diese sehr hohen Konzentrationen nötig sind, um überhaupt hohe Abscheideeffizienzen bestimmen zu können, führen diese auf der anderen Seite zur Koagulation innerhalb des Prüfkanals und der Probenahme und somit zu einer Veränderung des Aerosols. Dies würde einerseits bedeuten, dass die gemessene Anzahlgrößenverteilung nicht die Größenverteilung am Punkt der Probenahme im Kanal widerspiegelt, die andererseits wiederum auch nicht die Größenverteilung darstellt, die tatsächlich am Filter ankommt. Die Aerosolprobenahme befindet sich im Prüfkanal 60 cm vor dem Filter. Bei einem Volumenstrom von 3.400 m³/h beträgt die Verweilzeit zwischen der Probenahme und dem Filter ca. 0,23 s und bei 4.250 m³/h etwa 0,18 s.

Tabelle 4.4-1: Parameter der lognormalen Anzahlgrößenverteilungen der NaCl Testaerosole vor der Filterebene im Prüfstand gemäß EN779

Filterprüf- volumenstrom [m ³ /h]	NaCl Lösung [g/l]	Förderrate der Lösung [ml/h]	Lochblech	Modaldurch- messer [nm]	σ_g	Anzahl- konzentration [1/cm ³]
3400	0,5	30	none	4,4	1,29	1.7E+07
	0,5	40	none	4,6	1,29	2.3E+07
	0,5	50	none	4,8	1,3	2.6E+07
	0,5	90	none	5,3	1,28	3.2E+07
	1	90	none	6,2	1,35	4.1E+07
	10	90	none	13,3	1,46	5.5E+07
	50	90	none	21,3	1,5	5.2E+07
	10	50	25 holes	38,5	1,44	1.5E+06
	20	90	25 holes	53,3	1,39	1.4E+06
	80	90	25 holes	79,1	1,4	1.3E+06
	5	90	48 holes	20,2	1,45	7.0E+06
4250	0,5	30	none	3,5	1,24	2.3E+07
	0,5	40	none	3,8	1,25	3.4E+07
	0,5	50	none	4,1	1,27	3.9E+07
	0,5	90	none	4,6	1,3	5.3E+07
	1	90	none	5,1	1,31	6.7E+07
	10	90	none	9,6	1,46	8.1E+07
	50	90	none	15,7	1,58	6.7E+07
	10	50	25 holes	33,4	1,45	1.9E+06
	20	90	25 holes	47,8	1,4	1.8E+06
	80	90	25 holes	68,5	1,39	1.7E+06
	5	90	48 holes	20,2	1,47	6.6E+06

Die Änderung der Anzahlkonzentration beim Transport von der Probenahmeebene zur Filterebene lässt sich wie folgt abschätzen [9]:

$$N(t) = \frac{N_0}{1 + N_0 \cdot K \cdot t}$$

Hierin ist N_0 die Anfangszahlkonzentration, t die Zeit und K der sog. Koagulationskoeffizient:

$$K = 4\pi \cdot d_p \cdot D$$

mit dem Diffusionskoeffizienten D . Die Änderung der Partikelgröße lässt sich durch folgende Gleichung abschätzen:

$$d_p(t) = d_{p,0} \sqrt[3]{1 + N_0 \cdot K \cdot t}$$

Die relativen Änderungen der Anzahlkonzentration sowie des Partikeldurchmessers

während des Transports von der Probenahme- zur Filterebene ist in Abbildung 4.4-4 gezeigt. Hierfür wurde eine Partikelkonzentration von $5 \times 10^7 \text{ l/cm}^3$ in der Probenahmeebene angenommen. Man erkennt, dass der Einfluss der Koagulation mit abnehmender Partikelgröße zunimmt. Die Konzentration von 5 nm Partikeln verringert sich auf dem Weg von der Probenahme- zur Filterebene um ca. 14,2% bzw. 11,7% bei $3.400 \text{ m}^3/\text{h}$ bzw. $4.250 \text{ m}^3/\text{h}$. Derweil wachsen die Partikeldurchmesser um 5,2% bzw. 4,2%. Diese Änderungen sind also insbesondere für sehr kleine Partikel nicht vernachlässigbar. Gleichzeitig ließe sich die Koagulation aber nur verringern, indem entweder die Konzentration oder die Verweilzeit zwischen der Probenahme- und der Filterebene verringert wird. Eine Verringerung der Konzentration ist zum einen nur sehr schwer umsetzbar und zum anderen aufgrund der dadurch bedingten schlechteren Zählstatistik bei Reingasmessungen nicht wünschenswert. Eine Verringerung der Verweilzeit zwischen Probenahme- und Filterebene ließe sich nur durch eine Verschiebung der Probenahmesonde realisieren, was aber konstruktiv nicht umsetzbar ist.

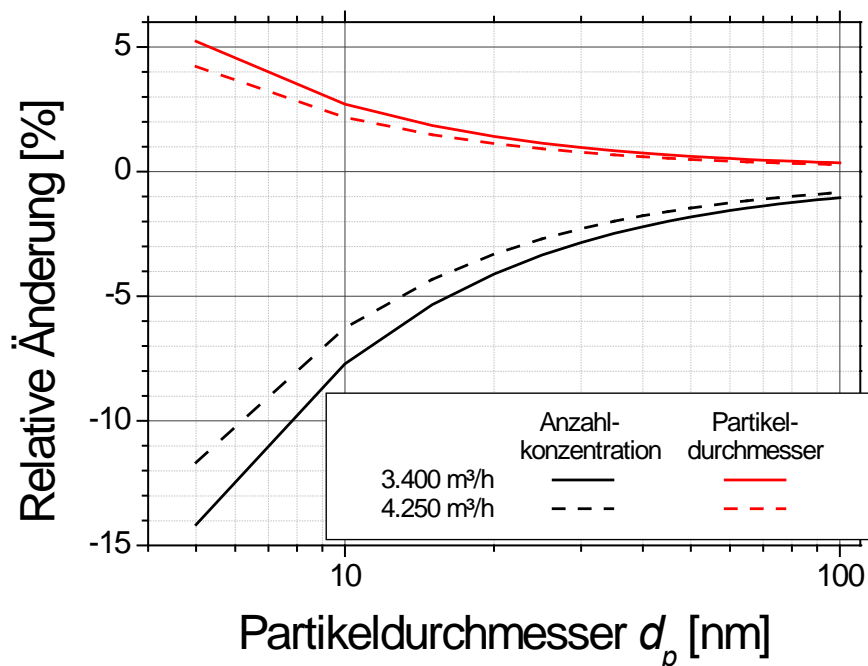


Abbildung 4.4-4: Koagulationsbedingte, relative Änderung der Anzahlkonzentration und des Partikeldurchmessers als Funktion des Ausgangsdurchmessers während des Transports von der Probenahmeebene zur Filterebene; Anfangskonzentration $5 \times 10^7 \text{ l/cm}^3$

Tatsächlich relevant für die Bestimmung des Fraktionsabscheidegrades von Filterkassetten ist die Größenverteilung des Prüfaerosols in der Filterebene. Um trotz der dynamischen Aerosolveränderungen im Prüfkanal diese bestimmen zu können,

wurde bei den Messungen der Größenverteilungen jeweils die Absauggeschwindigkeit in der Probenahme durch Verwendung einer zusätzlichen Pumpe so erhöht, dass die Verweilzeit des Aerosols in der Probenahmesonde und dem Probenahmeschlauch exakt der Verweilzeit des Aerosols im Prüfkanal zwischen Probenahme und Filter entspricht. Somit ist gewährleistet, dass das Aerosol in der Probenahme die gleichen Änderungen erfährt, wie im Prüfkanal, sodass die gemessenen Größenverteilungen repräsentativ sind für das Aerosol in der Filterebene. Da die Verweilzeit auch die Partikelverluste in der Probenahme bestimmt, wurden bei Rohgas- und Reingasmessungen daher immer dieselben Probenahmeverfahrenströme verwendet. Durch die anschließende Verhältnisbildung zur Bestimmung des Fraktionsabscheidegrades kürzen sich die Partikelverluste somit heraus.

Abbildung 4.4-3 zeigt zudem, dass durch die direkte Einbringung des Aerosols in den Prüfkanal Modaldurchmesser von maximal ca. 20 nm erreicht werden können. Um den Größenbereich von Nanopartikeln adäquat abbilden zu können, ist dies allerdings noch zu wenig. Eine Möglichkeit, auch größere Partikel bereitstellen zu können, besteht darin, die Verweilzeit des frisch produzierten Aerosols vor der Einbringung in den Prüfkanal zu erhöhen, um das Quenchen hinauszuzögern. Zunächst wurde hierzu die Zuführung zum Prüfkanal durch ein Rohr mit einem Durchmesser von 110 mm und variabler Länge verlängert. Es zeigte sich hierdurch aber nur eine sehr geringfügige Verschiebung der Größenverteilung zu größeren Partikeln. Zum besseren Verständnis wurde die Strömungsgeschwindigkeit am Einlass zu der Zuführung mithilfe eines Flügelradanemometers gemessen und daraus der Volumenstrom und die Verweilzeit für unterschiedliche Rohrlängen bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.4-2 zusammengetragen. Die Verweilzeit im Rohr ohne weitere Maßnahmen beträgt demnach nur zwischen ca. 20 ms und 50 ms, sodass sich die Aerosole nur sehr geringfügig verändern.

Um die Verweilzeit weiter zu erhöhen, wurde darüber hinaus die Möglichkeit geschaffen, ein Lochblech als Drossel in das Rohr einzubauen. Hierdurch steigt der Druckverlust, sodass ein vielfach geringerer Volumenstrom angesaugt und somit die Verweilzeit auf bis zu ca. 2 s erhöht wird (siehe Tabelle 4.4-2). Es stehen zwei verschiedene Lochbleche zur Verfügung, eines mit 25 und eines mit 48 Löchern mit Durchmessern von jeweils 3 mm. Abbildung 4.4-5 zeigt die verlängerte Aerosolzuführung zum Prüfkanal, sowie die Lochblende mit 48 Löchern.

Die mithilfe der verlängerten Zuführung und den zwei Lochblenden gemessenen Größenverteilungen sind in Abbildung 4.4-6 wiederum für Filterprüfvolumenströme von 3.400 m³/h und 4.250 m³/h gezeigt.

Tabelle 4.4-2: Volumenstrom und Verweilzeit in der Zuführung für unterschiedliche Volumenströme im Prüfkanal sowie unterschiedliche Rohrlängen

Filterprüf-volumen-strom [m ³ /h]	Zuführung Länge [mm]	Lochblech	Volumenstrom in Zuführung [m ³ /h]	Verweilzeit in Zuführung [s]
3400	338	kein	561,0 ± 7,04	0,021 ± 0,0003
	840	kein	632,6 ± 4,46	0,047 ± 0,0003
	1400	25 Löcher	24,7 ± 0,20	2,010 ± 0,0167
	1400	48 Löcher	65,4 ± 0,20	0,759 ± 0,0024
4250	338	kein	631,6 ± 14,64	0,019 ± 0,0004
	840	kein	746,1 ± 0,74	0,040 ± 0,0000
	1400	25 Löcher	29,9 ± 0,41	1,660 ± 0,0229
	1400	48 Löcher	80,3 ± 0,54	0,619 ± 0,0042

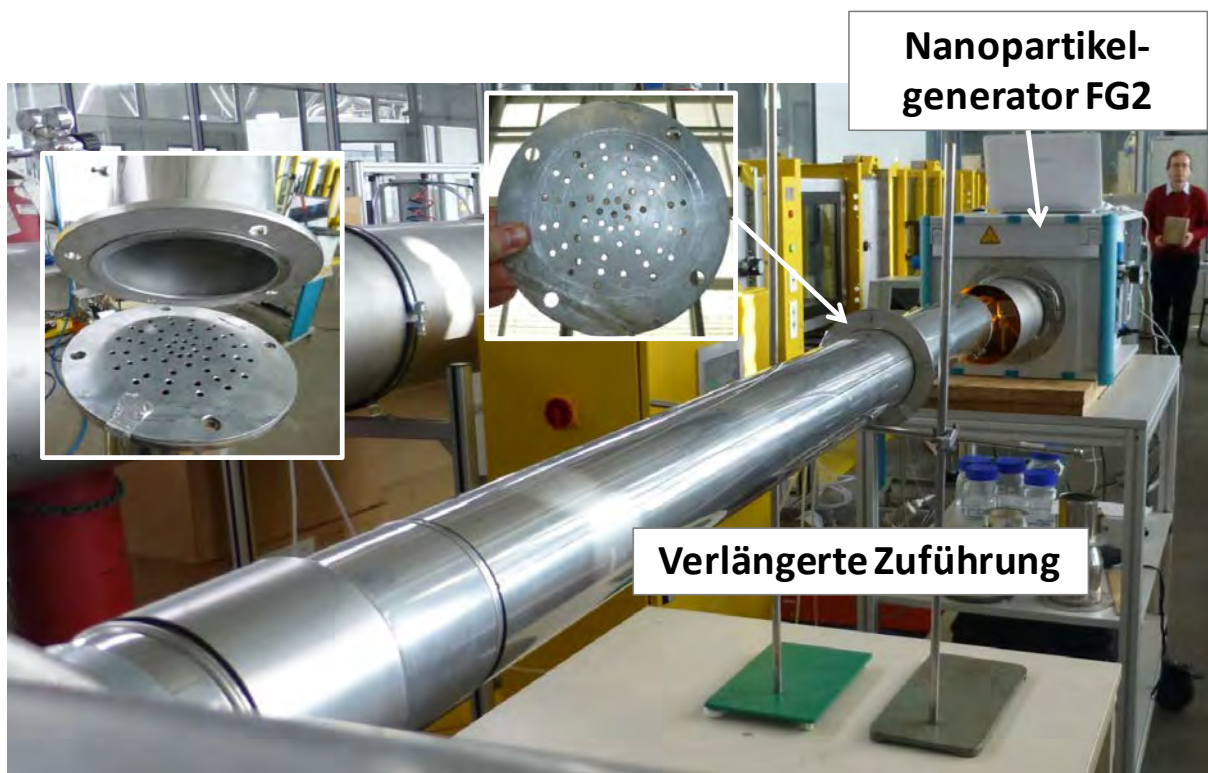


Abbildung 4.4-5: Verlängerte Aerosolzuführung mit Lochblende

Man erkennt, dass die Partikel durch die verlängerte Verweilzeit vor der Einbringung in den Prüfkanal gegenüber der direkten Einbringung (Abbildung 4.4-3) deutlich größer geworden sind. Die Größenverteilungen sind auch hier auf die Konzentration im Modaldurchmesser normiert dargestellt. Die Parameter der Lognormalverteilungen können Tabelle 4.4-1 entnommen werden. Die Lochblende mit 25 Löchern erzeugt einen höheren Druckverlust und somit einen niedrigeren Volumenstrom und eine längere Verweilzeit. Folgerichtig wachsen die Partikel bei

Verwendung des Lochblechs mit 25 Löchern am stärksten an. Mit einer NaCl-Lösung von 80 g/l und einer Förderrate von 90 ml/h ergab sich so ein Modaldurchmesser von 79,1 nm bei 3.400 m³/h bzw. von 68,5 nm bei 4.250 m³/h. Die Anzahlkonzentrationen sind gegenüber der direkten Einbringung des Aerosols aufgrund der verstärkten Koagulation deutlich gesunken. Sie liegen jedoch in allen Fällen immer noch deutlich oberhalb von 10⁶ 1/cm³ (s. Tabelle 4.4-1), was als ausreichend hoch betrachtet werden kann. Hierbei ist auch zu bedenken, dass die Abscheideeffizienz der Filter in diesem Partikelgrößenbereich mit zunehmendem Partikeldurchmesser abnimmt, sodass auch mit geringeren Rohgaskonzentrationen schon ausreichende reingasseitige Zählstatistiken erzielt werden können.

Mithilfe eines Aerosol Elektrometers (TSI Modell 3068B) wurde zudem der Ladungszustand des Aerosols überprüft. Es zeigte sich, dass das Aerosol in allen Fällen nahezu ungeladen war, sodass von einem bipolaren Ladungsgleichgewicht der Partikel ausgegangen werden kann. Die Erkenntnis deckt sich mit den Ergebnissen anderer Studien, welche die Ladungsverteilung von Aerosolen aus Hochtemperaturprozessen untersucht haben [28].

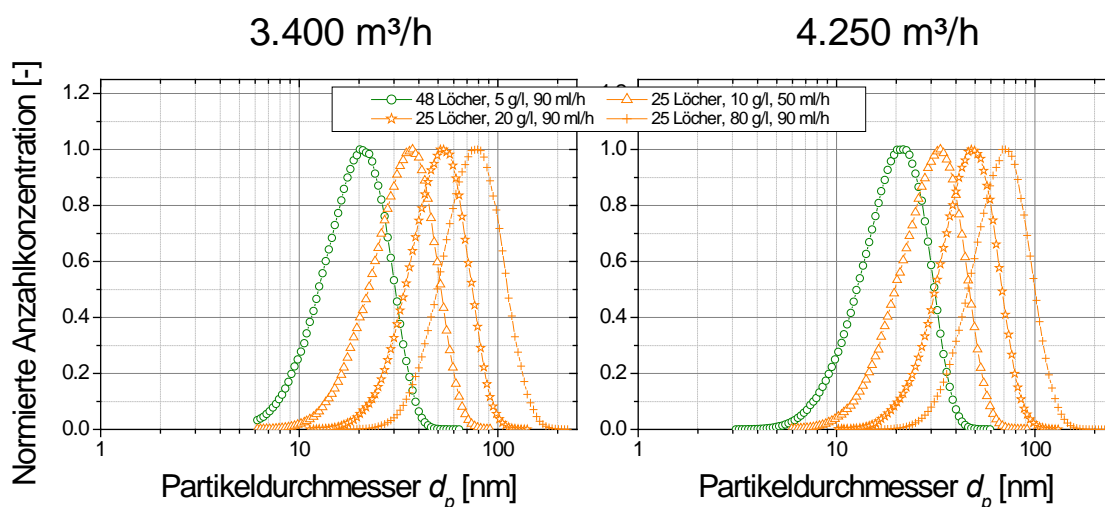


Abbildung 4.4-6: Normierte Anzahlgrößenverteilungen im Prüfkanal, gemessen mit unterschiedlichen NaCl-Konzentrationen und Förderraten mit 48-Loch (grün) und 25-Loch (orange) Lochblech

Die mit dem Nanopartikelgenerator FG2 produzierbaren Größenverteilungen erlauben es, den Fraktionsabscheidegrad im diffusionsdominierten Partikelgrößenbereich bis hinunter zu mindestens 5 nm zu vermessen. Eine Aussage über den Mindestabscheidegrad im sog. Most Penetrating Particle Size (MPPS) lässt sich hiermit allerdings meist nicht treffen, da dieser üblicherweise im Bereich 200 nm

bis 300 nm liegt. Hierzu ist es notwendig, größere Partikel zu erzeugen. Dies kann durch Verwendung eines Atomizers zur Erzeugung eines DEHS Aerosols erfolgen (s. Abbildung 4.4-2). Da ein Atomizer allerdings einen erheblich geringeren Partikelanzahlstrom erzeugt als der Nanopartikelgenerator FG2, sind die Anzahlkonzentrationen im Prüfkanal erheblich geringer. Zur Vermessung der Größenverteilung des DEHS Aerosols im Prüfkanal wurde wiederum ein SMPS verwendet, allerdings ausgestattet mit einem langen DMA (Modell 3081), sodass größere Partikel im Bereich von ca. 15 nm bis 750 nm erfasst werden können. Per Atomizer produzierte DEHS Aerosole weisen üblicherweise Größenverteilungen mit einem Modaldurchmesser zwischen 200 nm und 300 nm und eine eher breite Verteilung ($\sigma_g \approx 2$) auf, sodass sie nicht vollständig durch das SMPS erfasst werden können. Hierdurch kommt es in der Bestimmung der Größenverteilung durch die sog. Mehrfachladungskorrektur [29] zu Artefakten. Im vorliegenden Fall wurde daher die gemessene Rohdatenverteilung durch einen Fit ersetzt und die Mehrfachladungskorrektur anschließend manuell durchgeführt. Hierdurch ergibt sich auch die Möglichkeit, die Größenverteilung bis hin zu 3 μm zu extrapolieren. Die entsprechenden Anzahlgrößenverteilungen sind in Abbildung 4.4-7 für Filterprüfvolumenströme von 3.400 m^3/h und 4.250 m^3/h dargestellt.

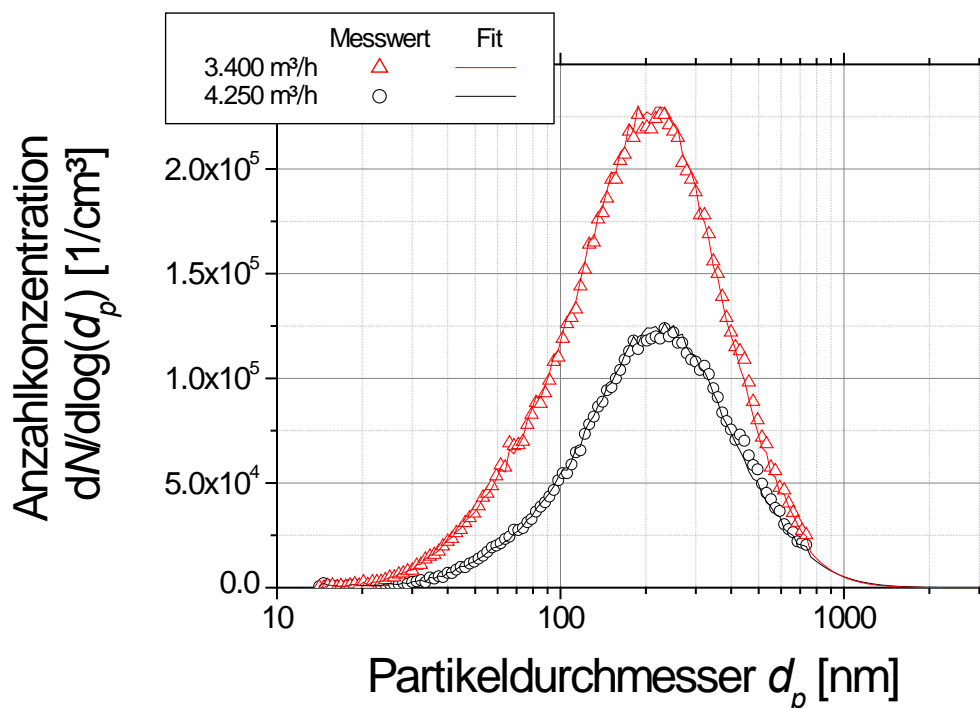


Abbildung 4.4-7: Anzahlgrößenverteilungen des DEHS Aerosols im Prüfkanal bei Volumenströmen von 3.400 m^3/h (rot) und 4.250 m^3/h (schwarz)

Man erkennt, dass sich, aufgrund der erheblich niedrigeren Konzentration im

Vergleich zu den NaCl Aerosolen, durch eine Erhöhung des Filterprüfvolumenstroms die Größe der Partikel kaum ändert. Durch die stärkere Verdünnung nimmt bei höherem Volumenstrom lediglich die Anzahlkonzentration ab. Bei 3.400 m³/h beträgt dieser etwa 150.000 1/cm³, bei 4.250 m³/h hingegen lediglich 85.000 1/cm³.

Um die räumliche Homogenität des Aerosols in der Filterebene zu bestimmen, wurde ein Rahmen verwendet, der es erlaubt, an neun gleichmäßig über der Querschnittsfläche verteilten Positionen, Proben zu entnehmen. Hierzu wurde mit dem Nanopartikelgenerator ein Aerosol mit einem Modaldurchmesser von ca. 11 nm produziert und an den neun Positionen bei Filterprüfvolumenströmen von 1.700 m³/h, 3.400 m³/h und 4.250 m³/h vermessen. Es zeigte sich, dass für alle Volumenströme die Anzahlkonzentrationen an allen neun Messpositionen um max. ±10% voneinander abweichen.

4.4.2 Entwicklung der Messmethodik

Bei der Entwicklung der Messmethodik muss allgemein unterscheiden werden, ob die reingasseitige Partikelkonzentration noch ausreichend hoch ist, um die Anzahlgrößenverteilung zu bestimmen oder nicht. Für niedereffiziente Filter ist dies der Fall, sodass hierfür die roh- und reingasseitigen Anzahlgrößenverteilungen gemessen und ins Verhältnis gesetzt werden. Für hocheffiziente Filter ist die reingasseitige Partikelkonzentration für eine Messung der Größenverteilung zu gering, sodass mit monodispersen Partikeln gemessen werden muss. Eine Abschätzung darüber, welche Filter mit den vorliegenden Methoden mit polydispersen und welche mit monodispersen Aerosolen vermessen werden müssen, ist in Tabelle 4.4-3/Tabelle 4.4-1 gegeben.

4.4.2.1 Messmethodik zur Bestimmung des Fraktionsabscheidegrades von niedereffizienten Filterkassetten mit polydispersen Partikeln

Im Falle niedereffizienter Filter lassen sich die roh- und reingasseitigen Anzahlgrößenverteilungen messen und ins Verhältnis setzen, um so den Fraktionsabscheidegrad zu bestimmen. Aufgrund der sehr hohen Anzahlkonzentrationen, die der Nanopartikelgenerator bereitstellt, lässt sich diese Methode auch noch für vergleichsweise hohe Abscheidegrade anwenden. Geht man davon aus, dass zur Bestimmung einer Anzahlgrößenverteilung von Nanopartikeln mit einem SMPS die Konzentration mindestens einige Tausend Partikel pro Kubikzentimeter betragen muss, so lassen sich bei rohgasseitigen Konzentration von $\geq 10^7$ 1/cm³ Fraktionsabscheidegrade >99,9% ermitteln. Einschränkend sei allerdings erwähnt, dass nicht die gesamte Verteilungsbreite der Prüfaerosole ausgewertet werden kann, da die Konzentrationen zu den Rändern hin zu stark abnimmt. Darüber

hinaus sind die Verteilungen mit geometrischen Standardabweichungen von $\sigma_g \leq 1,50$ sehr schmal, sodass die Konzentrationen jenseits des Modaldurchmessers sehr schnell abnehmen. Empirisch zeigte sich, dass die Daten nur jeweils für den Größenbereich $0,5 \cdot d_{mode} \leq d_p \leq 1,5 \cdot d_{mode}$ sinnvoll auswertbar sind. Durch Verwendung von verschiedenen Prüfaerosolen, die im o. g. eingeschränkten Größenbereich eine Überlappung aufweisen, lässt sich so der Fraktionsabscheidegrad bestimmen. Mit den in Tabelle 4.4-1 angegebenen Parametern der Größenverteilungen und der unteren Grenze des SMPS lässt sich somit bei einem Volumenstrom von 3.400 m³/h der Größenbereich von 2,5 nm bis ca. 120 nm und bei 4.250 m³/h von 2,5 nm bis ca. 100 nm abdecken.

Abbildung 4.4-8 zeigt den so bestimmten Fraktionsabscheidegrad eines niedereffizienten Filters. Hierzu wurden sechs mit dem Nanopartikelgenerator FG2 produzierte NaCl Aerosole mit Modaldurchmessern von 6 nm (schwarz), 10 nm (rot), 18 nm (grün), 26 nm (blau), 34 nm (magenta) und 43 nm (dunkelgelb) sowie ein mittels Atomizer produziertes DEHS Aerosol (orange) verwendet. Man erkennt, dass die mit den einzelnen NaCl-Aerosolen bestimmten Fraktionsabscheidegrade in den Überlappungsbereichen jeweils sehr gut übereinstimmen. Ebenso zeigt sich eine tolerable Übereinstimmung mit den Ergebnissen für das DEHS Aerosol im überlappenden Größenbereich zwischen ca. 60 nm und 90 nm. Die geringfügigen Abweichungen zwischen den Daten für NaCl und DEHS wurden ebenfalls bei den Untersuchungen mit Medienproben im vorliegenden Projekt (s. Kapitel 4.1) sowie in publizierten Studien (z. B. [30]) beobachtet. In allen Fällen lag die Abscheideeffizienz für DEHS Tropfen niedriger als für Feststoffpartikel. Es kann also von einer systematisch niedrigeren Effizienz für DEHS als für NaCl oder andere Feststoffe ausgegangen werden. Die wissenschaftliche Literatur liefert für dieses Phänomen bisher aber keine Erklärung.

Man erkennt zudem, dass die mit den DEHS-Aerosolen bestimmten Fraktionsabscheidegrade eine wesentlich höhere Streuung aufweisen als die mit NaCl-Aerosolen gemessenen Daten. Dies ist auf die sehr stark unterschiedlichen Anzahlkonzentrationen zurückzuführen. Während die Konzentrationen der NaCl Partikel sehr hoch sind, führt die niedrige Konzentration des DEHS zu einer wesentlich verschlechterten Zählstatistik im SMPS und somit zu einer höheren statistischen Unsicherheit.

Abbildung 4.4-8 zeigt zudem anschaulich, dass selbst eher niedrigeffiziente Filterkassetten mit einem minimalen Abscheidegrad im MPPS von ca. 40% trotzdem sehr hohe Effizienzen für sehr kleine Nanopartikel aufweisen können. Das Ergebnis ist gut vergleichbar mit den an Filterronden gewonnenen Daten (s. Abschnitt 4.1). Im

vorliegenden Fall liegt die mittlere Effizienz für das Aerosol mit einem Modaldurchmesser von 6 nm bei $(99,20 \pm 0,20)\%$.

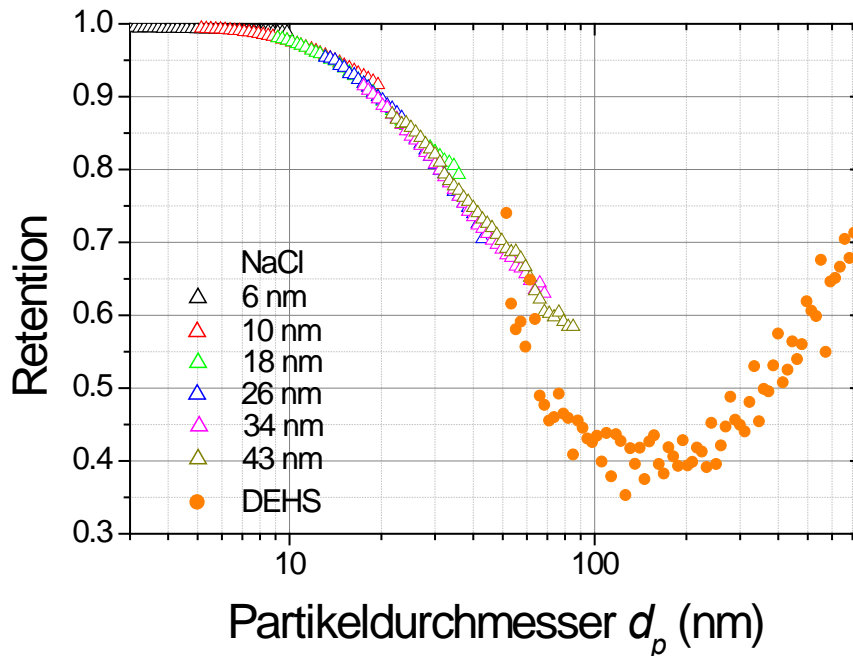


Abbildung 4.4-8: Fraktionsabscheidegrad eines niedereffizienten Filters, gemessen durch Verwendung von sechs verschiedenen NaCl Aerosolen mit Modaldurchmessern zwischen 6 nm und 43 nm, sowie einen DEHS Aerosol

Basierend auf den gemessenen Größenverteilungen und Anzahlkonzentrationen der Prüfaerosole im Prüfkanal, sowie den Fraktionsabscheidegraden von Flachfiltermedien (Forschungsstelle 2) wurden die reingasseitigen Anzahlkonzentrationen für einen F7, F9, E10 und H13 Filter abgeschätzt (s. Tabelle 4.4-3). Demnach ist eine Messung mit polydispersen Partikeln bis mindestens zur Filterklasse E10 möglich. Für höher effiziente Filter hingegen ist eine Messung mit monodispersen Partikeln erforderlich.

Tabelle 4.4-3: Abschätzung der reingasseitigen Partikelkonzentrationen sowie Ableitung der Messmethode für F7, F9, E10 und H13 Filter

Partikelgröße (Modalwert) [nm]	Rohgas- konz. [1/cm ³]	F7		F9		E10		H13	
		Reingas- konz. [1/cm ³]	Mess- methode	Reingas- konz. [1/cm ³]	Mess- methode	Reingas- konz. [1/cm ³]	Mess- methode	Reingas- konz. [1/cm ³]	Mess- methode
5 nm (NaCl)	3×10^7	1.9×10^5	polydispers	1.5×10^4	polydispers	3×10^3	polydispers	10	monodispers
60 nm (NaCl)	2×10^6	9.2×10^5	polydispers	2.2×10^5	polydispers	4×10^4	polydispers	40	monodispers
166 nm (DEHS)	1×10^5	6.1×10^4	polydispers	1.8×10^4	polydispers	3×10^3	polydispers	37	monodispers

4.4.2.2 Messmethodik zur Bestimmung des Fraktionsabscheidegrades von hocheffizienten Filterkassetten mit monodispersen Partikeln

Wenn die reingasseitige Anzahlkonzentration aufgrund der hohen Abscheideeffizienz des Filters zu gering ist, um noch die Anzahlgrößenverteilung der Partikel messen zu können, so müssen analog zur Vermessung von Flachfiltermedien gemäß DIN EN 1822 monodisperse Partikel verwendet werden (vgl. Abschnitt 4.1.1). Durch die Verwendung monodisperser Partikel ist es ausreichend, diese vor und hinter dem Filter zu zählen. Moderne Kondensationspartikelzähler weisen dabei so geringe Fehlzählraten auf, dass auch die Bestimmung sehr niedriger Konzentrationen möglich ist. Im Falle von Flachfiltermedien werden die monodispersen Partikel mithilfe eines differentiellen Mobilitätsanalysators (DMA) aus einem polydispersen Aerosol extrahiert. Diese Methode ist bei der Prüfung konfektionierter Filterkassetten aufgrund der hohen Volumenströme jedoch nicht anwendbar. Die höchsten bisher realisierten DMA-Volumenströme liegen bei 6 m³/h (100 l/min [31]) bzw. 30 m³/h (500 l/min [32]). Im vorliegenden Forschungsvorhaben musste daher ein etwas anderer Weg verfolgt werden, bei dem der Filter weiterhin mit einem polydispersen Aerosol beaufschlagt wird. Roh- und reingasseitig wird dem Prüfaerosol im Prüfkanal vergleichbar zur Messung mit polydisperssem Aerosol (siehe Abschnitt 4.4.2.1) eine Probe entnommen, neutralisiert und einem DMA zugeführt. Dieser DMA wird mit einer konstanten Spannung betrieben, sodass immer nur Partikel einer schmalen elektrischen Mobilitätsbandbreite extrahiert werden, deren Konzentration dann wiederum mit einem CPC bestimmt wird. Der hierzu verwendete Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.4-9 gezeigt.

Bei der Klassierung mit einem DMA ist jederzeit zu bedenken, dass das klassierte Aerosol monomobil und damit nicht zwangsläufig monodispers ist, da die elektrische Mobilität neben der Partikelgröße d_p auch von der Anzahl n der partikelgetragenen Elementarladungen e abhängt.

$$Z_p = \frac{n \cdot e \cdot c_c(d_p)}{3\pi \cdot \eta \cdot d_p}$$

Hierdurch bedingt existieren immer unterschiedliche Kombinationen von Partikelladung zu Partikeldurchmesser, welche dieselbe elektrische Mobilität aufweisen. Dieser Effekt ist in Abbildung 4.4-10 verdeutlicht. Enthält ein als monodispers angenommenes Aerosol Anteile größerer, mehrfach geladener Partikel, so ändert sich die Abscheideeffizienz des Filter gegenüber dem monodispersen Aerosols, da die größeren, mehrfach geladenen Partikel mit einer anderen Effizienz abgeschieden werden, als die kleineren, einfach geladenen. Ohne eine Korrektur der Messwerte um die mehrfach geladenen Partikel wird durch die Annahme

monodisperser Partikel der Messwert für den Abscheidegrad somit verfälscht.

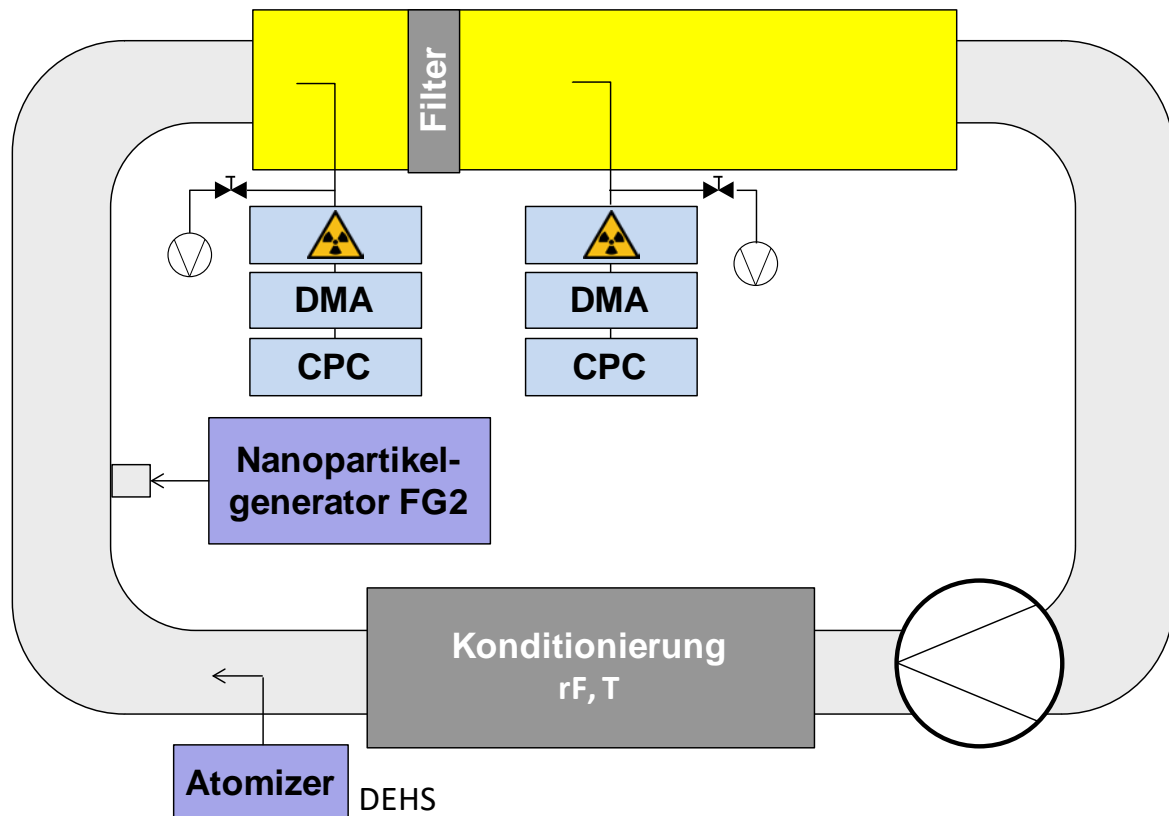


Abbildung 4.4-9: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Fraktionsabscheidegrades konfektionierter Filterkassetten mit monodispersen Partikeln

Durch Verwendung eines Neutralisators mit einer radioaktiven ^{85}Kr Quelle werden die Partikel gemäß einer als bekannt angenommenen bipolaren Ladungsverteilung aufgeladen. Die Ladungsverteilung ist partikelgrößenabhängig, d.h. sehr kleine Partikel ≤ 10 nm sind zum größten Teil ungeladen und nur ein sehr kleiner Anteil der Partikel trägt eine einzelne positive oder negative Elementarladung. Der Anteil mehrfach geladener Partikel (d.h. $n > 1$) ist bei dieser Partikelgröße vernachlässigbar klein. Mit steigender Partikelgröße wächst der Anteil der einfach sowie der mehrfach geladenen Partikel, sodass deren elektrische Mobilität nicht mehr eindeutig einer Partikelgröße zuzuordnen ist. Die Aufladungswahrscheinlichkeit als Funktion des Durchmessers ist für positiv geladene Partikel in Abbildung 4.4-11 dargestellt. Der Berechnung liegt eine numerische Approximation [33] der Ladungsverteilung nach Fuchs [34] zugrunde. Da der hier verwendete DMA ausschließlich positiv geladene Partikel selektiert wurde auf die Darstellung der Wahrscheinlichkeiten für negativ geladene Partikel verzichtet. Man erkennt, dass lediglich 4,1% aller 10 nm Partikel einfach positiv geladen sind, wohingegen 91,2% ungeladen bleiben. Das bedeutet allerdings auch, dass der CPC hinter dem DMA lediglich 4,1% aller 10 nm Partikel im Probenahmestrom messen kann. Die messbare Konzentration verringert sich

hierdurch also deutlich, was insbesondere hinter hocheffizienten Filtern zu langen Messzeiten führt.

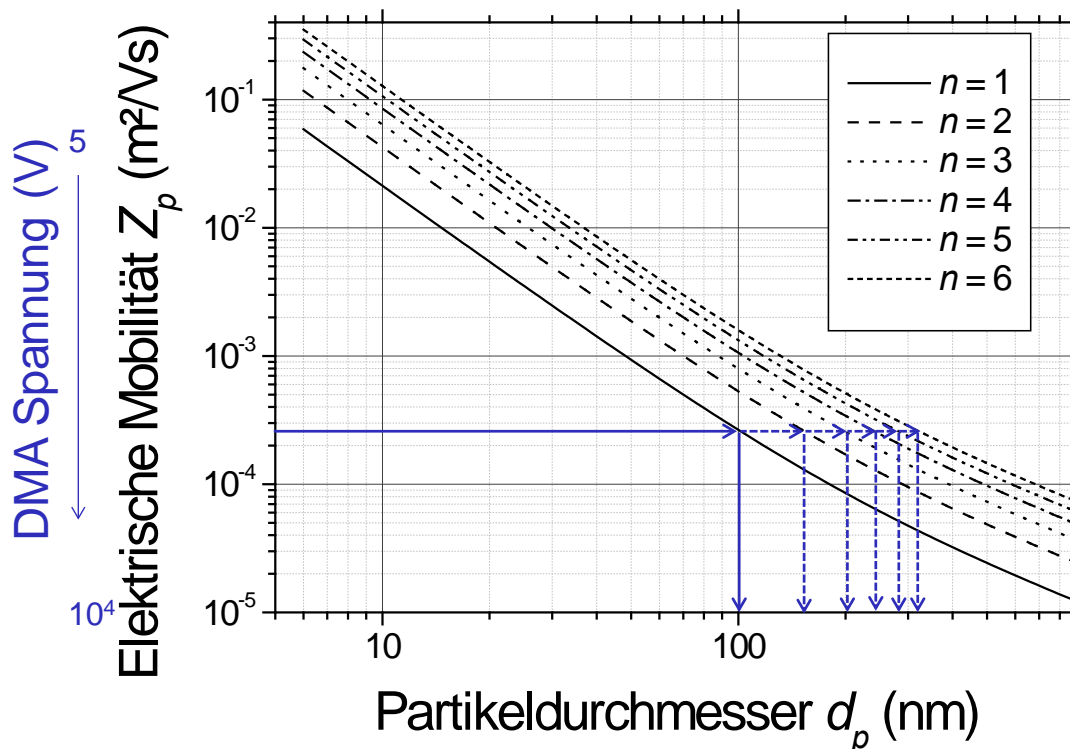


Abbildung 4.4-10: Elektrische Mobilität als Funktion des Partikeldurchmessers für unterschiedliche Partikelladungen

Im Falle von 100 nm großen Partikeln tragen 21,4% der Partikel eine und 3,3% der Partikel zwei Elementarladungen. Der Anteil der zweifach geladenen Partikel ist hier also ggf. nicht mehr vernachlässigbar. Im Falle von 500 nm großen Partikeln beträgt der Anteil der einfach geladenen Partikel nur noch 14,1%, wohingegen 8,9% zwei, 4,4% drei und 1,8% der Partikel vier Elementarladungen tragen.

Klassiert man aus einer polydispersen, lognormalen Verteilung mithilfe eines DMA eine monomobile Fraktion, so ist der Anteil der mehrfach geladenen Partikel neben deren Aufladewahrscheinlichkeiten stark abhängig von der Lage des gewünschten Durchmessers einfach geladener Partikel im Verhältnis zum Modaldurchmesser. Wählt man den Durchmesser der einfach geladenen Partikel deutlich kleiner als den Modaldurchmesser, so ist die Konzentration bei der Größe der zweifach (und ggf. der mehrfach) geladenen Partikel höher als die der einfach geladenen Partikel, sodass die monomobile Fraktion einen verhältnismäßig hohen Anteil größerer, mehrfach geladener Partikel aufweist. Wird hingegen der Durchmesser der einfach geladenen Partikel so gewählt, dass er größer ist als der Modaldurchmesser, so ist die

Konzentration bei den Größen der mehrfach geladenen Partikel immer geringer. Der Konzentrationsunterschied ist dabei umso größer, je schmaler die lognormale Größenverteilung ist. Da die Konzentration der mehrfach geladenen Partikel noch mit der Wahrscheinlichkeit multipliziert werden muss, dass ein Partikel der entsprechenden Größe zwei oder mehr Ladungen trägt, ist die Konzentration der mehrfach geladenen Partikel dann immer deutlich geringer als die Konzentration der einfach geladenen Partikel. Da die mit dem Nanopartikelgenerator erzeugten Partikelgrößenverteilungen zum einen lognormal verteilt und zum anderen sehr schmal sind (s. Tabelle 4.4-1), lassen sich hieraus in guter Näherung (nahezu) monodisperse Partikel klassieren. Abbildung 4.4-12 zeigt exemplarisch drei NaCl Größenverteilungen, die mit dem Generator in Verbindung mit dem EN779 Prüfstand erzeugt wurden. Hieraus sollen nun Partikel mit Durchmessern von 5 nm, 25 nm, 65 nm und 100 nm (jeweils für $n = 1$) klassiert werden. Diese Größen, ebenso wie die Größen der zweifach geladenen Partikel mit der jeweils selben elektrischen Mobilität sind in der Grafik durch durchgezogene bzw. gestrichelte Linien dargestellt.

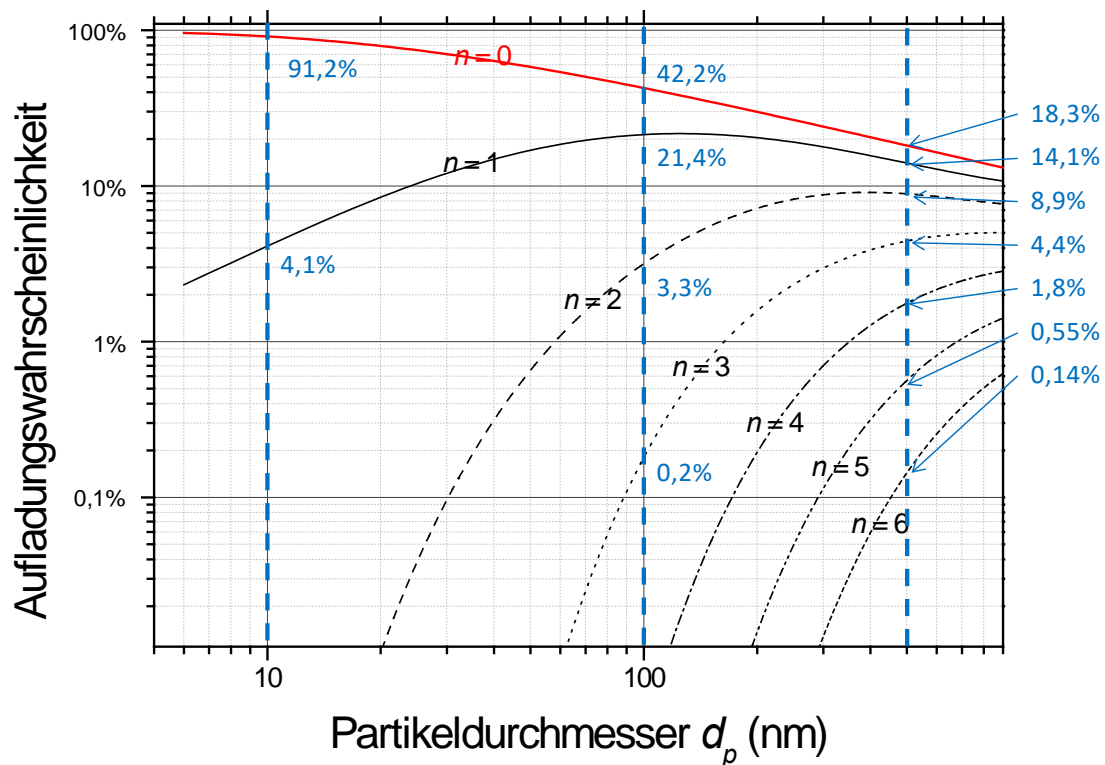


Abbildung 4.4-11: Aufladungswahrscheinlichkeit positiv geladener Partikel infolge einer Neutralisation als Funktion des Partikeldurchmessers [33]

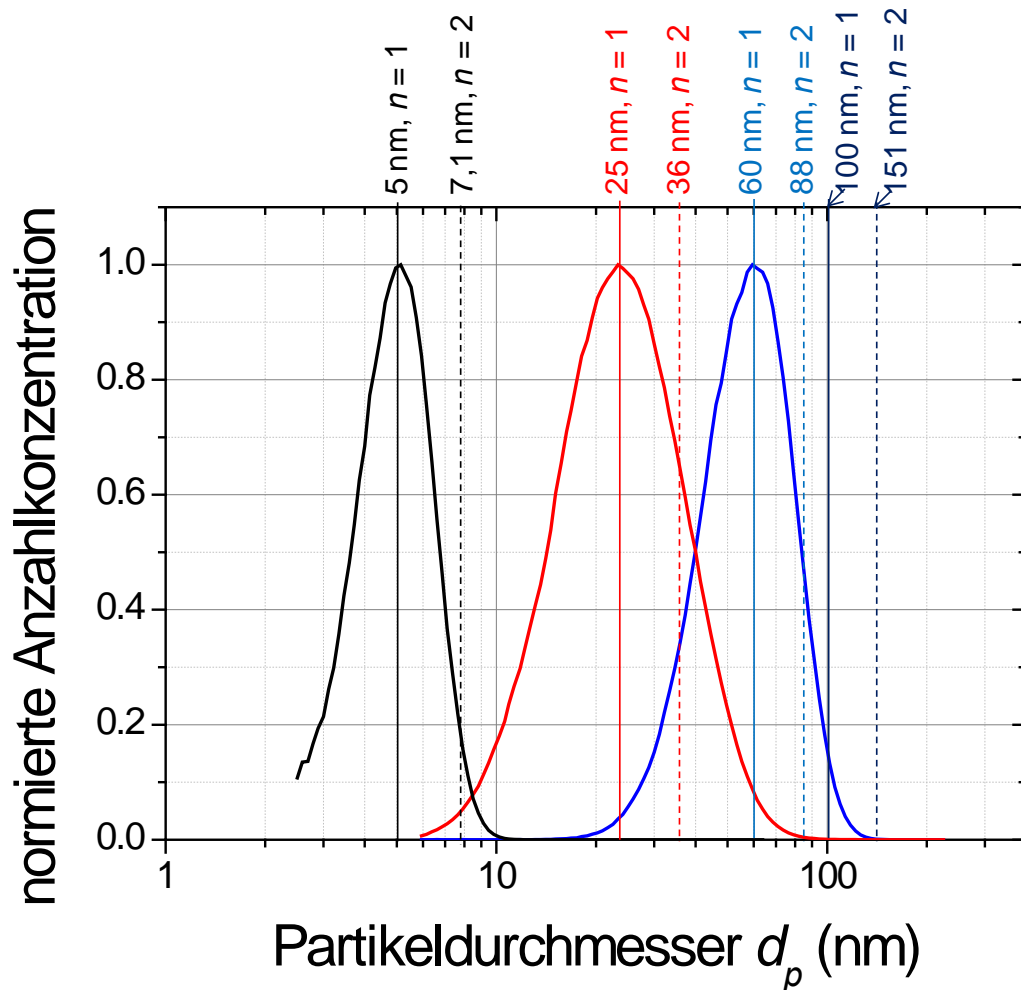


Abbildung 4.4-12: Beispiel für drei Größenverteilungen, aus denen unterschiedliche monomobile Fraktionen mittels DMA klassiert wurden

Die Größenverteilungen der bei den in Abbildung 4.4-12 angegebenen Größen klassierten monomobilen Aerosole sind in Abbildung 4.4-13 gezeigt. Dabei ist zu beachten, dass die 5 nm, 25 nm und 60 nm Partikel jeweils dem Modaldurchmesser der polydispersen Verteilungen entsprechen, die 100 nm Partikel jedoch weitaus größer sind als der Modaldurchmesser. Je nach Wahl des Verhältnisses des Schleierluftvolumenstroms zum Aerosolvolumenstrom im DMA kann die Breite der Verteilung variieren. Für die dargestellten Größenverteilungen wurde je Mode eine geometrische Standardabweichung von 1,1 angenommen. Häufig sind die resultierenden Verteilungen jedoch schmäler.

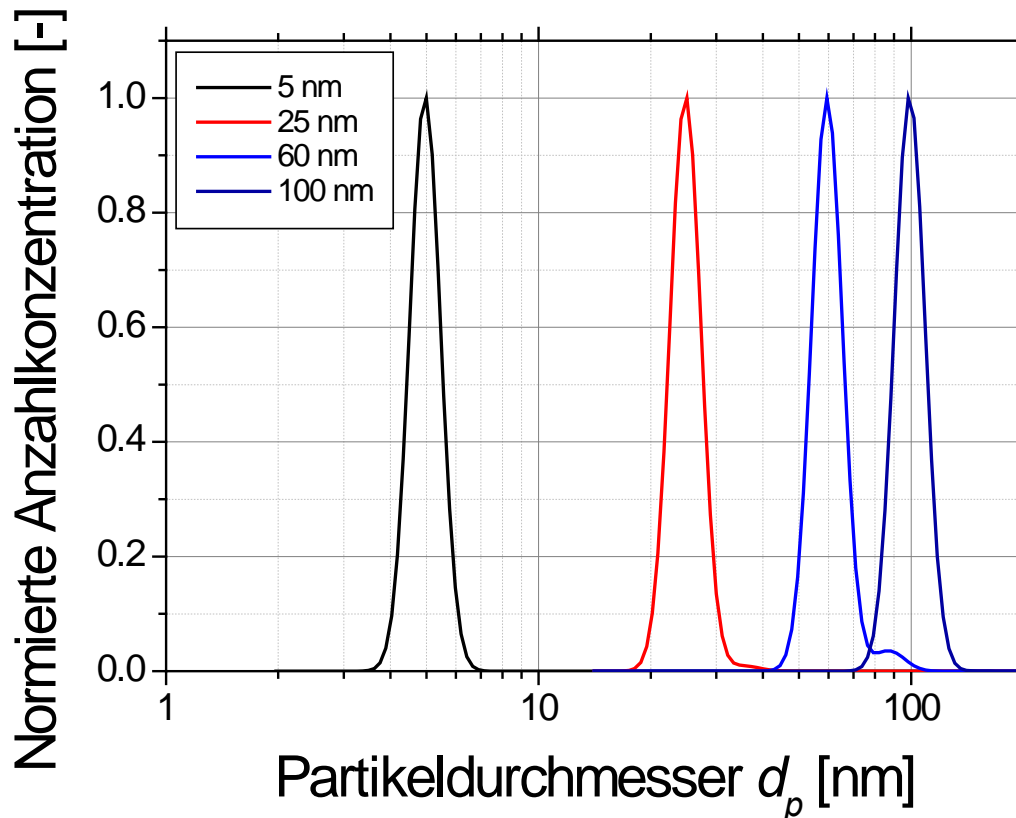


Abbildung 4.4-13: Normierte Anzahlgrößenverteilung der klassierten monomobilen Partikel

Bei der in Abbildung 4.4-13 gezeigten Verteilung für 5 nm Partikel (schwarz) ist kein Anteil größerer, mehrfach geladener Partikel erkennbar. Das liegt daran, dass die Wahrscheinlichkeit, dass ein 7,1 nm großes Partikel zwei Elementarladungen trägt und somit dieselbe elektrische Mobilität besitzt wie ein einfach geladenes 5 nm Partikel, gegen Null tendiert. In der Verteilung für 25 nm Partikel ist ein sehr kleiner, für 60 nm Partikel ein etwas größerer Anteil zweifach geladener 36 nm bzw. 88 nm großer Partikel erkennbar. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein 36 nm Partikel zwei Elementarladungen trägt beträgt 0,2% und ist damit erheblich geringer als die Wahrscheinlichkeit eines 25 nm Partikels einfach geladen zu sein (13,7%). Unter Berücksichtigung der zudem deutlich geringeren Anzahlkonzentration der größeren Partikel ergibt sich somit der nur sehr geringe Beitrag zweifach geladener Partikel. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein 88 nm großes Partikel zwei Elementarladungen trägt beträgt hingegen bereits 2,5% und damit nur noch einen Faktor von 7,4 kleiner als die Wahrscheinlichkeit 60 nm großer Partikel einfach geladen zu sein (18,5%), sodass der Anteil zweifach geladener Partikel hier deutlich ausgeprägter ist. Im Falle der 100 nm großen Partikel hingegen ist kein Anteil zweifach geladener Partikel mehr erkennbar, obwohl die Wahrscheinlichkeit, dass 151 nm große Partikel zwei Ladungen tragen mit 5,5% mehr als ein Viertel der Wahrscheinlichkeit von 100 nm

Partikeln eine Elementarladung zu tragen (21,5%) beträgt. Hierbei ist zu beachten, dass die Partikelgröße von 100 nm wesentlich oberhalb des Modaldurchmessers der ursprünglichen polydispersen Verteilung liegt, sodass die Konzentration für größere Partikel rapide abnimmt und somit die Konzentration von 151 nm großen Partikeln im ursprünglichen Aerosol nur sehr gering ist. Durch eine geschickte Wahl des polydispersen Aerosols und des Durchmessers der einfach geladenen Partikel im Verhältnis zum Modaldurchmesser lässt sich somit ein Aerosol erzeugen, das nur vernachlässigbare Anteile größerer, mehrfach geladener Partikel enthält.

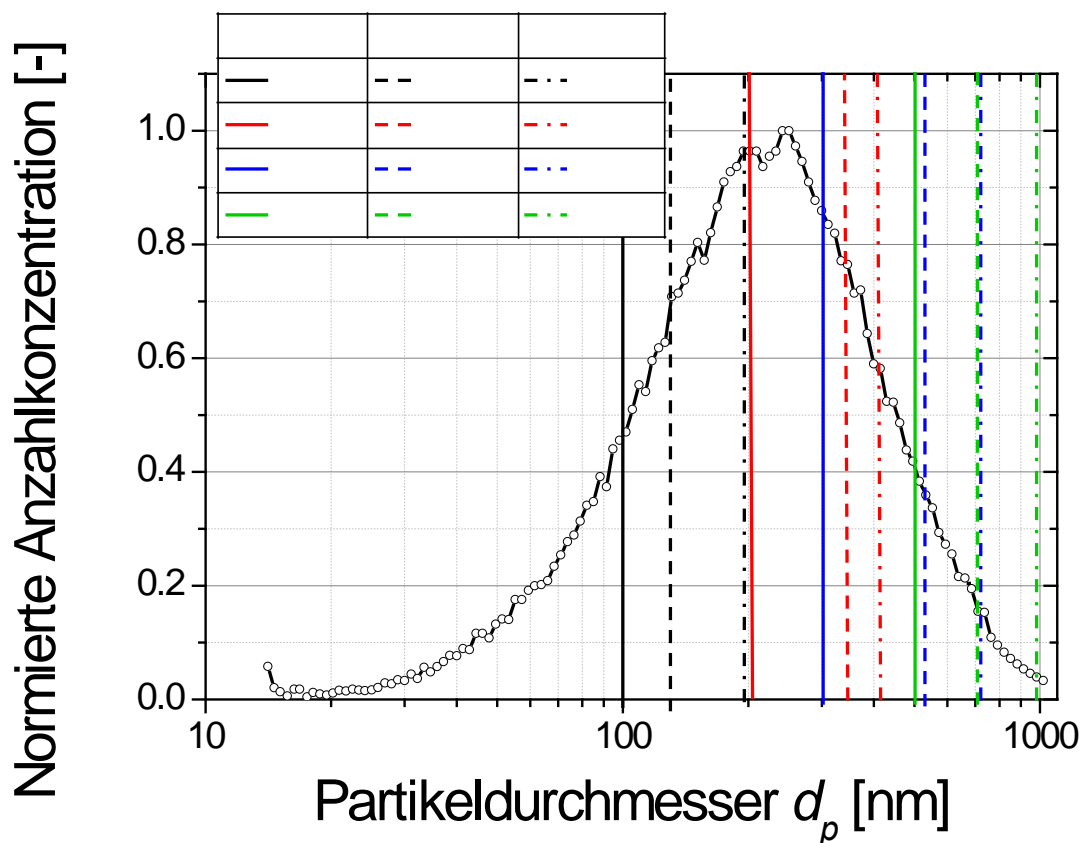


Abbildung 4.4-14: Normierte Anzahlgrößenverteilung eines DEHS Aerosols, die durchgezogenen Linien geben die Größen von 100 nm (schwarz), 200 nm (rot), 300 nm (blau) und 400 nm (grün) an, gestrichelte Linien die Größen zweifach geladener Partikel und strichpunktierte Linien die Größen dreifach geladener Partikel gleicher elektrischer Mobilität

Die Untersuchungen zeigen somit, dass sich durch Klassierung mit einem DMA unter Verwendung der mittels Nanopartikelgenerator FG2 und dem Prüfstand gemäß EN779 produzierten Aerosole monodisperse Partikel im Größenbereich zwischen 5 nm und 100 nm erzeugen lassen.

Generell lässt sich die o.g. Methode ebenfalls nutzen, um Filter auch mit größeren

Partikeln zu testen, um so zum Beispiel das Minimum des Fraktionsabscheidegrades (sog. Most Penetrating Particle Size, MPPS) zu bestimmen. Hierzu sind allerdings Prüfaerosole mit größeren Partikeln notwendig, die sich mit dem Nanopartikelgenerator FG2 nicht bereitstellen lassen. Alternativ kann allerdings, wie in Abbildung 4.4-9 gezeigt, ein Atomizer verwendet werden, um ein DEHS Aerosol zu erzeugen. Die resultierende Partikelgrößenverteilung im Prüfkanal ist in Abbildung 4.4-14 dargestellt. Man erkennt, dass die Kurve nicht so glatt erscheint, wie die Größenverteilungen der NaCl Aerosole. Dies ist darin begründet, dass der mit dem Atomizer bereitgestellte Anzahlstrom der Partikel wesentlich geringer ist als mit dem Nanopartikelgenerator FG2 und sich somit eine wesentlich niedrigere Konzentration im Prüfkanal einstellt, die zu höherer statistischer Unsicherheit bei der Messung des Aerosols führt. Hinzu kommt, dass DEHS stark hydrophob ist und sich daher nicht mit dem für NaCl verwendeten Wasser CPC (TSI Modell 3787) vermessen lässt [35]. Stattdessen wurde hier ein Butanol-basierter CPC (TSI Modell 3776) verwendet, der aber mit 0,05 l/min einen wesentlich geringeren Messvolumenstrom als der Wasser CPC (0,6 l/min) und somit eine schlechtere Zählstatistik aufweist. In Abbildung 4.4-14 sind zudem die Größen von 100 nm, 200 nm, 300 nm und 400 nm Partikeln sowie die Größen der zwei- und dreifach geladenen Partikel eingetragen, welche jeweils die gleiche elektrische Mobilität wie die 100 - 400 nm großen einfach geladenen Partikel aufweisen. Die resultierenden Anzahlgrößenverteilungen der klassierten, monomobilen Aerosole sind in Abbildung 4.4-15 dargestellt. Man erkennt, dass sämtliche monomobilen Aerosole erhebliche Anteile größerer, mehrfach geladener Partikel aufweisen. Dies ist besonders bei der „100 nm“ Verteilung zu sehen. Dies ist dadurch bedingt, dass hierfür der zu klassierende Durchmesser unterhalb des Modaldurchmessers lag und somit die Konzentration bei der Größe der zweifach geladenen Partikel deutlich höher war als die Konzentration der einfach geladenen Partikel. Zusätzlich wirkt sich die wesentlich breitere Verteilung des ursprünglichen polydispersen Aerosols hier negativ aus, da auch bei Klassierung jenseits des Modaldurchmessers immer noch recht hohe Konzentrationen bei den Größen der mehrfach geladenen Partikel vorliegen. Lediglich bei der „400 nm“ Verteilung ist der Anteil der zweifach geladenen Partikel nicht mehr ganz so ausgeprägt wie bei den kleineren Partikeln, da hier die Konzentration bei der Größe der zweifach geladenen Partikel bereits sehr gering ist. Zur Verdeutlichung der Auswirkung der größeren mehrfach geladenen Partikel auf die Messung der Filtereffizienz zeigt Abbildung 4.4-15 zusätzlich den Fraktionsabscheidegrad eines H13 Flachmediums, der an der FS2 gemessen wurde. Da in der Auswertung die dargestellten monomobilen Verteilungen als monodispers angenommen werden müssen, verfälscht sich der Messwert des Fraktionsabscheidegrades dadurch, dass nur die einfach geladenen Partikel die tatsächlich angenommene Partikelgröße besitzen und mit der zu bestimmenden

Effizienz abgeschieden werden, die größeren mehrfach geladenen Partikel hingegen mit anderen Effizienzen, sodass sich in Summe ein verfälschter Messwert für die Filtereffizienz ergibt. Die Bestimmung des MPPS mit dieser Methode kann daher nur als Richtwert, nicht aber als genaue Messung betrachtet werden. Es sei allerdings erwähnt, dass der Fokus dieses Projekts auf der Bestimmung der Effizienz für Nanopartikel, d. h. mit einem Durchmesser ≤ 100 nm lag.

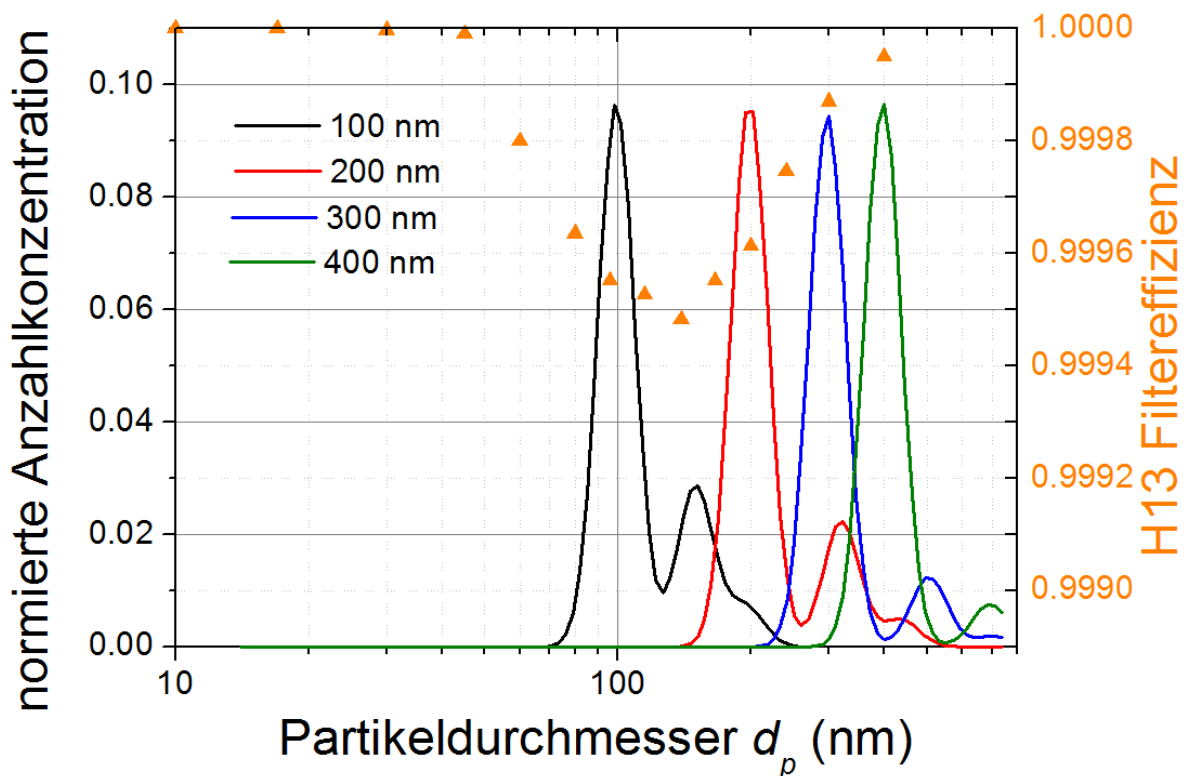


Abbildung 4.4-15: Normierte Anzahlgrößenverteilung der auf 100 nm (schwarz), 200 nm (rot), 300 nm (blau) und 400 nm (grün) klassierten, monomobilen DEHS Aerosole, sowie exemplarischer Fraktionsabscheidegrad eines H13 Filters

Werden die Anteile der mehrfach geladenen Partikel als zu groß angesehen, so lassen sich deren Anteile durch eine geeignete Auswahl der aus dem polydispersen Aerosol zu klassierenden Größen quantifizieren und somit korrigieren. Dies ist insbesondere mit steigendem Partikeldurchmesser sowie für breite polydisperse Ausgangsaerosole relevant. Ein solches Aerosol mit einem CMD von 100 nm und einer geometrischen Standardabweichung von 2,0 ist in Abbildung 4.4-16 gezeigt. Sollen aus diesem Aerosol 100 nm Partikel klassiert werden, so enthält das monomobile Aerosol auch zweifach geladene 151 nm, dreifach geladene 195 nm und vierfach geladene 237 nm große Partikel. Diese Größen sind in der Abbildung durch farbige gestrichelte Linien markiert. Die resultierende Größenverteilung der mittels DMA klassierten monomobilen Fraktion zeigt Abbildung 4.4-17. Hierin sind die

Verteilung der verschiedenen Ladungsfractionen separat in unterschiedlichen Farben dargestellt. Man erkennt deutlich, dass Partikel mit bis zu drei Elementarladungen berücksichtigt werden müssen, wohingegen die Konzentration der vierfach geladenen Partikel vernachlässigbar ist.

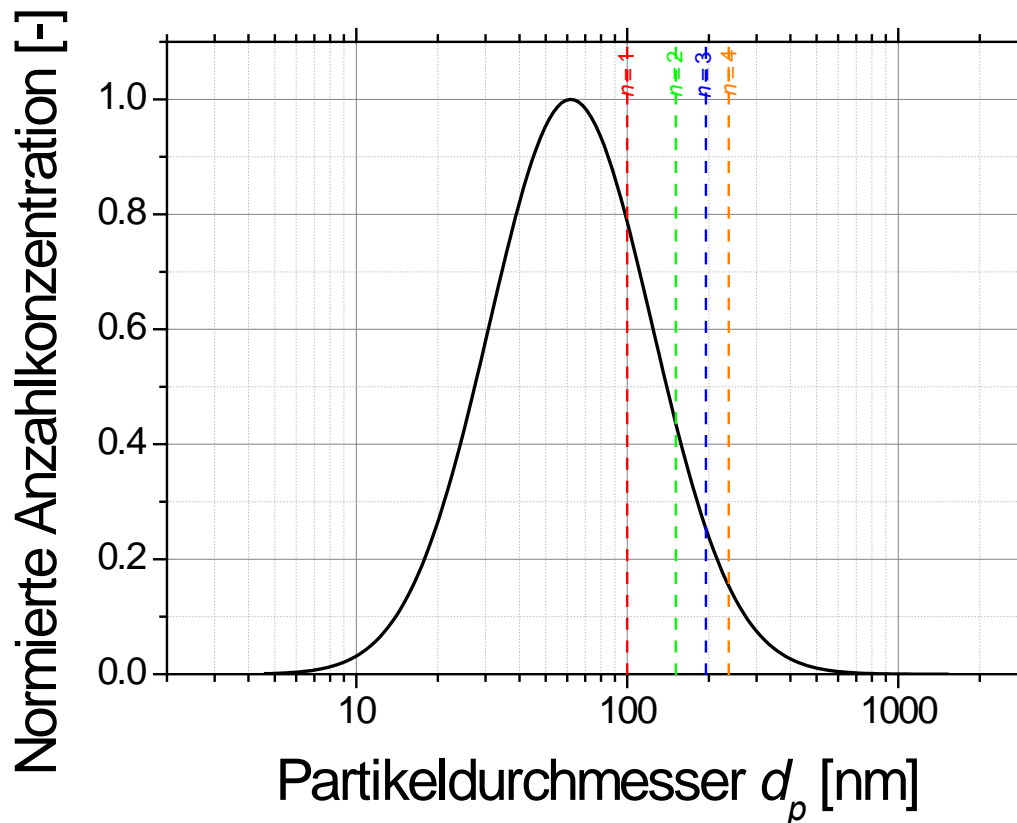


Abbildung 4.4-16: Beispiel für eine polydisperse Verteilung mit einem Mediandurchmesser (CMD) von 100 nm und einer geometrischen Standardabweichung von 2,0 aus dem 100 nm große Partikel klassiert werden sollen (rote gestrichelte Linie); die Größen der zweifach (grün), dreifach (blau) und vierfach (orange) geladenen Partikel mit derselben elektrischen Mobilität sind ebenfalls markiert

Wird mit einem CPC die Anzahlkonzentration der monomobilen Partikel hinter dem DMA bestimmt, so enthält diese sämtliche Partikel, d.h. sie korrespondiert diese mit der gesamten schraffierten Fläche in Abbildung 4.4-17:

$$C_{N,CPC} = \sum_{n=1}^{\infty} C_N(d_{p,n}) \cdot w(d_{p,n}, n)$$

Hierin ist n die Anzahl der partikelgetragenen Elementarladungen, $d_{p,n}$ die Größe der

Partikel, die n Elementarladungen tragen und $w(d_{p,n}, n)$ die Wahrscheinlichkeit, dass ein Partikel der Größe $d_{p,n}$ n Elementarladungen trägt.

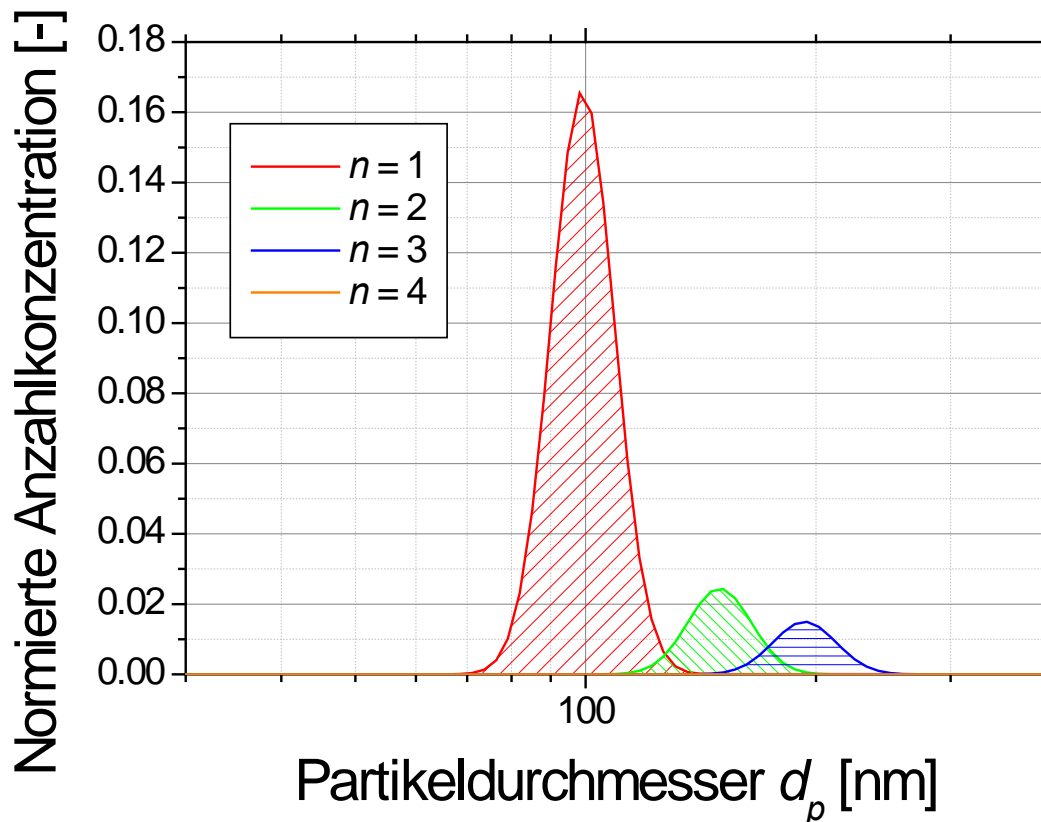


Abbildung 4.4-17: Größenverteilung der monomobilen Fraktion nach Klassierung des in Abbildung 4.4-16 gezeigten Aerosols auf eine Größe von 100 nm ($n = 1$)

Gewünscht ist im gegebenen Fall hingegen nur die Anzahlkonzentration der monodispersen Fraktion bei 100 nm (rote Schraffur). Die Korrekturmethode, um diese bestimmen zu können, orientiert sich an der Mehrfachladungskorrektur im SMPS bzw. DMPS [29]. Hierzu wird zunächst der DMA auf eine Spannung eingestellt, mit der die Größe der zweifach geladenen Partikel (151 nm, grün in Abbildung 4.4-16) klassiert wird und deren Anzahlkonzentration mit dem CPC gemessen. Anschließend erfolgt analog eine Messung der Anzahlkonzentration bei der Größe der zweifach und dreifach geladenen Partikel (195 nm, blau in Abbildung 4.4-16). Im vorliegenden Beispiel kann bei der Klassierung bei der Größe der dreifach geladenen Partikel davon ausgegangen werden, dass diese nur noch sehr geringfügige Anteile mehrfach geladener Partikel enthält, da die Konzentration bei dieser Größe im ursprünglichen polydispersen Aerosol bereits sehr gering ist. In diesem Fall kann die Gesamtkonzentration $C_N(d_{p,3})$ der Partikel dieser Größe bestimmt werden, indem der Messwert durch die Wahrscheinlichkeit, dass Partikel

dieser Größe eine einzelne Elementarladung tragen, geteilt wird. Durch Multiplikation mit der Wahrscheinlichkeit, dass diese Partikel drei Elementarladungen tragen kann dann diese Konzentration (blaue schraffierte Fläche in Abbildung 4.4-17) bestimmt und von dem CPC Messwert abgezogen werden. Ähnlich verfährt man im Fall der zweifach geladenen Partikel, wobei hier ggf. noch die Konzentration der zweifach geladenen Partikel dieser Größe zusätzlich bestimmt werden muss, die allerdings gleich der Größe der 4-fach geladenen, bei 100 nm klassierten Partikel ist (s. Abbildung 4.4-18). Anschließend kann auch dieser Wert von der gemessenen Konzentration $C_{N,CPC}$ abgezogen werden und man erhält die Konzentration ausschließlich der einfachgeladenen Partikel. Da sich die Größen der mehrfach geladenen Partikel immer wiederholt (s. Abbildung 4.4-18) muss nicht jede Kombination aus Partikelgröße und Ladungszustand gemessen werden.

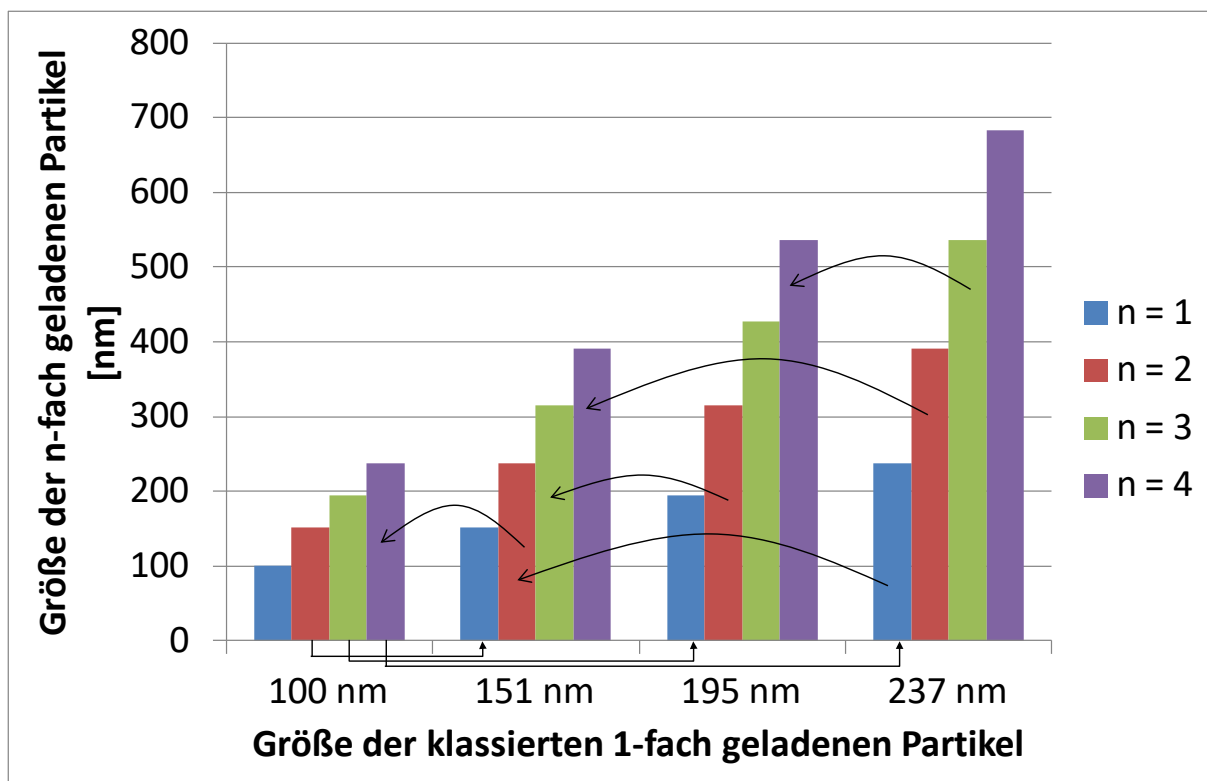


Abbildung 4.4-18: Größe der mehrfach geladenen Partikel für unterschiedliche Größen der einfach geladenen Partikel

Um den Fraktionsabscheidegrad mit der in diesem Kapitel vorgestellten Methode zu bestimmen, wird der Filter mit einem polydispersen NaCl Aerosol beaufschlagt. Gemäß dem in Abbildung 4.4-9 gezeigten Versuchsaufbau wird dem Prüfaerosol vor der Filterebene eine Probe entnommen, neutralisiert und dem DMA zugeführt. Der DMA wird mit einer festen Spannung betrieben, die so gewählt ist, dass eine Partikelgröße größer oder gleich dem Modaldurchmesser der Verteilung klassiert und

die Konzentration mit dem CPC bestimmt wird. Aufgrund der sehr schmalen Verteilungen lassen sich mit einem polydispersen Aerosol in der Regel nur zwei bis drei Partikelgrößen sinnvoll selektieren. Je nach Einfluss der mehrfach geladenen Partikel können sich die Größen der weiteren Partikelgrößen an den Größen der mehrfach geladenen Partikel der ersten gewählten Größe orientieren, sodass sich die Daten sowohl für die Mehrfachladungskorrektur als auch für weitere Datenpunkte des Fraktionsabscheidegrades verwerten lassen. Für zusätzliche Partikelgrößen müssen entsprechend weitere polydisperse Aerosole erzeugt werden. Die Bestimmung der Anzahlkonzentration bei der selektierten Partikelgröße erfolgt dann vor und hinter dem Filter, sodass durch Verhältnisbildung der Abscheidegrad für diese Partikelgröße bestimmt werden kann. Ein Beispiel für einen so bestimmten Fraktionsabscheidegrad eines H13 Filters zeigt Abbildung 4.4-19. Für Roh- und Reingasmessungen werden immer derselbe DMA und CPC gewählt, sodass sich Verluste bzw. Zähleffizienzen herauskürzen und das Messergebnis nicht verfälschen. Generell ist hierbei zu beachten, dass die Konzentrationen im Reingas speziell bei hocheffizienten Filtern sehr gering sein können. Um dennoch statistisch zuverlässig die Anzahlkonzentration zu bestimmen, sollten immer mindestens 100 Partikel gezählt werden. Je nach Filterklasse kann dies jedoch zu recht langen Messzeiten führen.

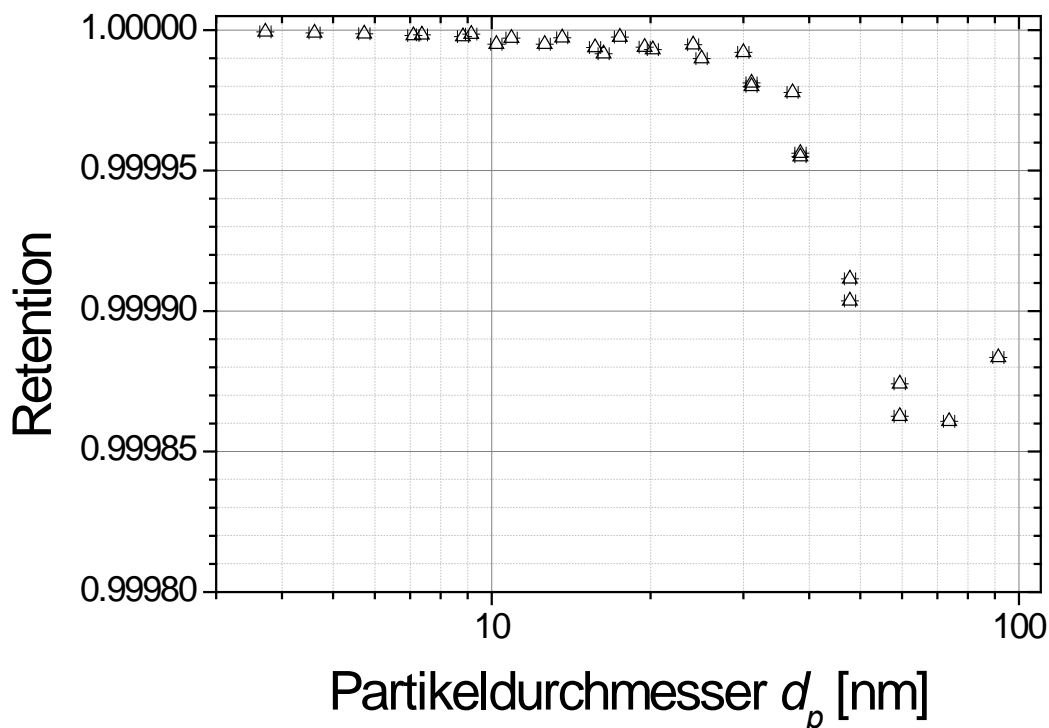


Abbildung 4.4-19: Beispiel für einen Fraktionsabscheidegrad einer H13 Filterkassette, gemessen mit monodispersen Partikeln

4.4.2.3 Bestimmung des Fraktionsabscheidegrades von hocheffizienten Filterkassetten mit quasi-monodispersen Partikeln

Die mit dem Nanopartikelgenerator FG2 erzeugten Aerosole weisen eine sehr schmale lognormale Verteilung mit geometrischen Standardabweichungen von $\leq 1,50$ auf (s. Tabelle 4.4-1). Gemäß der Richtlinie VDI 3491-1 [36] zur Erzeugung von Prüfaerosolen gelten Aerosole mit einer geometrischen Standardabweichung von $\leq 1,50$ als quasi-monodispers. Um als monodispers zu gelten, muss eine Größenverteilung eine geometrische Standardabweichung von $< 1,15$ aufweisen. Wird die Messzeit mit der in Abschnitt 4.4.2.2 beschriebenen Messmethode als zu lang erachtet, so lassen sich die NaCl Aerosole im Prüfkanal daher als quasi-monodispers betrachten. In diesem Falle wird der Mediantdurchmesser der Anzahlverteilung (sog. Count Median Diameter, CMD), basierend auf der Messung der Anzahlgrößenverteilung im Rohgas als Partikelgröße herangezogen. Aus der Anzahlgrößenverteilung ergibt sich durch Intergration über die Partikelgröße die Gesamtanzahlkonzentration im Rohgas. Die Bestimmung der Anzahlkonzentration im Reingas erfolgt mithilfe eines CPC. Das Verhältnis der Reingas- zur Rohgaskonzentration ergibt dann die Abscheideeffizienz des Filters für dieses Aerosol. Für die Darstellung des Fraktionsabscheidegrades wird dieser Effizienzwert dem CMD der Rohgasverteilung zugeordnet. Um zu verdeutlichen, dass es sich bei dem verwendeten Prüfaerosol lediglich um ein quasi-monodisperses Aerosol handelt, kann die geometrische Standardabweichung in Form von Fehlerbalken in das Diagramm eingezeichnet werden. Der Vorteil dieser Methode gegenüber der oben beschriebenen Methode mit monodispersen Aerosolen ist, dass man wesentlich schneller Ergebnisse mit guter Zählstatistik erhält. Der Nachteil ist, dass man mit einer breiteren Verteilung misst und somit mit schlechter definierten Partikelgrößen. Ein Beispiel für einen mit dieser Methode gemessenen Fraktionsabscheidegrad zeigt Abbildung 4.4-20.

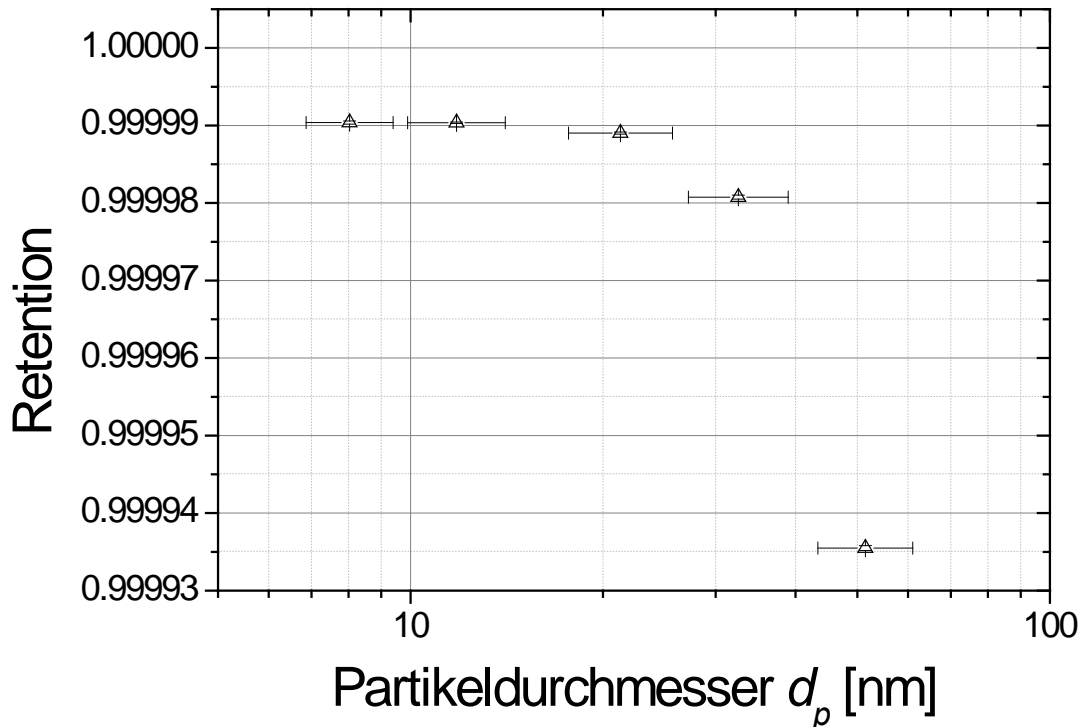


Abbildung 4.4-20: Beispiel für einen Fraktionsabscheidegrad einer H13 Filterkassette, gemessen mit quasi-monodispersen Partikeln

4.5 Untersuchungen an niedrigeffizienten Filterkassetten (RLT)

Die Unterscheidung in niedrig- und hocheffiziente Filter kann nach sehr vielen unterschiedlichen Kriterien erfolgen. Im Rahmen des vorliegenden Projektes erfolgte die Unterscheidung gemäß den Normen EN779 und EN1822. Die Norm EN779 behandelt Filter für raumluftechnische Anlagen mit niedrigen und mittleren Abscheidegraden, während die Norm EN1822 sich mit Schwebstofffiltern höherer Abscheideeffizienzen (EPA, HEPA und ULPA) beschäftigt. Als niedrigeffiziente Filter werden daher hier Filter der Klassen F7 bis F9 gemäß EN779 herangezogen. Filter mit höheren Abscheideeffizienzen, deren Bewertung gemäß der Norm EN1822 erfolgt (Klassen ab E10), werden daher hier als hocheffiziente Filter bezeichnet (Abschnitt 4.6)

4.5.1 F7 Filter

Gemäß der Norm EN779 muss ein Filter einen Mindeatabscheidegrad von 35% bei einer Partikelgröße von 0,4 μm (400 nm) aufweisen, um als F7 Filter klassifiziert zu werden.

Zunächst wurden zwei baugleiche, vom Hersteller als F7 klassifizierte Filter vermessen. Diese Filter haben einen nominellen Volumenstrom von 4.250 m^3/h . Aufgrund der verhältnismäßig geringen Abscheideeffizienzen wurden die

Fraktionsabscheidegrade jeweils mit polydispersen Aerosolen vermessen (s. Abschnitt 4.4.2.1). Für Partikelgrößen bis 100 nm kam der neue Nanopartikelgenerator FG2 zur Erzeugung von NaCl Partikeln zum Einsatz, für größere Partikel ein Atomizer, um DEHS Partikel zu erzeugen. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.5-1 gezeigt. Man erkennt, dass die Ergebnisse für beide untersuchten Filter nahezu perfekt übereinstimmen, was zum einen bedeutet, dass die beiden getesteten Filter exakt gleich waren und zum anderen, dass die neue Messmethode sehr gut und vor allem reproduzierbar funktioniert. Weiterhin zeigt die Abbildung deutlich, dass aufgrund der wesentlich geringeren Konzentrationen die Datenpunkte für das DEHS-Aerosol stärker schwanken, als die Datenpunkte für die NaCl-Aerosole. Darüber hinaus zeigte sich bei beiden Filtern eine geringe Abweichung zwischen den Daten für die NaCl-Aerosole und für das DEHS-Aerosol. Diese Abweichungen sind zwar tolerabel klein, allerdings reproduzierbar und können derzeit nicht abschließend erklärt werden. Beide Filter haben in der hier durchgeführten Untersuchung das Kriterium für einen F7 Filter deutlich erfüllt.

Zusätzlich zur Vermessung der neuen Filter wurden beide Filter mit ASHRAE Staub künstlich gealtert. In beiden Fällen wurde die Alterung gemäß der Norm EN779 zweistufig durchgeführt. Die erste Stufe war erreicht, als der Druckverlust 250 Pa erreichte (Anfangsdruckverlust 105 Pa), was einer Staubaufnahme der Filter von jeweils ca. 205 g entsprach. Die zweite Alterungsstufe war bei einem Druckverlust von 450 Pa erreicht. Nach beiden Alterungsstufen erfolgte eine erneute Messung des Fraktionsabscheidegrades.

Die wesentliche Fragestellung bei der Alterung der Filter war deren Effekt auf die Nanopartikelabscheidung. Nanopartikel werden in einem Filter aufgrund der Partikeldiffusion abgeschieden. Von der Partikelabscheidung durch Diffusion in runden Rohrleitungen ist bekannt, dass diese bei konstantem Volumenstrom unabhängig von Rohrdurchmesser ist, da sich bei Änderung des Rohrdurchmessers die Effekte durch eine veränderte Verweilzeit gegen die veränderte mittlere Distanz, die Partikel zurücklegen müssen, um an der Rohrwandung abgeschieden zu werden, gegeneinander aufheben [37]. Es war bis dato unklar, ob derselbe Effekt in Filtern während der Alterung zu erwarten ist, da hierbei durch den Aufbau eines Staubkuchens auch die Poren kleiner werden. Abbildung 4.5-1 zeigt allerdings deutlich, dass die Abscheideeffizienz der hier vermessenen Filter auch für Nanopartikel durch die Filteralterung deutlich zugenommen hat und insbesondere die Effizienz im MPPS durch die Alterung gestiegen ist. Wenn auch aufgrund der gewählten Darstellung im Diagramm kaum erkennbar, hat sich auch im Bereich der sehr kleinen Nanopartikel <10 nm eine Erhöhung der Abscheideeffizienz von ca 98%

auf >99% ergeben. Diese Ergebnisse decken sich daher gut mit den an der FS2 gewonnenen Erkenntnisse zu Filterrunden.

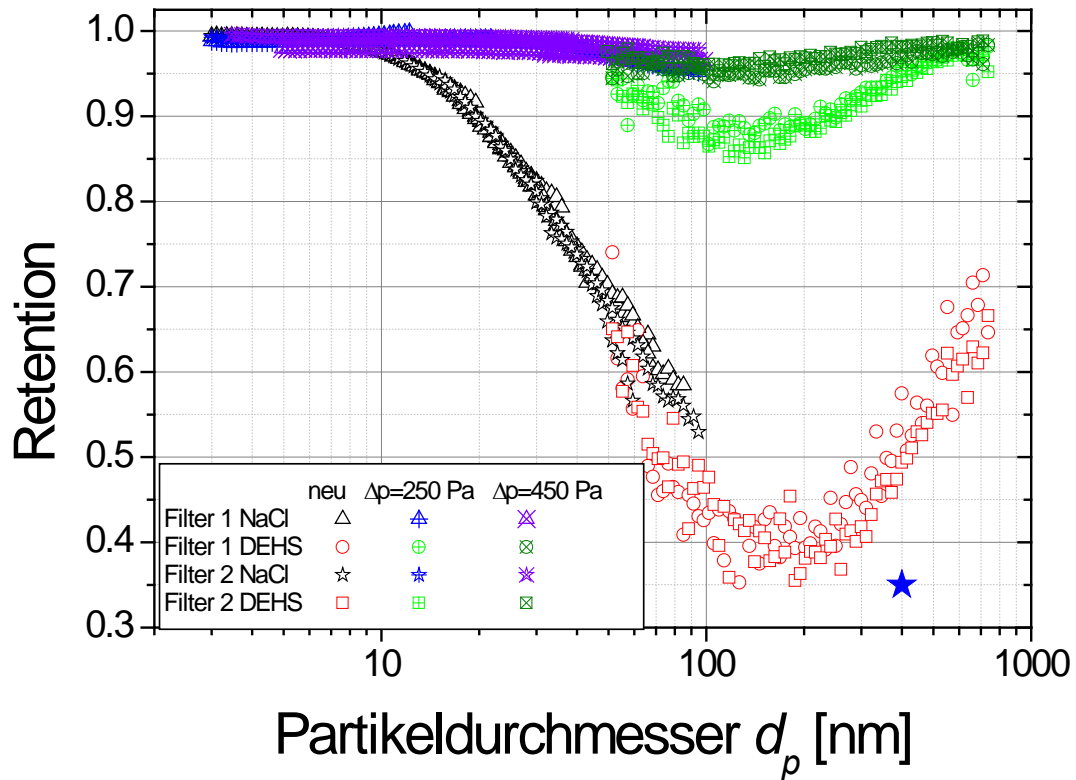


Abbildung 4.5-1: Fraktionsabscheidegrad zweier baugleicher F7 Filterkassetten im neuen und gealterten Zustand (getestet bei Nennvolumenstrom 4.250 m³/h); F7 Kriterium als blauer Stern markiert

4.5.1.1 Vergleich F7 Filtermedium mit Filterkassette

Abbildung 4.5-2 zeigt den Vergleich der an einer F7 Filterkassette und am gleichen Medium gemessenen Fraktionsabscheidegrade. Kassette und Medium wurden von einem Filterhersteller zur Verfügung gestellt. Dabei stammt das Medium aus derselben Charge, wie das in der Kassette verarbeitete, um eine größtmögliche Vergleichbarkeit zu erreichen. Die Anströmgeschwindigkeit des Medium betrug 7,9 cm/s und wurde aus dem Volumenstrom des Filters und der Filterfläche berechnet.

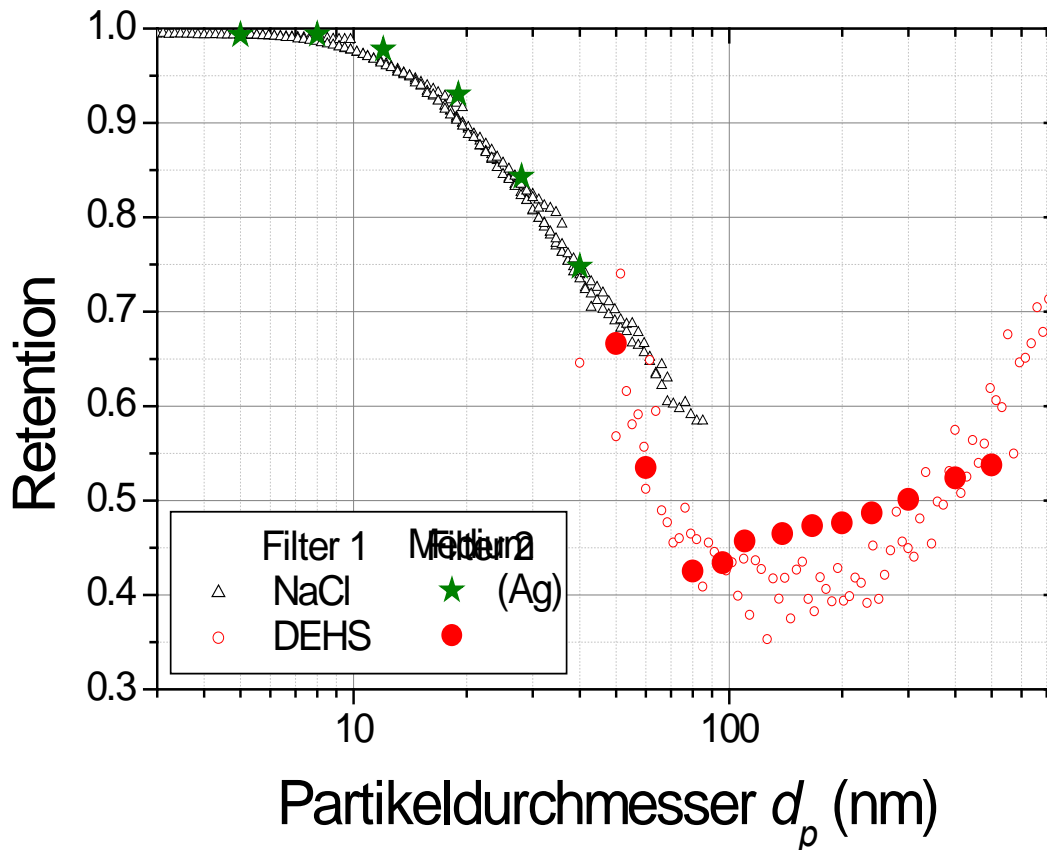


Abbildung 4.5-2: Vergleich des Fraktionsabscheidegrades einer konfektionierten F7 Filterkassette (offene Symbole, 4.250 m³/h) und des gleichen Mediums (geschlossene Symbole, Anströmgeschwindigkeit 7,9 cm/s)

Man erkennt eine sehr gute Übereinstimmung der Fraktionsabscheidegrade, insbesondere im Nanometerbereich. Das bedeutet, dass sich bei genauer Kenntnis der benötigten Anströmgeschwindigkeit auf Basis von Abscheidegradmessungen an Medien zumindest für den vorliegenden Filter gute Vorhersagen zum Verhalten des konfektionierten Filters treffen lassen. Die unterschiedlichen Verläufe der Abscheidekurve im Bereich des MPPS sind vermutlich auch darauf zurückzuführen, dass die Vermessung der Filterkassette mit polydisperssem Aerosol unter Verwendung der Mehrfachladungskorrektur und das Medium in Anlehnung an DIN EN 1822 mit monodisperssem Aerosol, ohne Mehrfachladungskorrektur durchgeführt wurde. Dies verdeutlicht Schwachpunkte der Norm, die durch eine Korrektur, wie in Abschnitt 4.4.2.2 beschrieben, auch für Filtermedien verbessert werden könnte.

4.5.2 F9 Filter

Um als F9 Filter klassifiziert zu werden, muss eine Filterkassette gemäß der Norm EN779 für 0,4 µm große Partikel einen Mindestabscheidewert von 70% aufweisen.

Getestet wurden zwei baugleiche, als Klasse F9 klassifizierte Filter bei ihrem Nennvolumenstrom von 3.400 m³/h. Als Prüfmethode kam wie bei den o.g. F7-Filtern das in Abschnitt 4.4.2.1 beschriebene Verfahren mit polydispersen NaCl- und DEHS-Aerosolen zum Einsatz. Vergleichbar mit den Untersuchungen an den F7 Filterkassetten wurden auch beide F9 Filterkassetten zweistufig mit ASHRAE Staub gealtert, in der ersten Stufe bis zu einem Druckverlust von 250 Pa und in der zweiten Stufe bis 450 Pa. Die resultierenden Fraktionsabscheidegrade beider Filter im neuen Zustand sowie nach beiden Alterungsstufen sind in Abbildung 4.5-3 gezeigt.

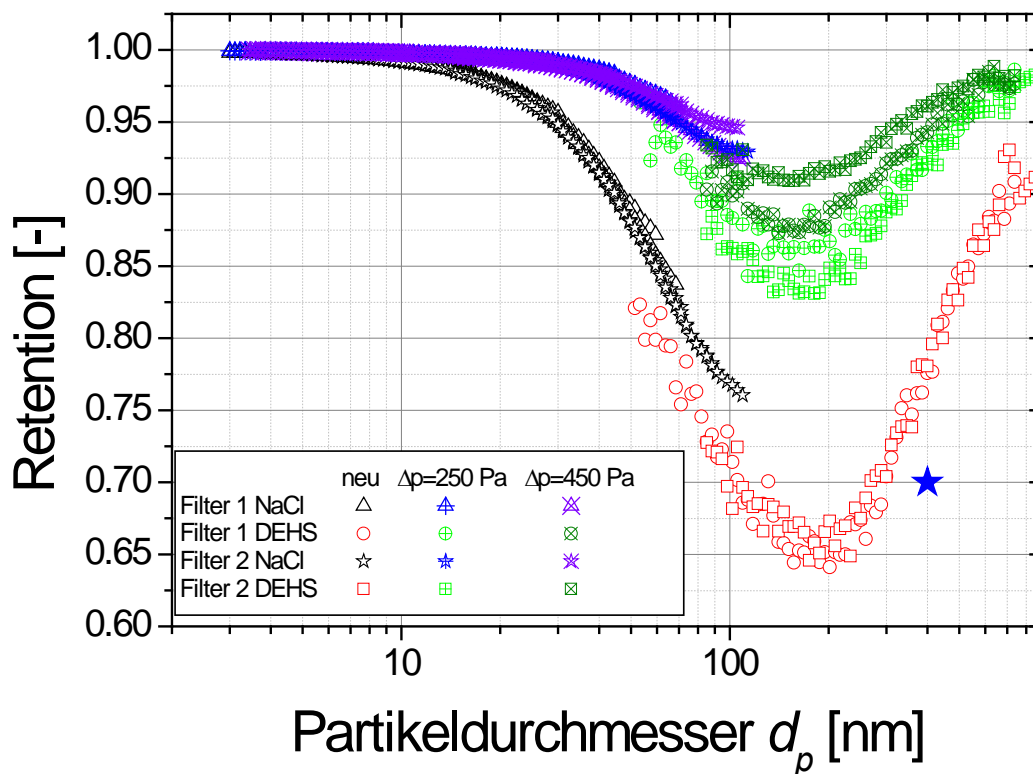


Abbildung 4.5-3: Fraktionsabscheidegrad zweier baugleicher F9 Filterkassetten im neuen und gealterten Zustand (getestet bei Nennvolumenstrom von 3.400 m³/h); F9 Kriterium als blauer Stern markiert

Abbildung 4.5-3 zeigt, dass die Fraktionsabscheidegrade auch für die beiden untersuchten F9 Filter im neuen Zustand sehr gut übereinstimmen und nahezu keine Unterschiede aufweisen. Allerdings ist auch hier wieder ein kleiner Sprung beim Übergang von den NaCl Aerosolen zum DEHS Aerosol zu erkennen. Nichtsdestotrotz erfüllen beide Filter deutlich das Kriterium, um als F9 Filter klassifiziert zu werden. Beide Filter zeigen mit zunehmender Alterung eine Erhöhung des Fraktionsabscheidegrades für sämtliche Partikelgrößen, allerdings ist der Anstieg

insbesondere zwischen der ersten und der zweiten Alterungsstufe nicht mehr so deutlich wie beim F7 Filter. Auch ist die Übereinstimmung der Fraktionsabscheidegrade der beiden gealterten Filter nicht ganz so gut wie beim F7 Filter. Interessanterweise zeigte Filter 1 nach der ersten Alterungsstufe niedrigere, nach der zweiten Stufe hingegen deutlich höhere Abscheideeffizienzen als Filter 2. Über die Gründe kann derzeit nur spekuliert werden. Vermutlich liegen sie aber darin begründet, dass die Filter nach der Alterung und vor der Messung des Fraktionsabscheidegrades ausgebaut wurden. Hierdurch kann es zu einer Veränderung der Staubkuchenstruktur gekommen sein, die sich entsprechend auf den Abscheidegrad auswirkt. Dass sich dieser Effekt deutlich stärker auf die F9 Filter auswirkte als auf die F7 Filter, liegt darin begründet, dass es sich bei den F9 Filtern um Taschenfilter, bei den F7 Filtern hingegen um Kassettenfilter handelte. Aufgrund der Flexibilität der Taschen ist eine stärkere Auswirkung der mechanischen Beanspruchung beim Ein- und Ausbau auf die Struktur des eingelagerten Staubs zu erwarten.

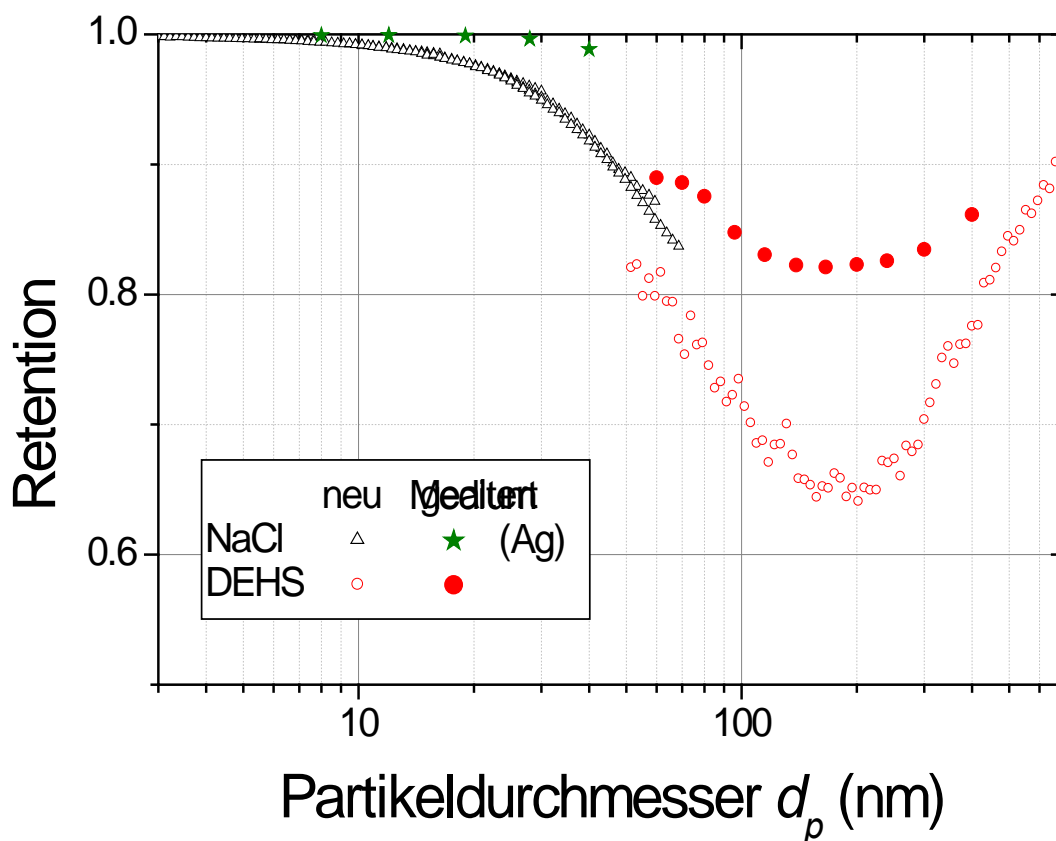


Abbildung 4.5-4: Vergleich des Fraktionsabscheidegrades einer konfektionierten F9 Filterkassette (offene Symbole, 3.400 m³/h) und des gleichen Mediums (geschlossene Symbole); Medium wurde bei der halben Anströmgeschwindigkeit der Filterkassette getestet (6,5 cm/s)

4.5.2.1 Vergleich F9 Filtermedium mit Filterkassette

Der Vergleich des Fraktionsabscheidegrades einer F9 Filterkassette mit dem einer Medienprobe ist in Abbildung 4.5-4 gezeigt. Man erkennt, dass das Medium eine wesentlich höhere Abscheideeffizienz aufweist, als die Filterkassette. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Medium aufgrund der Begrenzung des Volumenstroms des in Abbildung 4.1-2 gezeigten Prüfaufbaus für Filtermedien bei einer zu geringen Anströmgeschwindigkeit getestet wurde. Der Nennvolumenstrom der Filterkassette beträgt 3.400 m³/h, woraus sich mit der gesamten Filterfläche von 7,3 m² rechnerisch eine Medienanströmgeschwindigkeit von 12,94 cm/s ergibt, welche vom Prüfstand nicht bereitgestellt werden kann. Stattdessen wurde das Medium etwa mit der halben Anströmgeschwindigkeit von 6,47 cm/s getestet. Hierdurch ergibt sich eine erhöhte Verweilzeit der Partikel im Filter und dadurch eine höhere Diffusionsabscheidung kleiner Partikel, wodurch die dargestellten Diskrepanzen erklärt werden können.

4.6 Untersuchungen an hocheffizienten Filtern

Als hocheffiziente Filter werden im Rahmen dieses Projekts gemäß der Norm DIN EN 1822 klassifizierte Schwebstofffilter bezeichnet. Im Rahmen dieses Projekts kamen Filter der Klassen E10 (EPA), H13 (HEPA) und U15 (ULPA) zum Einsatz. Da HEPA und ULPA Filter im Betrieb üblicherweise nicht ohne Vorfilter betrieben werden, wurde eine künstliche Alterung dieser Filter mit Staub als nicht praxisrelevant angesehen und daher nicht durchgeführt.

4.6.1 E10 Filter

Um die Filterklasse E10 gemäß DIN EN1822 zu erfüllen, muss ein Filter einen Mindestabscheidegrad von 85% über dem gesamten Partikelgrößenbereich aufweisen. Herkömmlich erfolgt dieser Nachweis lediglich an Medienproben. Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurden die Fraktionsabscheidegrade jedoch auch an konfektionierten Filtern beim Nennvolumenstrom von 4.250 m³/h gemessen und den Abscheidegraden der Medienproben (gemessen bei derselben Anströmgeschwindigkeit von 6,75 cm/s) gegenübergestellt. Aufgrund der sehr hohen rohgasseitigen Anzahlkonzentrationen war es bei E10 Filtern noch möglich, entsprechend der in Abschnitt 4.4.2.1 dargestellten Methode reingasseitig ebenfalls die Größenverteilungen zu messen und den Fraktionsabscheidegrad durch Verhältnisbildung zu bestimmen. Da E10 Filter mitunter auch einzeln und ohne Vorfilter betrieben werden, wurden die Filter nach der Bestimmung des Anfangsabscheidegrades ebenfalls mit ASHRAE Staub in zwei Stufen gealtert, bis sie einen Druckverlust von 250 Pa, bzw. 450 Pa aufwiesen. Die entsprechenden

Fraktionsabscheidegradkurven sind in Abbildung 4.6-1 dargestellt.

Man erkennt wiederum die sehr gute Übereinstimmung der Abscheideeffizienzen der beiden untersuchten Filterkassetten im Neuzustand. Auch zeigte sich hier wieder eine geringe Diskrepanz zwischen der Abscheideeffizienz für NaCl- und DEHS-Partikel. Mit zunehmender Alterung nimmt auch hier die Abscheideeffizienz im gesamten Partikelgrößenbereich zu. Allerdings zeigten die beiden Filterkassetten für DEHS geringfügig unterschiedliche Abscheidegrade. Hierbei ist zu erwähnen, dass festgestellt wurde, dass bei mehrfach hintereinander durchgeführten Messungen mit DEHS-Aerosolen an gealterten Filtern die Abscheideeffizienz mit der Zeit abnahm. Es ist somit davon auszugehen, dass das flüssige DEHS die Struktur des abscheidenden Filterkuchens verändert, sodass auch die Partikelabscheidung hierdurch beeinflusst wird.

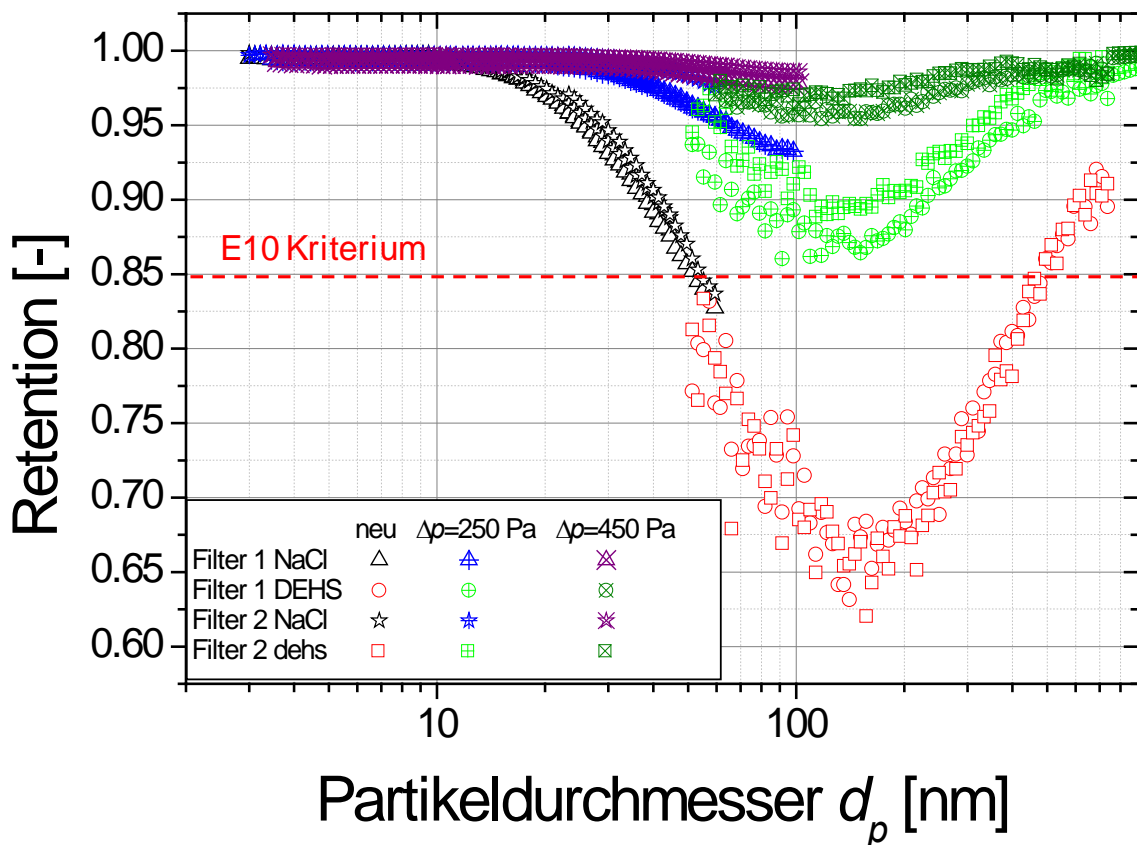


Abbildung 4.6-1: Fraktionsabscheidegrad zweier baugleicher E10 Filterkassetten im neuen und gealterten Zustand (getestet bei Nennvolumenstrom von 4.250 m³/h); E10 Kriterium als rote gestrichelte Linie markiert

Weiterhin fällt in Abbildung 4.6-1 auf, dass das Kriterium für einen E10 Filter im Neuzustand von beiden Filtern deutlich verfehlt wird. Allerdings stimmt die

Fraktionsabscheidegradkurve der beiden Filter sehr gut mit der an Medienproben ermittelten Abscheidekurve überein (s. Abbildung 4.6-2), sodass Fehler in der Bestimmung der Fraktionsabscheidegrade weitgehend ausgeschlossen werden können. Es ist somit davon auszugehen, dass die Filter vom Hersteller falsch etikettiert waren.

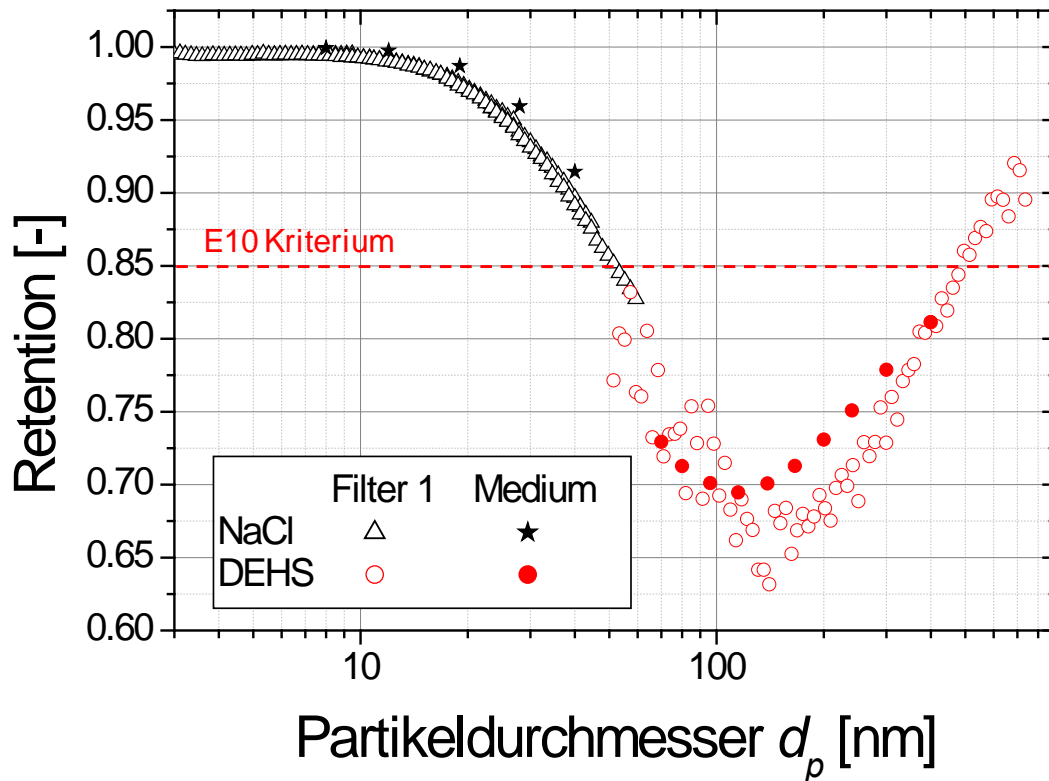


Abbildung 4.6-2: Vergleich des Fraktionsabscheidegrades einer konfektionierten E10 Filterkassette (offene Symbole, 4.250 m³/h) und des gleichen Mediums (geschlossene Symbole); Medium getestet bei gleicher Anströmgeschwindigkeit wie konfektionierter Filter (6,75 cm/s)

4.6.2 H13 Filter

Für H13 Filter gilt gemäß DIN EN 1822 das Kriterium, dass sie einen Mindestabscheidegrad von 99,95% über den gesamten Größenbereich aufweisen müssen. Gemäß der Norm wird dieser nur an Medienproben ermittelt. Im vorliegenden Projekt wurde er jedoch zusätzlich auch an zwei Filterkassetten gemessen. Hierbei handelt es sich um Filterkassetten unterschiedlicher Hersteller mit Nennvolumenströmen von 4.000 m³/h (Filter A) bzw. 3.000 m³/h (Filter B). Da H13 Filter üblicherweise immer mit Vorfilter betrieben werden, wurde auf eine künstliche Filteralterung verzichtet. Aufgrund der sehr hohen Abscheidegrade, insbesondere im Bereich sehr kleiner Nanopartikel, war eine Messung der reingasseitigen

Größenverteilung unmöglich, sodass die beiden in den Abschnitten 4.4.2.2 und 4.4.2.3 beschriebenen Methoden mit monodispersen bzw. quasi-monodispersen Partikeln zum Einsatz kamen. Die Untersuchung des Filters A erfolgte zunächst nur mit monodispersen Partikeln. Das heißt, es kam jeweils ein DMA mit konstanter Spannung zum Einsatz, sodass die Anzahlkonzentrationen von Partikeln einer bestimmten Größe vor und hinter dem Filter mit einem CPC bestimmt und ins Verhältnis gesetzt wurden. Durch Veränderung der Spannung lies sich die untersuchte Partikelgröße variieren. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.6-3 gemeinsam mit dem Fraktionsabscheidegrad des darin verarbeiteten Mediums dargestellt. Das Medium wurde hierzu mit einer Anströmgeschwindigkeit von 3,4 cm/s vermessen. Leider erfolgte der Test ausschließlich mit DEHS und damit nur mit größeren Partikeln, sodass sich nicht die gesamte Fraktionsabscheidegradkurve vergleichen lässt. Man erkennt allerdings, dass beide Kurven denselben Verlauf und etwas denselben MPPS zeigen. Allerdings liegt die Retention im MPPS bei der Filterkassette bei ca. 99,986%, beim Medium hingegen bei 99,994%. In beiden Fällen erfüllen die Filter allerdings die Kriterien für einen Filter der Klasse H13.

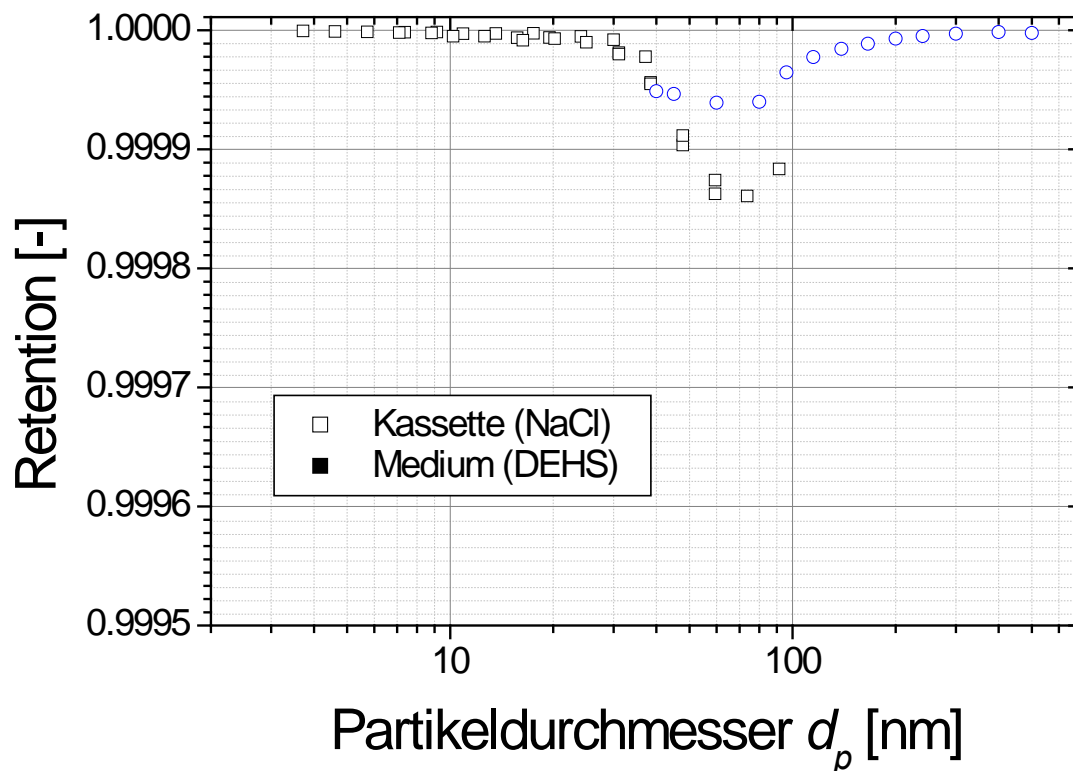


Abbildung 4.6-3: Fraktionsabscheidegrad an einer H13 Filterkassette (Filter A, Nennvolumenstrom 4.000 m³/h, getestet mit monodispersen Partikeln) sowie des darin verarbeiteten Mediums

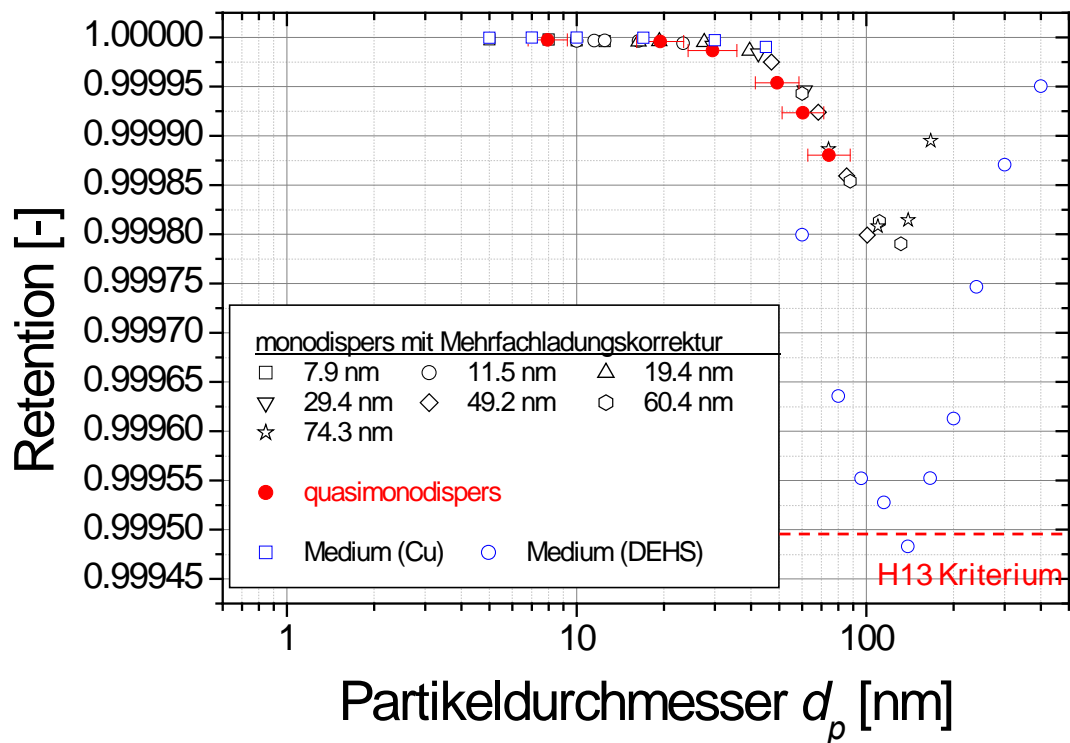


Abbildung 4.6-4: Fraktionsabscheidegrade einer H13 Filterkassette (Filter B) sowie des darin verwendeten Mediums; getestet bei Nennvolumenströmen von 3.000 m³/h, Medien getestet mit gleichen Anströmgeschwindigkeiten von 2,7 cm/s

Im Falle von Filter B wurde zusätzlich auch die Methode der quasi-monodispersen Aerosole angewendet, d. h. die Verteilungsbreite der erzeugten NaCl Aerosole wurde als ausreichend schmal angenommen, um als quasi-monodispers zu gelten. In diesem Falle wurde hinter dem Filter lediglich die gesamte Anzahlkonzentration der Partikel bestimmt, diese ins Verhältnis zur Anzahlkonzentration vor dem Filter gesetzt und die daraus resultierende Abscheidung dem Mediandurchmesser der Größenverteilung zugeordnet. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 4.6-4 dargestellt und den an Medienproben erlangten Ergebnissen gegenübergestellt. Letztere wurden mit einer Anströmgeschwindigkeiten von 2,7 cm/s gemessen. Zunächst einmal zeigt die Abbildung, dass die mit monodispersen und quasi-monodispersen Partikeln an Filter B erzeugten Abscheidekurven gut übereinstimmen (offene schwarze Symbole und geschlossene rote Kreise). Die Übereinstimmung der an der Filterkassette und Filtermedium gemessenen Fraktionsabscheidegrade ist in diesem Falle nicht so gut wie für Filter A sowie für die zuvor gezeigten Beispiele für Filter niedrigerer Klassen. Insgesamt lag die mit Cu-Partikeln an Medien des Filters B gemessenen Effizienzen etwas höher

als diejenigen für die daraus konfektionierten Filter. Die mit DEHS am selben Medium gemessenen Abscheideeffizienzen hingegen liegen deutlich unter den Effizienzen des konfektionierten Filters. Im Gegensatz dazu liegen die mit DEHS bestimmten Abscheideeffizienzen der Medien des Filters A wesentlich höher als diejenigen des Filters B und auch höher als die mit NaCl gemessenen Abscheideeffizienzen des konfektionierten Filters. Die Gründe für diese Abweichungen können in der unterschiedlichen Behandlung mehrfach geladener Partikel in der Datenauswertung liegen. Auch ist nicht auszuschließen, dass durch das Konfektionieren, insbesondere das Plissieren eine mechanische Veränderung der Medien herbeigeführt wird, die sich auf die Abscheideeffizienz auswirkt.

4.6.3 U15 Filter

Filter der Klasse U15 müssen einen Mindestabscheidegrad von 99,9995% aufweisen. Im vorliegenden Fall wurden zunächst zwei baugleiche Filter der Klasse U15 mit einem Nennvolumenstrom von 1.700 m³/h mit quasi-monodispersen Partikeln (s. Abschnitt 4.4.2.3) vermessen. Bei der ersten Messung fiel auf, dass der Filter die Kriterien für einen U15 Filter nicht einhielt. Zudem zeigte sich der MPPS bei nur ca. 45 nm, was unrealistisch niedrig ist. Diese Ergebnisse lassen sich durch eine minimale Leckage im Bereich zwischen der Filterhalterung und der reingasseitigen Aerosolprobenahmestelle erklären. Diese Leckage konnte zwar experimentell durch Verwendung eines Aerosolgenerators im Außenbereich des Prüfstandes nachgewiesen, aber nicht genau lokalisiert und somit auch nicht geschlossen werden. Dabei ist anzumerken, dass diese Leckage so klein ist, dass die dadurch entstehenden Messfehler bei Filtern mit niedrigerer Effizienz nicht ins Gewicht fallen. Dies liegt zum einen darin begründet, dass bei diesen Filtern wenige von außen eindringende Partikel die Reingaskonzentration kaum merklich ändern. Zudem wird aufgrund des geringeren Druckverlusts weniger Falschluf und damit weniger Fremdpartikel eingesogen. Da bei Filtern der Klasse U15 allerdings ohnehin nur sehr wenige Partikel im Reingas vorliegen, können hier bereits kleinste Leckagen zu deutlichen Fehlern führen. Dadurch, dass sich die Leckage nicht genau lokalisieren und somit auch nicht schließen ließ, wurde beschlossen, den Filter an einer anderen, in Strömungsrichtung hinter der eigentlichen Filterebene liegenden Stelle einzubauen, da die Leckage zwischen diesen beiden Orten vermutet wurde. Die Ergebnisse der beiden Messungen zeigt Abbildung 4.6-5.

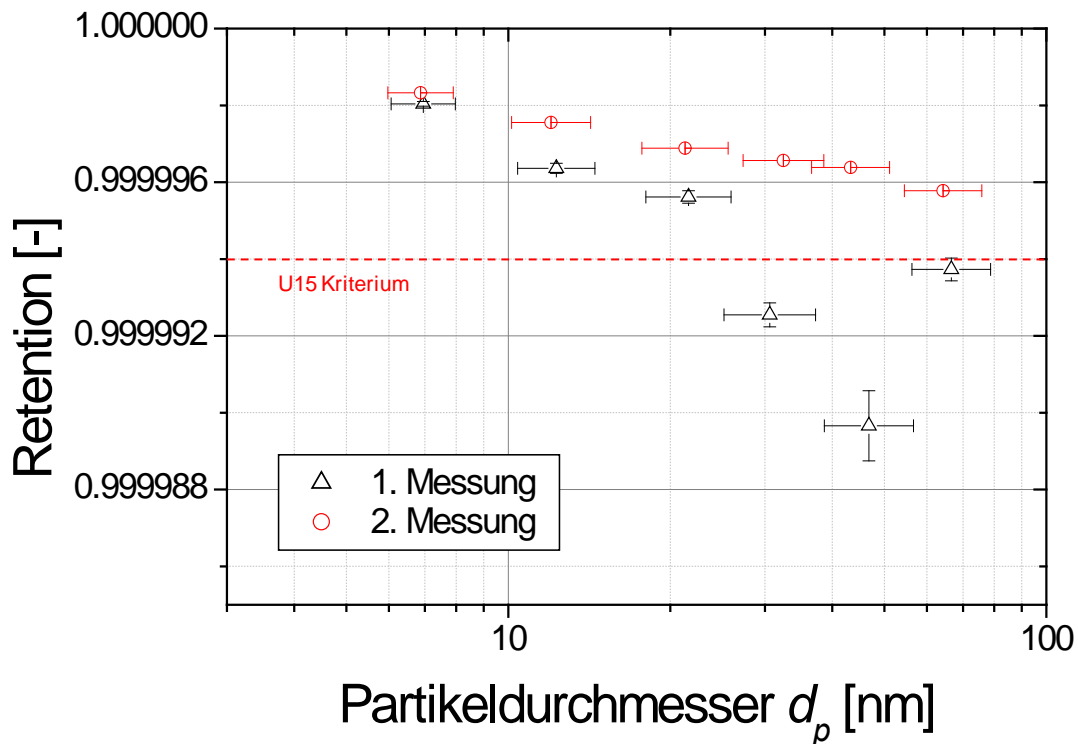


Abbildung 4.6-5: Fraktionsabscheidegrad von U15 Filterkassetten; für die erste Messung wurde der Filter an der hierfür üblichen Stelle im Prüfkanal eingebaut, für die zweite Messung hierzu versetzt, um etwaige Undichtigkeiten zu vermeiden (getestet bei Nennvolumenstrom von 1.700 m³/h)

Die in der Abbildung dargestellten horizontalen Fehlerbalken geben die jeweiligen geometrischen Standardabweichungen der als quasi-monodispers angenommenen Größenverteilungen der Prüfaerosole an, die vertikalen Fehlerbalken jeweils eine Kombination aus 95% Vertrauensintervall und der Schwankung der Rohgaskonzentration während der Messung. Wie die Abbildung deutlich zeigt, entsprechen die Daten der zweiten Messung mit versetztem Filter bezüglich des Verlaufs der Kurve sowie der Abscheidegradwerte deutlich mehr den Erwartungen. Somit kann angenommen werden, dass die erste Messung tatsächlich durch eine sehr kleine Leckage beeinflusst war und dass dieser Messfehler durch Versetzen des Filters behoben wurde.

Im folgenden Schritt wurde derselbe Filter an versetzter Stelle ein zweites Mal unter Verwendung monodisperser Partikel und Anwendung der in 4.4.2.2 beschriebenen Mehrfachladungskorrektur vermessen. Hierzu wurden mit dem Nanopartikelgenerator nacheinander NaCl-Prüfaerosole mit Modaldurchmessern von 6,87 nm, 12,0 nm,

21,3 nm, 32,5 nm, 43,3 nm und 64,3 nm erzeugt und hieraus jeweils, je nach Breite der Verteilung, drei oder vier monomobile Fraktionen mit dem DMA klassiert und deren Anzahlkonzentration mit einem CPC bestimmt. Bei Prüfaerosolen mit Modaldurchmesser >20 nm lag die Größe der kleinsten hieraus klassierten Partikel immer im Bereich des Modaldurchmessers, bei Prüfaerosolen mit kleineren Modaldurchmessern wurden auch kleinere Partikel klassiert, da hierfür die Wahrscheinlichkeit mehrfach geladener Partikel so gering ist, dass die ggf. höhere Gesamtkonzentration bei deren Größen nicht ins Gewicht fällt. Generell war die Lage der jeweils zweiten, dritten und ggf. vierten klassierten Größe so gewählt, dass sie den Größen der zwei-, drei-, bzw. vierfach geladenen Partikel entsprachen, welche dieselbe Mobilität aufweisen wie die einfach geladenen Partikel der ersten klassierten Größe, um so die Mehrfachladungskorrektur gemäß Abschnitt 4.4.2.2 zu ermöglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.6-6 gezeigt.

Die Abbildung zeigt zunächst einmal ein sehr konsistentes Bild der Fraktionsabscheidegrade, die mit monodispersen Partikeln aus verschiedenen Prüfaerosolen bestimmt wurden. Die gute Übereinstimmung in dem überlappenden Größenbereichen belegt auch die hohe Qualität der Mehrfachladungskorrektur, sodass nunmehr mit der neuen Methode der Fraktionsabscheidegrad auch eines U15 ULPA Filters mit hoher Präzision bestimmt werden kann. Zu Vergleichszwecken ist in Abbildung 4.6-6 auch das Ergebnis der Messung mit quasi-monodispersen Partikeln eingezeichnet. Man erkennt, dass die so ermittelten Fraktionsabscheidegrade sehr gut mit denjenigen übereinstimmen, die mit monodispersen Partikeln ermittelt wurden. Dies zeigt wiederum, dass beide Methoden gut miteinander vergleichbare Ergebnisse liefern, sodass die jeweilige Methode je nach Bedarf ausgewählt werden kann. Der große Vorteil der Verwendung quasi-monodisperser Partikel ist der wesentlich geringere Aufwand, der hierfür nötig ist, sodass die Messung deutlich weniger Zeit in Anspruch nimmt. Die Methode mit monodispersen Partikeln erlaubt hingegen eine noch präzisere Messung, zumal sich die Partikeldurchmesser im Bereich zwischen 5 nm und 100 nm nahezu beliebig auswählen lassen.

Abbildung 4.6-6 zeigt weiterhin den Fraktionsabscheidegrad, der am gleichen U15 Medium gemessen wurde. Die Werte liegen ähnlich wie die am konfektionierten Filter gemessenen, allerdings für Partikel <40 nm komplett darüber und für größere Partikel darunter. Ein möglicher Grund hierfür könnte wiederum sein, dass die Filteroberfläche durch die Plissierung nicht so homogen angeströmt wird, wie im Medienprüfstand, sodass sich hierdurch leichte Änderungen ergeben. Weiterhin zeigt die Abbildung, dass der Abscheidegrad nur für das Medium gegen eins tendiert,

wohingegen er für den kompletten Filter geringfügig darunter liegt. Dies könnte ein Hinweis auf eine minimale Leckage im Filter sein, durch die wenige Partikel hindurchdringen.

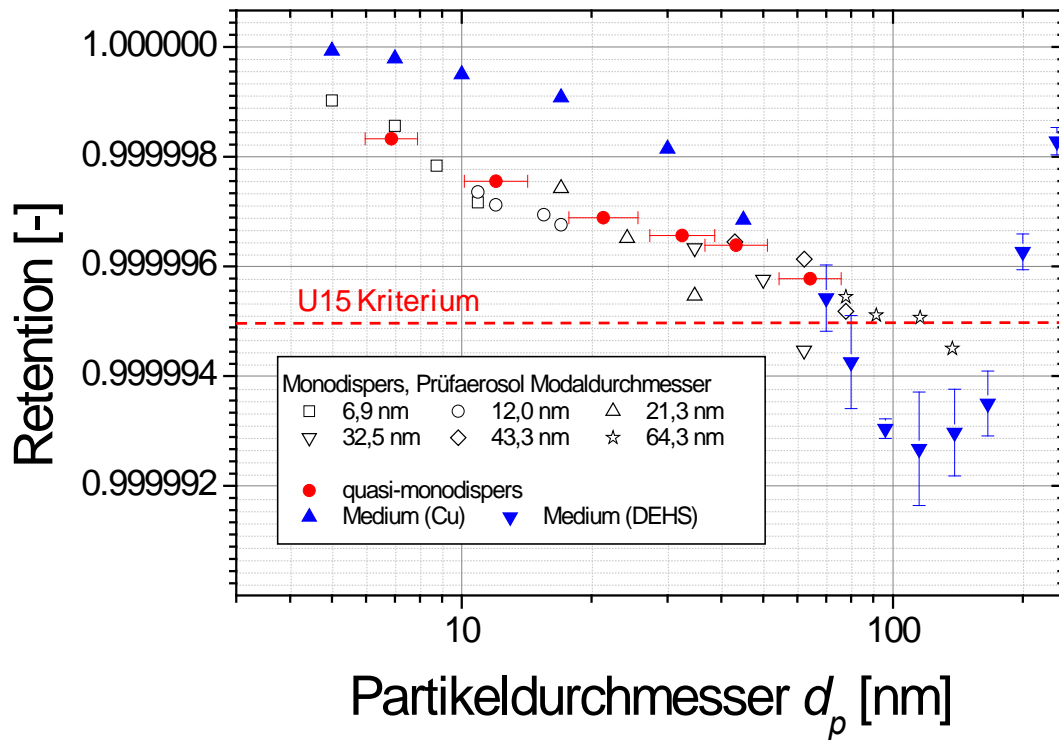


Abbildung 4.6-6: Fraktionsabscheidegrad eines U15 Filters (getestet bei Nennvolumenstrom 1.700 m³/h), gemessen mit monodispersen Partikeln und Mehrfachladungskorrektur (schwarze, offene Symbole), sowie mit quasi-monodispersen Partikeln (rote, geschlossene Kreise), sowie am Medium gemessener Fraktionsabscheidegrad (blaue, geschlossene Symbole; Anströmgeschwindigkeit 2,7 cm/s)

Auffällig ist hingegen, dass sowohl bei der Messung mit monodispersen Partikeln am konfektionierten Filter als auch bei der Messung am Medium das Kriterium für einen U15 Filter unterschritten wurde.

4.7 Modellierung der Nanopartikelabscheidung an konventionellen und neu entwickelten Filtern

Der Druckverlust der Filtermedien und die Effizienz im Partikelgrößenbereich von 5 nm bis 500 nm wird für konventionelle Filtermedien und für Medien mit einer Nanofaser- Schicht mit Hilfe des Einzelfaser-Filtrationsmodell berechnet, welches auch schon im Vorläuferprojekt (IGF: 17659 N) eingesetzt wurde [23]. Im Rahmen dieses Projektes wurden eine Vielzahl unterschiedlicher empirischer Ansätze zur Beschreibung der Einzeltransportmechanismen hinsichtlich ihrer Eignung für den o.g. Partikelgrößenbereich sowie zur Berücksichtigung von Faserdurchmessern von unter 100 nm bis zu einigen μm überprüft.

Die Faserdurchmesserverteilung des realen Filtervlieses wurde im Modell zunächst vereinfachend durch einen diskreten Faserdurchmesser angenähert. Um den Gültigkeitsbereich dieser stark vereinfachenden Annahme überprüfen zu können, wurde das bestehende Modell erweitert. Jetzt kann eine (multimodale) Faserdurchmesserverteilung (z.B. aus REM-Analysen) der untersuchten Medien vorgegeben werden. So können auch Abscheideeffizienzen von Filtermedien mit nicht-monodisperser Verteilung, wie z.B. einer Stützschiicht mit aufgetragener Nanofaserschicht, erfolgreich modelliert werden, wohingegen der Ansatz mit einem diskreten Mittelwert in einem solchen Fall zuvor versagt hätte.

4.7.1 Modellierung der unterschiedlichen Abscheidebeiträge

Für den Einzelfaserabscheidegrad durch Interzeption wurden die in Tabelle 4.7-1 aufgeführten Ansätze verwendet und hinsichtlich ihrer Eignung überprüft. Wie für alle empirischen oder halbempirischen Gleichungen muss zunächst der Gültigkeitsbereich der Gleichung überprüft werden. Bei der Berücksichtigung der Interzeption ist es der Strömungsbereich in dem die Abscheidung stattfindet. Für Randbedingungen, bei denen der Schlupf an der Faseroberfläche berücksichtigt werden muss ($13 \text{ nm} < d_f < 520 \text{ nm}$ bei Standardbedingungen), wurden die Formeln angewendet, die auf die Faserknudsenzahlgreifen [38] [39]. Diese berechnet sich aus dem Verhältnis der mittleren freien Weglänge λ zum Faserradius und bestimmt den Strömungsbereich (Abbildung 4.7-1):

$$Kn_f = \frac{2 \lambda}{d_f} \quad (1)$$

Durch Vergleich mit experimentellen Daten wurde der Faktor B zu 0,6 bestimmt [40]. Die Packungsdichten α der Filtervliese liegen in dieser Veröffentlichung im Bereich von $0,0086 < \alpha < 0,151$ und entsprechen damit denen der Filtermedien, die auch in diesem Projekt vorliegen. Die verwendeten Filterspezifikationen, die zur Herleitung

der Gleichungen verwendet wurden, sind zur Veranschaulichung in Tabelle 4.7-2 aufgeführt. Wie zu erkennen, fehlen diese leider häufig, was es erschwert den Einsatzbereich der jeweiligen Gleichungen zu ermitteln.

Tabelle 4.7-1: Gleichungen für die Einzelfaserabscheidung durch Interzeption

Quelle	Gleichung
Pich (1966)	$\eta_R = \frac{(1+R)^{-1} - (1+R) + 2(1+1,996 Kn_f)(1+R)\ln(1+R)}{2\left[-0,75 - \frac{1}{2}\ln(\alpha)\right] + 1,996 Kn_f[-0,5 - \ln(\alpha)]} \quad (2)$
Lee und Ramamurthi (1993)	$\eta_R = \frac{(1-\alpha)R^2}{Ku(1+R)} \quad (3)$
Lee und Liu (1982)	$\eta_R = B \left(\frac{1-\alpha}{Ku}\right) \frac{R^2}{1+R} \quad (4)$
Liu und Rubow (1990)	$\eta_R = B \left(\frac{1-\alpha}{Ku}\right) \frac{R^2}{1+R} C_R \quad (5)$
	$C_R = 1 + \frac{1,996 Kn_f}{R} \quad (6)$

Tabelle 4.7-2: Verwendete Filterspezifikationen zur Herleitung der (semi-)empirischen Ansätze

Quelle	Filterspezifikationen		
	Packungsdichte	Faserdurchmesser	Weitere Informationen
Pich (1966)	-	-	-
Lee und Ramamurthi (1993)	-	-	-
Lee und Liu (1982)	$0,0086 < \alpha < 0,151$	$d_f = 11 \mu\text{m} (\sigma = 1,06)$	-
Liu und Rubow (1990)	-	$d_f < 1 \mu\text{m}$	HEPA, ULPA

Die Interzeptionszahl R berechnet sich aus dem Verhältnis von Partikeldurchmesser d_p zu Faserdurchmesser d_f :

$$R = \frac{d_p}{d_f} \quad (7)$$

Die hydrodynamische Konstante Ku lautet

$$Ku = -\frac{1}{2} \ln(\alpha) - \frac{3}{4} + \alpha - \frac{1}{4} \alpha^2 \quad (8)$$

und wurde durch Untersuchung der Strömung um homogen verteilte Zylinder ermittelt [41]. Mit Hilfe dieser Konstante wird der Einfluss angrenzender Fasern ermittelt, da diese das Strömungsprofil am Ort der betrachteten Faser verändern. Shou et al. (2015) haben diesen Faktor für eine vollständig zufällige Faseranordnung modifiziert:

$$Ku_m = -0,64 \ln(\alpha) - 0,737 + \alpha - 0,25 \alpha^2 \quad (9)$$

Für den Einzelfaserabscheidegrad aufgrund von Diffusion wurden die Ansätze in Tabelle 4.7-3 gewählt. Alle der aufgelisteten (halbempirischen) Gleichungen basieren auf der Analogie zwischen Wärme und Stofftransport:

$$\eta_D \propto Pe^{-\frac{2}{3}} \quad (10)$$

Die Péclet-Zahl Pe kann wie folgt berechnet werden:

$$Pe = \frac{d_f U_0}{D} \quad (11)$$

Hierbei ist U_0 die mittlere Anströmgeschwindigkeit des Filtervlieses und D der Diffusionskoeffizient der Partikel, der über die Stokes-Einstein-Beziehung berechnet werden kann:

$$D = \frac{k_B T C_c}{3 \pi \eta d_p} \quad (12)$$

k_B ist die Boltzmannkonstante, T die Temperatur, C_c der Cunningham-Korrekturfaktor und η die dynamische Viskosität.

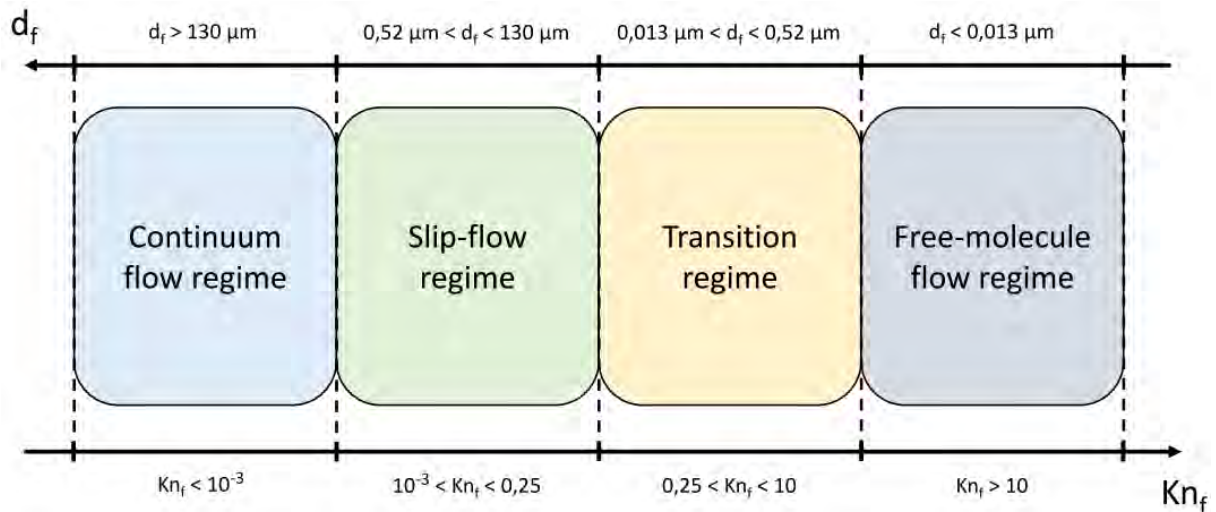


Abbildung 4.7-1: Einteilung der Strömungsbereiche durch die Faserknudsenzahl

Tabelle 4.7-3: Gleichungen für die Einzelfaserabscheidung durch Diffusion

Quelle	Gleichung
Kirsch und Fuchs (1968)	$\eta_D = 2 Pe^{-\frac{2}{3}} \quad (13)$
Pich (1965)	$\eta_D = 2,27 Ku^{-\frac{1}{3}} Pe^{-\frac{2}{3}} (1 + 0,62 Kn_f Pe^{\frac{1}{3}} Ku^{-\frac{1}{3}}) \quad (14)$
Lee und Liu (1982)	$\eta_D = A \left(\frac{1 - \alpha}{Ku} \right)^{\frac{1}{3}} Pe^{-\frac{2}{3}} \quad (15)$
Liu und Rubow (1990), Hung und Leung (2011)	$\eta_D = A \left(\frac{1 - \alpha}{Ku} \right)^{\frac{1}{3}} Pe^{-\frac{2}{3}} C_D \quad (16)$
	$C_D = 1 + h Kn_f \left(\frac{1 - \alpha}{Ku} \right)^{\frac{1}{3}} Pe^{\frac{1}{3}} \quad (17)$
Payet (1991)	$\eta_D = A \left(\frac{1 - \alpha}{Ku} \right)^{\frac{1}{3}} Pe^{-\frac{2}{3}} C_D C'_D \quad (18)$
	$C'_D = \frac{1}{1 + A \left(\frac{1 - \alpha}{Ku} \right)^{\frac{1}{3}} Pe^{-\frac{2}{3}} C_D} \quad (19)$

Der Cunningham-Korrekturfaktor berechnet sich zu:

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p} \left[2,34 + 1,05 \exp \left(-0,39 \frac{d_p}{\lambda} \right) \right] \quad (20)$$

Kirsch und Fuchs (1968) haben den Faktor 2 als empirischen Koeffizienten aus ihren Messwerten ermittelt. Die weiteren Ansätze beinhalten den Kuwabara-Faktor und/oder die Faserknudsenzahl. Analog zur Interzeption wird auch hier der Schlupf an der Faseroberfläche berücksichtigt. Der Koeffizient A wurde zu 1,6 bestimmt [40]; h zu 0,388 [39] bzw. zu $1,502 \text{ Pe}^{-0,62}$ [42].

In Abbildung 4.7-2 sind die Péclet-Zahlenwerte für unterschiedliche monodisperse Faserdurchmesser gegenübergestellt. Ab einer Partikelgröße von ca. 100 nm nimmt die Péclet-Zahl aufgrund des stark fallenden Diffusionskoeffizienten deutlich zu und die Abhängigkeit vom Faserdurchmesser deutlich ab. Durch die reziproke Abhängigkeit der Abscheidung von der Péclet-Zahl und die Proportionalität zur Faserknudsenzahl, die bei größerem Faserdurchmesser kleiner wird, ist die Abscheidung aufgrund der Diffusion für nanoskalige Fasern besonders groß.

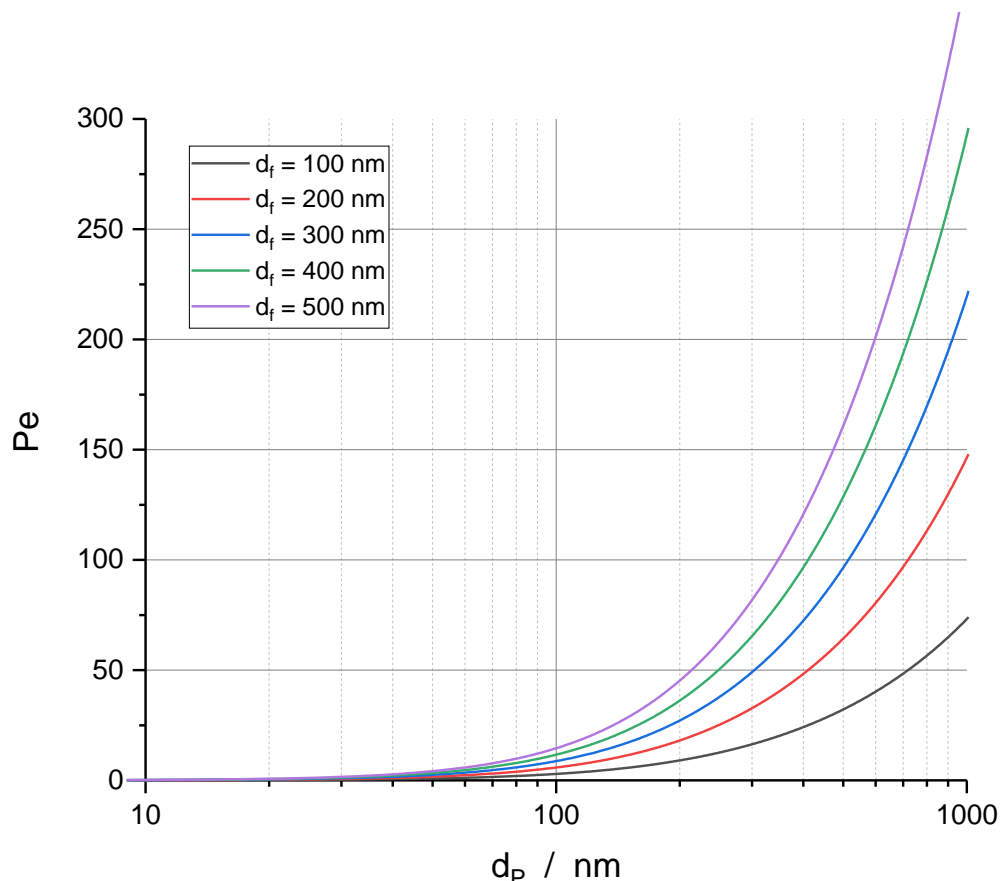


Abbildung 4.7-2: Péclet-Zahlen für unterschiedliche Faserdurchmesser ($U_0 = 2 \text{ cm/s}$)

Für den Einzelfaserabscheidegrad aufgrund der Polarisation von Partikeln von

elektrostatisch geladenen Fasern (Annahme: unipolare Faserladung) wurde folgender Ansatz gewählt [8]:

$$\eta_{Q0} = \left(\frac{3 \pi N_{Q0}}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (21)$$

mit der dimensionslosen Kennzahl:

$$N_{Q0} = \frac{Q^2 d_p^2 C_C}{3 \pi^2 \varepsilon_0 \mu d_f^3 U_0 \varepsilon_p + 2} \quad (22)$$

Hier ist Q die Faserladung pro Faserlänge, ε_p die Dielektrizitätskonstante des Partikelmaterials und ε_0 die elektrische Feldkonstante ($\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$).

Für den Einzelfaserabscheidegrad aufgrund der Coulombkraft zwischen geladenen Partikeln und geladenen Fasern (Annahme: unipolare Faserladung) wurde folgender Ansatz gewählt:

$$\eta_{Qq} = \pi N_{Qq} \quad (23)$$

mit der dimensionslosen Kennzahl:

$$N_{Qq} = \frac{Q q C_C}{3 \pi^2 \varepsilon_0 \mu d_p d_f U_0} \quad (24)$$

mit der mittleren Partikelladung q als Produkt der mittleren Elementarladungsanzahl n_q und der Elementarladung e .

Für den Einzelfaserabscheidegrad aufgrund der Spiegelladungskräfte von geladenen Partikeln und ungeladenen Fasern wurde folgender Ansatz gewählt:

$$\eta_{0q} = 1,5 N_{0q}^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

mit der dimensionslosen Kennzahl:

$$N_{0q} = \left(\frac{\varepsilon_f - 1}{\varepsilon_f + 1} \right) \frac{q^2 C_C}{12 \pi^2 \mu U_0 \varepsilon_0 d_p d_f^2} \quad (26)$$

Im Falle des Ladungsgleichgewichtes (Gauß-Verteilung) des Partikelkollektivs ist n_q :

$$\bar{n}_q = 2,4 d_p^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

mit dem Partikeldurchmesser in μm .

Die Abscheideeffizienz E (Retention) des Filtervlieses auf Basis der superponierten Einzelfaserabscheidegrade η_{Σ} berechnet sich zu:

$$E = 1 - P = 1 - \exp(-F \eta_{\Sigma}) \quad (28)$$

wobei

$$F = \frac{4 \alpha t}{\pi (1 - \alpha) d_f} \quad (29)$$

mit der Dicke des Filtervlieses t und der Penetration P . Da der Partikelgrößenbereich 5 nm bis 500 nm betrachtet wird, beschränkt sich die Superposition der Einzelfaserabscheidegrade auf die Mechanismen:

- Diffusion
- Interzeption
- Elektrostatik
 - Polarisierung ungeladener Partikel von geladenen Fasern
 - Coulomb-Wechselwirkung zwischen geladenen Partikeln und geladenen Fasern
 - Spiegelladungskräfte durch geladene Partikel an ungeladenen Fasern

Die Impaktion [43]

$$\eta_I = \frac{Stk^3}{Stk^3 + 0,77 Stk^2 + 0,22} \quad (30)$$

mit der Stokes-Zahl

$$Stk = \frac{\rho_p d_p^2 C_c U_0}{18 \eta d_f} \quad (31)$$

und Sedimentation durch Gravitationskräfte [9]

$$\eta_I = \pm G (1 + R) \quad (32)$$

mit dem dimensionslosen Parameter

$$G = \frac{\rho_g d_p^2 C_c g}{18 \eta U_0} \quad (33)$$

sind allgemein im Modell hinterlegt, können jedoch aufgrund des betrachteten Partikelgrößenbereiches vernachlässigt werden, da die Impaktion verschwindend gering ist. Damit ergibt sich:

$$\eta_{\Sigma} \approx \eta_D + \eta_R \quad (34)$$

bzw.

$$\eta_{\Sigma} = 1 - (1 - \eta_D)(1 - \eta_R) \quad (35)$$

Hat die elektrostatische Abscheidung einen Einfluss – sind also die Partikel und/oder Fasern geladen – wird diese durch Hinzufügen eines weiteren Summanden berücksichtigt.

Für die Berechnung des Druckverlustes wurde Darcys Gesetz für poröse Medien auf Faserfilter übertragen [44]:

$$\Delta p = f(\alpha) \frac{t \eta U_0}{d_f^2} \quad (36)$$

Hierbei stellt $f(\alpha)$ den dimensionslosen Widerstandskoeffizienten dar, der eine Funktion der Packungsdichte α ist. Die Übertragbarkeit ist gültig, wenn für die Faser-Reynoldszahl

$$Re_f = \frac{\rho_f d_f U_0}{\eta} < 1 \quad (37)$$

gilt. Mit ρ_f als Dichte des Fasermaterials. Davies führte Messungen an unterschiedlichen Filtermaterialien mit Faserdurchmessern von 1,6 μm bis 80 μm und Packungsdichten von 0,006 bis 0,3 durch und hat damit die empirische Beziehung

$$f(\alpha) = 64\alpha^{1,5} (1 + 56\alpha^3) \quad (38)$$

aufgestellt [44]. Diese wurde von Werner und Clarenburg (1965) anhand von 50 Messungen an Filtern mit geringeren Faserdurchmessern (0,097 μm bis 1,53 μm) und Packungsdichten von 0,039 bis 0,084 validiert [45]. Somit also auch für den Strömungsbereich, in dem Schlupf an der Faseroberfläche auftritt (vgl. Abbildung 4.7-1). Für den Bereich $Kn_f < 0,25$ wurde auf Grundlage des Kuwabara-Strömungsfeldes mit aerodynamischem Schlupf [8]

$$f(\alpha) = \frac{16 \alpha (1 + 1,996 Kn_f)}{Ku + 1,996 Kn_f \left(-\frac{1}{2} \ln(\alpha) - \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \alpha^2 \right)} \quad (39)$$

berechnet. In der Literatur sind weitere empirische Ansätze für den Bereich der Kontinuumsströmung, wie die von:

Jackson und James (1986)

$$f(\alpha) = \frac{80 \alpha}{3 (-\ln(\alpha) - 0,931)} \quad (40)$$

Drummond und Tahir (1984)

$$f(\alpha) = \frac{32 \alpha}{-\ln(\alpha) - 1,476 + 2 \alpha - 1,774 \alpha^2} \quad (41)$$

sowie für den Bereich, in dem Schlupf auftritt, zu finden:
Ogorodnikov (1976)

$$f(\alpha) = \frac{16 \alpha}{-0,5 - 0,5 \ln(\alpha) + 1,15 Kn_f (1 - \alpha)^4} \quad (42)$$

Ogorodnikov (1976) hat Versuche mit Faserdurchmessern von 200 nm durchgeführt und seine experimentellen Ergebnisse mit oben genannter Formel angefügt. Vom Aufbau ähnelt sie der auch für Schlupf berechneten Gleichung (39), die im Buch von Brown (1993) zu finden ist.

Vergleich der dimensionslosen Widerstandskoeffizienten

Anhand der Daten aus der Veröffentlichung von Hung und Leung (2011) soll der Einfluss der unterschiedlichen vorgestellten Widerstandskoeffizienten quantifiziert werden. Anschließend wird dieses Prozedere an eigenen experimentellen Daten durchgeführt, um so eine stichhaltige Aussage zur Anwendbarkeit der einzelnen Formeln – für die im Projekt geforderten Bedingungen – treffen zu können.

In der erwähnten Veröffentlichung wurden die Filtermedien mit einer quasi-monodispersen Fasergrößenverteilung durch Elektrosinnen hergestellt. Mit diesem Prozess können sehr dünne Fasern ($d_f \ll 1000$ nm) aus Polymerlösungen durch die Behandlung mit einem elektrischen Feld hergestellt werden. Die Parameter einiger dieser Filter sind in Tabelle 4.7-4 dargestellt.

Tabelle 4.7-4: Physikalische Parameter der Nanofaserfilter [42]

Filter	S	M1	M4	L
d_f [nm]	94	185	185	220
Kn_f	1,443	0,733	0,733	0,617
w [g/m ²]	0,042	0,042	0,333	0,361
α [$\times 10^{-3}$]	$6,4 \pm 0,75$	$6,3 \pm 0,66$	$19,6 \pm 2,44$	$23,3 \pm 3,01$
t [$\times 10^{-6}$ m]	$6,1 \pm 0,71$	$6,2 \pm 0,65$	$15,7 \pm 1,96$	$15 \pm 1,94$
Δp [Pa] bei 5 cm/s	$20,9 \pm 0,33$	$5,4 \pm 0,05$	$74 \pm 1,41$	$62,2 \pm 1,19$

Hierbei wurde der mittlere Faserdurchmesser d_f durch Auswertung von REM (Rasterelektronenmikroskop)-Bildern ermittelt. Mit diesem Wert und der mittleren

freien Weglänge der Luftmoleküle (hier: $\lambda = 67,8 \text{ nm}$) kann mit Gleichung (1) die Faserknudsenzahl berechnet werden. Mit

$$t = \frac{w}{\rho_f \alpha} \quad (43)$$

ergibt sich mit Darcys Gesetz (36) und dem in dieser Veröffentlichung verwendeten dimensionslosen Widerstandskoeffizienten [44]

$$\Delta p = 64\alpha^{0,5} (1 + 56\alpha^3) \frac{w \eta U_0}{\rho_f d_f^2} \quad (44)$$

Der Faktor α^3 kann durch die geringen Werte der Packungsdichte vernachlässigt werden, sodass

$$\alpha = \left(\frac{\Delta p \rho_f d_f^2}{64 w \eta U_0} \right)^2 \quad (45)$$

geschrieben werden kann. Das Flächengewicht w wird durch Ausmessen und Wiegen des betrachteten Filters bestimmt. Die Fasermaterialdichte ρ_f ist 1084 kg/m^3 , da zur Herstellung der Filter eine Polymerlösung aus Nylon 6 verwendet wurde. Der Druckverlust Δp wird durch Messung bei einer bestimmten Anströmgeschwindigkeit (hier: $U_0 = 5 \text{ cm/s}$) ermittelt. Somit sind alle Parameter bekannt und die Packungsdichte α kann mit (45) berechnet werden. Anschließend kann über (43) die Schichthöhe t bestimmt werden. Diese Herangehensweise ist deshalb sinnvoll, da die Schichthöhe von Nanofaserschichten experimentell nur schwierig zu ermitteln ist. Eine Möglichkeit wären Querschnittsaufnahmen des Filters im REM aufzunehmen. Dabei ergeben sich aber zwei Problematiken: durch das Pumpen des Vakuums kommt es möglicherweise zur Ausdehnung des Filters und die Präparation des Filtermaterials führt unausweichlich zur Schädigung des Materials (Schnittkante). Andere Verfahren, wie das Messen mit einer Mikrometerschraube, können nur für dickere Materialien ($t \gg 1 \text{ }\mu\text{m}$) sinnvoll eingesetzt werden. Da die Druckverlustmessung immer eine bestimmte Messungenauigkeit aufweist (hier: $\pm 1-4 \%$), muss berücksichtigt werden, dass sich diese durch die Berechnung auch auf die Packungsdichte und auf die Schichthöhe auswirkt. Damit ergibt sich ein gewisser Toleranzbereich. Die Abweichungen bei der Bestimmung des Flächengewichts, der Anströmgeschwindigkeit und der dynamischen Viskosität sind vergleichsweise gering und können somit vernachlässigt werden. Der Einfluss der Variation des mittleren Faserdurchmessers wird später ausführlich diskutiert. Mathematisch lassen sich die Unsicherheiten der Variablen in Gleichung (45) als Differentiale der einzelnen Parameter schreiben:

$$\frac{1}{2} \frac{d(\alpha)}{\alpha} = \frac{d(\Delta p)}{\Delta p} + 2 \frac{d(d_f)}{d_f} + \frac{d(\rho_f)}{\rho_f} - \frac{d(\eta)}{\eta} - \frac{d(U_0)}{U_0} - \frac{d(w)}{w} \quad (46)$$

Wie zuvor beschrieben, wird der Druckverlust und der Faserdurchmesser experimentell bestimmt, womit sich für die Unsicherheit der Packungsdichte $d(\alpha)$

$$\frac{d(\alpha)}{\alpha} = 2 \left[\frac{d(\Delta p)}{\Delta p} + 2 \frac{d(d_f)}{d_f} \right] \quad (47)$$

ergibt.

Tabelle 4.7-5: Gleichungen zur Berechnung der Packungsdichte

Quelle	Gleichung
Davies (1952)	$\alpha = \left(\frac{\Delta p \rho_f d_f^2}{64 w \eta U_0} \right)^2 \quad (48)$
Ogorodnikov (1976)	$\alpha = \exp \left(-32 \frac{\eta w U_0}{\Delta p \rho_f d_f^2} + 2,3 Kn_f - 1 \right) \quad (49)$
Drummond und Tahir (1984)	$\alpha = \exp \left(-32 \frac{\eta w U_0}{\Delta p \rho_f d_f^2} - 1,476 \right) \quad (50)$
Jackson und James (1986)	$\alpha = \exp \left(-\frac{80}{3} \frac{\eta w U_0}{\Delta p \rho_f d_f^2} - 0,931 \right) \quad (51)$
Brown (1993)	$\alpha = \exp \left(\frac{1}{(1 + 1,996 Kn_f)} \left(-16 (1 + 1,996 Kn_f) \frac{\eta w U_0}{\Delta p \rho_f d_f^2} - 0,998 Kn_f - \frac{3}{2} \right) \right) \quad (52)$

Die Experimente wurden mit NaCl-Partikeln der Größen 50-500 nm durchgeführt. Diese wurden nach der Produktion (Zerstäuber und Trockner) mit einem Neutralisator in ein Ladungsgleichgewicht überführt. Für die Modellierung wurde aus diesen Gründen eine rein mechanische Abscheidung durch Diffusion und Interzeption zugrunde gelegt. Die Einzelfaserabscheidebeträge wurden mit den Gleichungen nach Lee & Liu, Liu & Rubow und Payet ((5), (16) und (18)) berechnet. Anschließend wurde der Faktor h für kleine Péclet-Zahlen ($Pe < 5$) empirisch zu

$$h = 1,502 Pe^{-0,62} \quad (53)$$

bestimmt, da der Wert von 0,388 mit größeren Péclet-Zahlen hergeleitet wurde. Der ursprüngliche Wert hat eine zu geringe Abscheideeffizienz für den Bereich der Diffusionsabscheidung ergeben. Für größere Partikel, für die das Interzeptionsregime dominant ist, nähern sich die Ergebnisse beider Werte an.

Um sowohl eine qualitative als auch quantitative Aussage über die verschiedenen Ansätze zur Berechnung des dimensionslosen Widerstandskoeffizienten (Gleichungen (38)-(42)) zu treffen, werden diese im Folgenden miteinander verglichen. Wie zuvor erwähnt, wird mit Hilfe dieser Gleichungen die Packungsdichte berechnet. Dafür werden sie nach α aufgelöst und es ergeben sich die in Tabelle 4.7-5 dargestellten Formeln.

Damit die Beziehungen nach α umgestellt werden können, mussten zum Teil vereinfachende Annahmen getroffen werden. Dies soll am Beispiel der Gleichung von Brown (39) (eingesetzt in (36))

$$\frac{\Delta p \rho_f d_f^2}{w \eta U_0} = \frac{16 (1 + 1,996 Kn_f)}{-\frac{1}{2} \ln(\alpha) - \frac{3}{4} + \alpha - \frac{1}{4} \alpha^2 + 1,996 Kn_f \left(-\frac{1}{2} \ln(\alpha) - \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \alpha^2\right)} \quad (54)$$

erläutert werden. Als erstes lässt sich die Gleichung umschreiben in

$$\frac{\Delta p \rho_f d_f^2}{w \eta U_0} = \frac{16 (1 + 1,996 Kn_f)}{-\frac{1}{2} \ln(\alpha) (1 + 1,996 Kn_f) + \alpha - \frac{1}{4} \alpha^2 (1 - 1,996 Kn_f) - 0,499 Kn_f - \frac{3}{4}} \quad (55)$$

Damit es möglich ist die Gleichung nach α umzustellen, muss die Annahme getroffen werden, dass der Term $\alpha - \frac{1}{4} \alpha^2 (1 - 1,996 Kn_f)$ gegen 0 strebt. So ergibt sich:

$$\frac{\Delta p \rho_f d_f^2}{w \eta U_0} = \frac{16 (1 + 1,996 Kn_f)}{-\frac{1}{2} \ln(\alpha) (1 + 1,996 Kn_f) - 0,499 Kn_f - \frac{3}{4}} \quad (56)$$

In Abbildung 4.7-3 ist dieses Vorgehen für diesen und für die anderen Ansätze dargestellt, indem die Abweichungen vom ursprünglichen Wert für $f(\alpha)$ (ohne Vereinfachung) über die Packungsdichte aufgetragen ist. Da die Gleichungen nach Brown und Ogorodnikov zudem von der Faserknudsenzahl und damit vom Faserdurchmesser abhängig sind, wurden die Abweichungen für die drei verschiedenen Faserdurchmesser aus der Veröffentlichung bestimmt. Es ist zu erkennen, dass die getroffenen Annahmen für kleine Werte der Packungsdichte ($\alpha < 0,025$) (s. Werte in Tabelle 4.7-4) eine sehr gute Näherung darstellen.

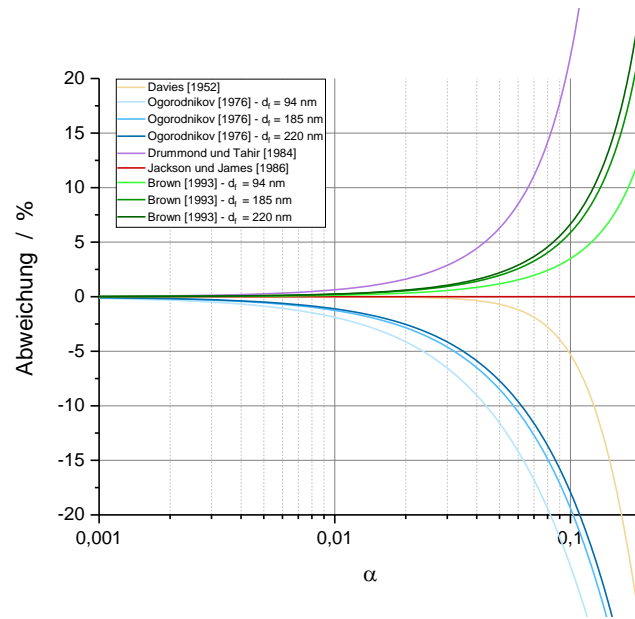


Abbildung 4.7-3: Abweichung des dimensionslosen Widerstandskoeffizienten nach Vereinfachung zur Packungsdichten-Berechnung

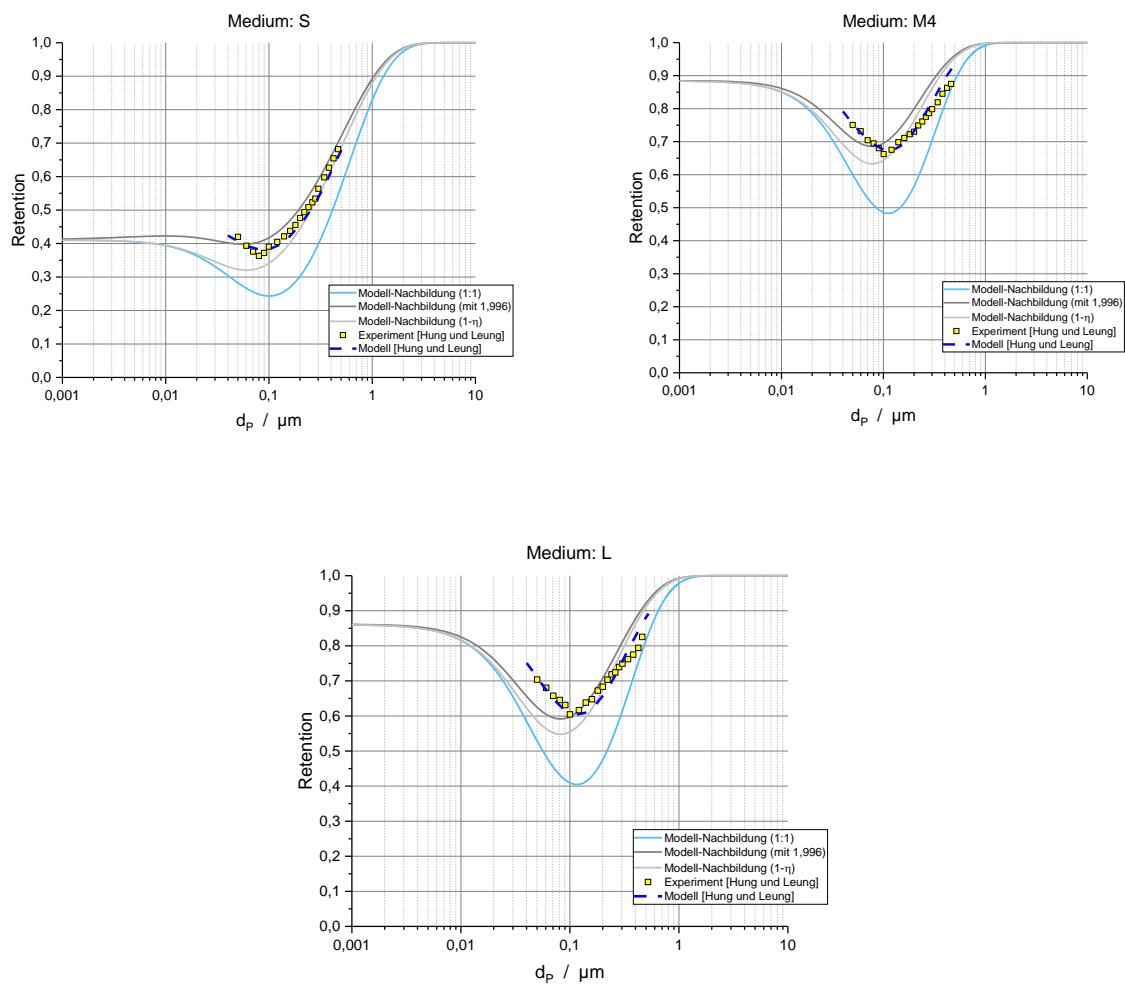


Abbildung 4.7-4: Nachbildung des Modells von Hung und Leung (2011)

Aus der Veröffentlichung von Hung und Leung (2011) [42] wurden die Abscheidekurven mit Hilfe der angegebenen Formeln und Daten berechnet (s. Abbildung 4.7-4). Aufgrund des steigenden Diffusionskoeffizienten würde man für Partikelgrößen kleiner als 10 nm eine Retention von nahezu 100 % erwarten. Ein „thermal rebound“, also ein erneutes Absinken der Abscheidewahrscheinlichkeit für Partikel kleiner als 3 nm, ist im Modell nicht berücksichtigt, da es u.a. Gegenstand derzeitiger Forschungsarbeiten ist. Damit sind die verwendeten empirischen Gleichungen offensichtlich für Partikel kleiner als 50 nm nicht geeignet. Dies liegt insbesondere am Korrekturterm C'_D (19). In der Veröffentlichung selbst wird auch nur der Partikelgrößenbereich von 50-500 nm experimentell untersucht und für das Modell von 40 bis 525 nm angegeben. Die von Hung und Leung zitierte Studie von Payet et al. (1991) [46] hat den Korrekturfaktor für einen Bereich ab 20 nm aufgestellt, jedoch ohne eine Beschränkung für kleinere Partikelgrößen, bzw. kleinere Péclet-Zahlen zu nennen. Zudem wurde der Korrekturfaktor der Interzeption C_R [39] ohne den Faktor 1,996 aufgeführt [sic]:

$$C_R = 1 + \frac{Kn_f}{R} \quad (57)$$

Um zu überprüfen, ob es sich nur um einen typographischen Fehler handelt, wurde die Berechnung einmal mit und einmal ohne diesen Faktor durchgeführt. Wie in Abbildung 4.7-6 zu erkennen, liegen die Werte mit dem ursprünglichen Faktor deutlich näher an dem präsentierten Modell, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass die Berechnung korrekt durchgeführt wurde. Zum Vergleich wurden zudem die Gesamt-Einzelfaserabscheideeffizienzen mit den Gleichungen (34) und (35) kalkuliert und gegenübergestellt. In der Veröffentlichung wurde der Ansatz gewählt, die einzelnen Beiträge zu summieren. Wie der Abbildung und der Literatur [9] zu entnehmen, wird durch die einfache Summation die Abscheidung tendenziell etwas überbewertet, stellt jedoch eine gute Näherung dar, wenn der etwas genauere Ansatz nach Gleichung (35) nicht verwendbar ist. Dies ist der Fall, wenn die einzelnen Einzelfaserabscheidebeiträge größer als 1 sind und nicht unabhängig voneinander agieren [9]. Allgemein ergeben sich bei der Modell-Nachbildung höhere Werte für die Interzeptions- und geringere für die Diffusionsabscheidung. Das von Hung und Leung [42] vorgestellte Modell wird also nicht exakt getroffen. Gründe dafür könnten Variationen in der mittleren freien Weglänge λ , der Temperatur T und damit dem Diffusionskoeffizienten D und der dynamischen Viskosität η sein, da diese nicht angegeben wurden. Wie in Tabelle 4.7-4 dargestellt, unterliegt z.B. der Druckverlust Δp Schwankungen. Hier fehlen die Angaben in der Veröffentlichung welche Werte genau zugrunde gelegt wurden. Da die Abweichungen aber bei allen

drei Filtern die gleiche Form besitzen, lassen sich an den modellierten Abscheidegradkurven weitere Untersuchungen anstellen.

Dazu wurde im ersten Schritt der Faktor C'_D vernachlässigt, da in diesem Projekt auch die Abscheidung von Partikelgrößen < 20 nm relevant ist und somit ein wie oben beschriebenes Erreichen einer Maximalretention deutlich kleiner als 100 % in diesem Bereich nicht zulässig ist. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 4.7-5. Auf Anhieb ist zu erkennen, dass die Modellierungsergebnisse deutlich besser, sowohl mit den experimentellen Daten als auch mit dem Modell von Hung und Leung, übereinstimmen. Außerdem strebt die Abscheidung für Partikeldurchmesser kleiner als ca. 20 nm gegen 100 %, was so auch, im Gegensatz zum vorherigen Modellierungsansatz, experimentell beobachtet wird. Als nächstes soll der Einfluss des von den Autoren modifizierten Faktors

$$h = 1,502 Pe^{-0,62} \quad (58)$$

mit dem ursprünglichen [39]

$$h = 0,388 \quad (59)$$

der in Gleichung (17) eingesetzt wird, verglichen werden. Die modellierten Abscheidegrade sind in Abbildung 4.7-6 zu sehen. Mit dem ursprünglichen Faktor [39] verläuft der Diffusionsast etwas flacher und trifft damit die experimentellen Ergebnisse besser. Bei der Anpassung des Faktors h von Hung und Leung an die experimentellen Ergebnisse wurde wie zuvor erwähnt der Korrekturfaktor C'_D verwendet, der die Diffusionsabscheidung – für sehr kleine Partikelgrößen unrealistisch – stark verringert. Wird dieser Faktor nicht verwendet, überschätzt der neue Zusammenhang für h jedoch den Einfluss der Diffusion. Allgemein lässt sich aus den Abbildungen extrahieren, dass weder die Anpassung durch den Korrekturfaktor C'_D noch die durch h zu verbesserten Ergebnissen führt – zumindest, wenn der gesamte Partikelgrößenbereich untersucht werden soll und die Betrachtung der Abscheidung sehr kleiner Partikel relevant ist.

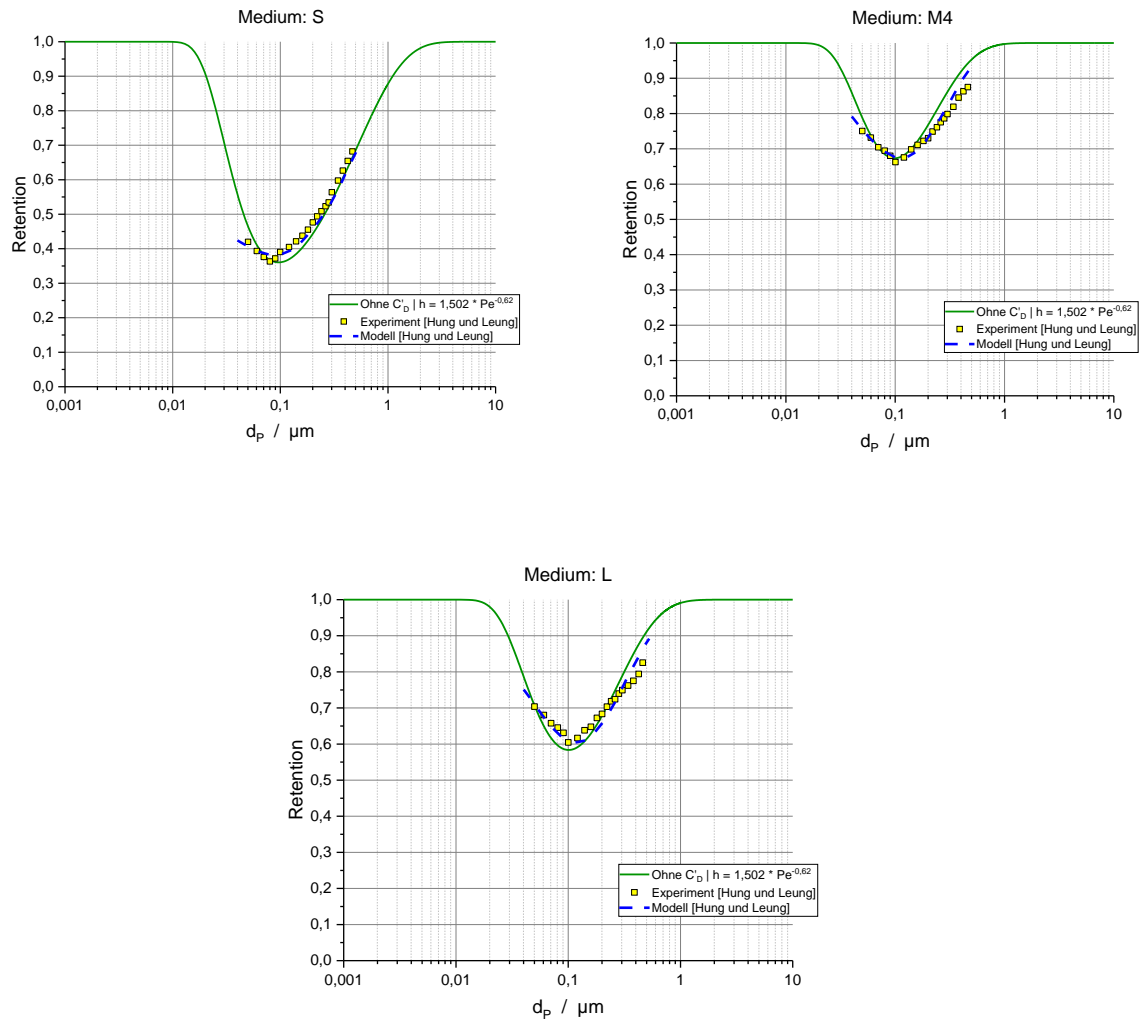
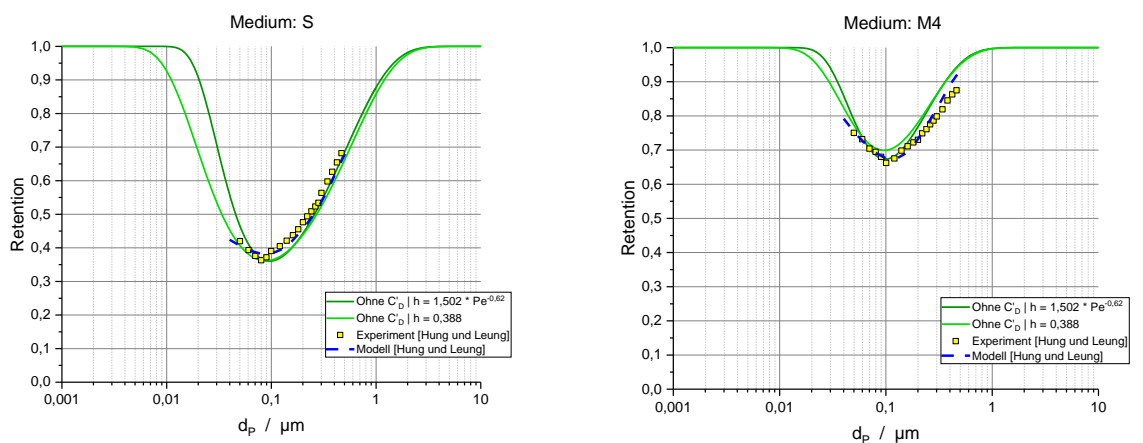


Abbildung 4.7-5: Vergleich der Modellierungsergebnisse ohne den Faktor C'_D mit dem Modell und den experimentellen Daten von Hung und Leung (2011)



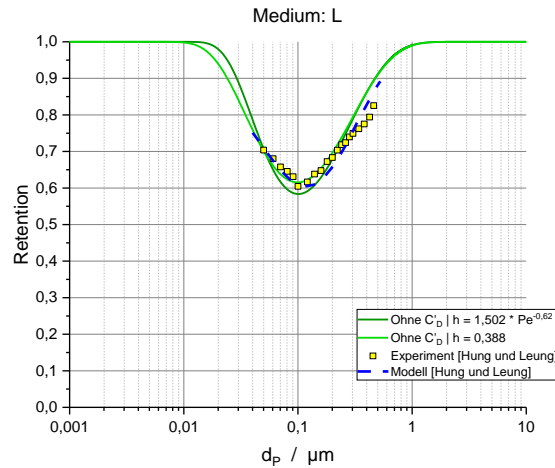


Abbildung 4.7-6: Vergleich der Faktoren $h = 0,388$ und $h = 1,502 Pe^{-0,62}$

Tabelle 4.7-6: Filter S - Vergleich der Ansätze zur Berechnung der Packungsdichte

Filter: S ($\Delta p = 20,9$ Pa bei 5 cm/s)	Hung und Leung (2011)	Davies (1952)	Ogorodnikov (1976)	Drummond und Tahir (1984)	Jackson und James (1986)	Brown (1993)
$\alpha [\times 10^{-3}]$	6,4	6,6	20,8	0,5	2,3	21,6
$t [\times 10^{-6} \text{ m}]$	6,1	5,9	1,9	79,7	16,6	1,8

Tabelle 4.7-7: Filter M4 - Vergleich der Ansätze zur Berechnung der Packungsdichte

Filter: M4 ($\Delta p = 74,0$ Pa bei 5 cm/s)	Hung und Leung (2011)	Davies (1952)	Ogorodnikov (1976)	Drummond und Tahir (1984)	Jackson und James (1986)	Brown (1993)
$\alpha [\times 10^{-3}]$	19,6	19,8	55,5	6,5	20,3	68,0
$t [\times 10^{-6} \text{ m}]$	15,7	15,5	5,5	47,1	15,1	4,5

Tabelle 4.7-8: Filter L - Vergleich der Ansätze zur Berechnung der Packungsdichte

Filter: L ($\Delta p = 62,2$ Pa bei 5 cm/s)	Hung und Leung (2011)	Davies (1952)	Ogorodnikov (1976)	Drummond und Tahir (1984)	Jackson und James (1986)	Brown (1993)
$\alpha [\times 10^{-3}]$	23,3	23,8	58,2	8,9	26,4	76,3
$t [\times 10^{-6} \text{ m}]$	15,0	14,0	5,7	37,4	12,6	4,4

In Abbildung 4.7-7 und den Tabellen Tabelle 4.7-6, Tabelle 4.7-7 und Tabelle 4.7-8 sind die verschiedenen Ansätze zur Berechnung der Packungsdichte und den daraus resultierenden Werten gegenübergestellt. Die besten Übereinstimmungen werden durch die Gleichungen nach Davies (1952) [44] und Jackson und James (1986) [47] erhalten. Für die Filter M4 und L sind die Ergebnisse fast deckungsgleich, für den Filter S unterschätzt der Ansatz nach Jackson und James (1986) die Packungsdichte und damit die Abscheidung etwas. Hier gibt es eine bessere Übereinstimmung mit den Berechnungen nach Ogorodnikov (1976) [48] und Brown (1993) [8], die die Abscheideeffizienz in den anderen beiden Fällen jedoch deutlich überschätzen – hier wird der positive Effekt durch den Schlupf möglicherweise zu stark eingeschätzt. Das Vorgehen nach Drummond und Tahir (1984) [49] ergibt durchweg zu geringe Werte für Packungsdichte und Abscheidung.

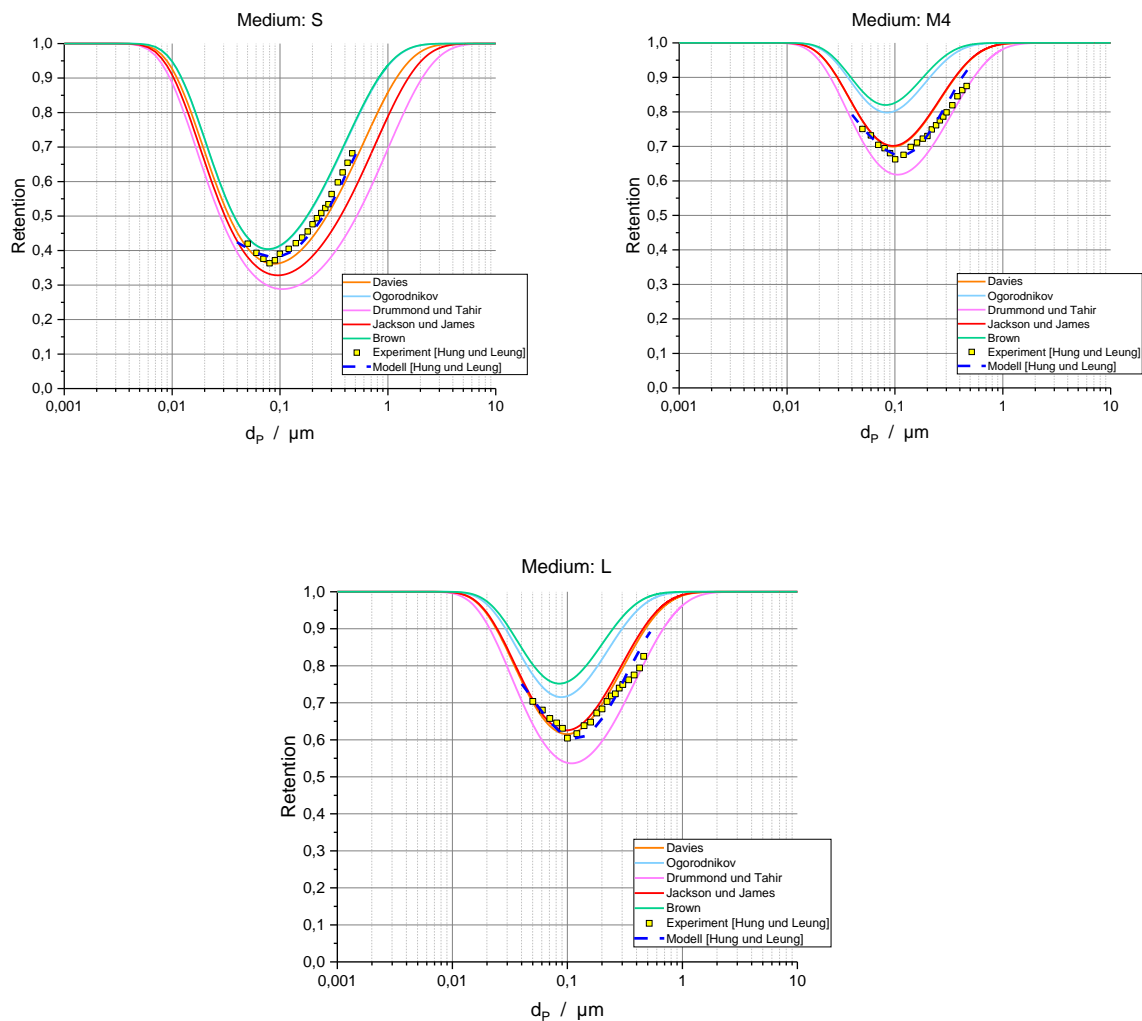


Abbildung 4.7-7: Vergleich der Ansätze zur Berechnung der Packungsdichte α

Diese Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt mit den eigenen experimentellen Messungen an Nanofasermedien (vgl. Kapitel 4.2) überprüft.

Als erstes soll dies am Beispiel des Mediums C präsentiert werden. Dieses besteht aus einer einzelnen Nanofaserschicht. Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, gibt der Hersteller eine mittlere Fasergröße von 250 nm mit einer Abweichung von $\pm 40\%$ an. Hier ergibt sich eine deutliche Diskrepanz zu den gemessenen Werten von ca. 78,5 nm mit einer Abweichung von $\pm 29,2\%$ (vgl. Tabelle 4.2-3). Mit Gleichung (47) wurde aufgezeigt, welche Faktoren und mit welchem Ausmaß diese eine Ungenauigkeit bei der Berechnung der Packungsdichte darstellen. Insbesondere der mittlere Faserdurchmesser spielt hier eine entscheidende Rolle, da genau dieser einen großen Einfluss bei der Berechnung der Packungsdichte hat, hier jedoch zwei stark abweichende Angaben gegenüberstehen. Um abzuschätzen, welche Angabe für die Modellierung geeigneter ist, wird anhand der Reichweite der Fasergrößenverteilung ein Minimal- und ein Maximalwert für die Packungsdichte (nach Davies, Gleichung (48)) und anschließend mit Gleichung (43) ein Minimum und Maximum für die Schichthöhe des Filtermediums berechnet. Diese Werte können dann mit denen aus den REM-Aufnahmen verglichen werden (ca. 7 bis 20 μm , vgl. Tabelle 4.2-3). Die Ergebnisse dieser Berechnungen zeigt Tabelle 4.7-9. Der Druckverlust wurde bei einer Anströmgeschwindigkeit von 2 cm/s zu 288 Pa bestimmt.

Tabelle 4.7-9: Vergleich der experimentellen Daten mit den Herstellerangaben und Berechnung der Schichthöhe für das Medium C

	Messungen		Herstellerangaben	
	Fasermaterial (Dichte)	PVDF (1780 kg/m ³)		
Flächengewicht	6,0 g/m ²		6,0 g/m ²	
Faserdurchmesser – Mittelwert	78,5 nm		250 nm	
Faserdurchmesser – proz. Abw.	29,2 %		40,0 %	
Faserdurchmesser – Min. Max.	55,58 nm	101,42 nm	150 nm	350 nm
Packungsdichte – Min. Max.	0,00013	0,00144	0,00689	0,20409
Schichthöhe – Max. Min.	2,6 cm	2,34 mm	490 μm	16,5 μm

Den Berechnungen ist zu entnehmen, dass die Schichthöhe, die mit der oberen Grenze des Faserdurchmessers der Herstellerangabe berechnet wurde, genau in dem aus den REM-Aufnahmen bestimmten Größenintervall von 7-20 μm liegt. Die Schichthöhen, die sich aus den Faserdurchmesser-Auswertungen der REM-Aufnahmen ergeben, sind hingegen deutlich zu groß. In den Abbildung 4.2-15 bis Abbildung 4.2-18 sind Verklumpungen durch Zusammenballungen von Fasern und/oder Inhomogenitäten des Herstellungsprozesses zu erkennen.

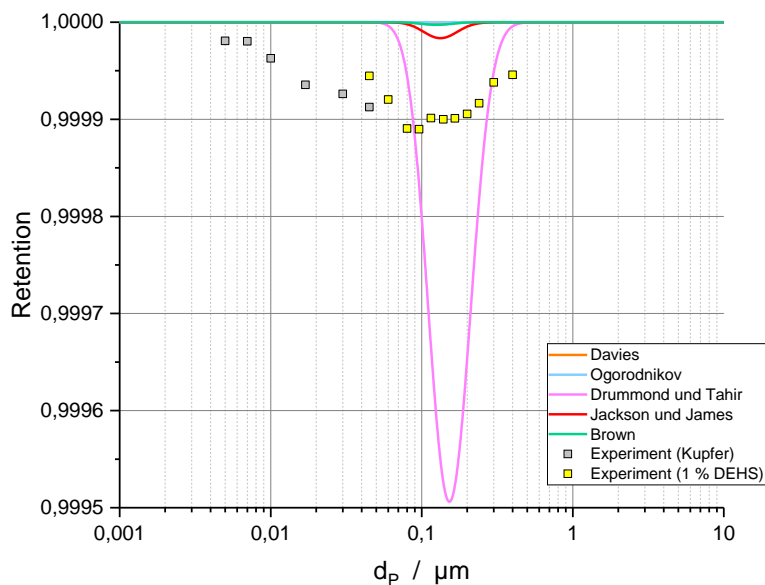


Abbildung 4.7-8: Modellierung des Mediums C (ohne C'_D -Faktor)

Diese haben deutlich größere Ausmaße als die eigentlichen Nanofasern und können somit einen Grund für diese Diskrepanz darstellen, da sich mit ihnen auch das Strömungsprofil und damit der Druckverlust verändert. Für eine detailliertere Beschreibung dieses Phänomens sei auf die Veröffentlichung „Slip-Effect Functional Air Filter for Efficient Purification of $\text{PM}_{2.5}$ “ [50] verwiesen. Aufgrund dieser Untersuchungen wird die Modellierung im Folgenden mit einem mittleren Faserdurchmesser von 350 nm durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.7-8 zu sehen. Hier wurde der gleiche Formelsatz wie zuvor zur Berechnung der Abscheidungsbeiträge gewählt. Dies wurde zudem für alle Ansätze der Packungsdichte wiederholt. Es ist zu erkennen, dass anders als zuvor die experimentellen Ergebnisse von keinem der Ansätze genau getroffen werden. Dies wird jedoch teilweise durch die Skalierung der y-Achse relativiert, da sich die Abscheidung in einem sehr hohen Retentionsbereich bewegt. Beispielsweise beträgt die absolute Abweichung der Berechnung nach Jackson und James zu den

experimentellen Ergebnissen für Partikel mit einem Durchmesser von 100 nm ca. $9,13 \cdot 10^{-5}$. Auffällig ist, dass der Ansatz nach Drummond und Tahir erneut die Abscheidung deutlich unterschätzt, genau wie bei der vorherigen Betrachtung, weshalb dieser in den nachfolgenden Modellierungen nicht weiterverfolgt werden soll. Im vorangegangenen Abschnitt wurde der Einfluss des Faktors C'_D auf die berechneten Ergebnisse aufgezeigt.

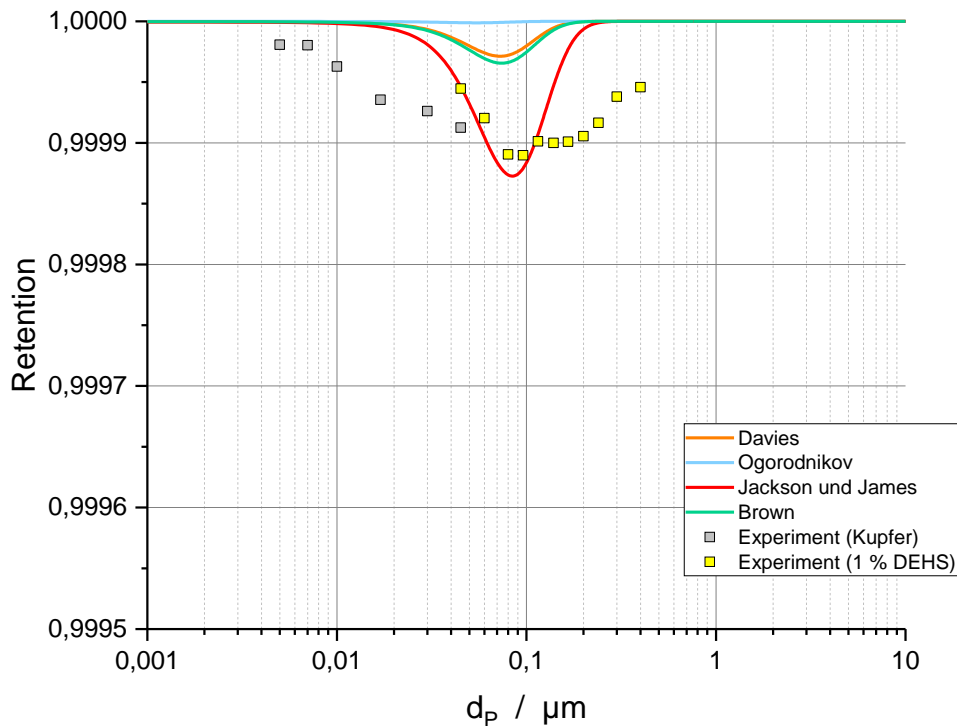


Abbildung 4.7-9: Modellierung des Mediums C (mit C'_D -Faktor)

Durch dessen Verwendung wurde die Diffusionsabscheidung verringert – für sehr kleine Partikel jedoch so unrealistisch, dass sich selbst für Partikel < 10 nm Retentionswerte deutlich unter 100 % ergaben, was nicht den Erfahrungen in der Praxis entspricht, da die Abscheidung durch den erhöhten Diffusionskoeffizienten zunimmt. Weil die Ergebnisse in Abbildung 4.7-8 zu hohe Abscheidewerte zeigen, wurde die Modellierung noch einmal zusätzlich mit Berücksichtigung dieses Faktors durchgeführt. Das Resultat zeigt Abbildung 4.7-9. Zu erkennen ist eine verbesserte Übereinstimmung der berechneten mit den experimentellen Ergebnissen. Besonders der Ansatz nach Jackson und James zeigt für den diffusions-dominierten Ast der Retentionskurve eine sehr gute Übereinstimmung mit den DEHS-Messungen. Ein Grund für die Abweichung zu den Ergebnissen, die mit den Silberpartikeln erhalten wurden, kann zum Beispiel die Annahme von kugelförmigen Partikeln sein: Partikel

mit anderen geometrischen Formen, wie z.B. Würfel, Pyramiden, u. ä. werden von Fasern schlechter abgeschieden [51]. Die flüssigen DEHS-Partikel hingegen können als ideale Kugeln angenommen werden, da dies für flüssige Partikel aufgrund der Oberflächenspannung die energetisch günstigste Morphologie darstellt. Des Weiteren oxidieren Metallnanopartikel aufgrund der hohen spezifischen Oberfläche quasi instantan, wenn sie Sauerstoff (bzw. Luft) ausgesetzt sind. Die Partikel werden nach der Erzeugung durch den Funkengenerator mit Hilfe von Inertgas bis zum DMA transportiert, in dem sie dann klassiert werden. Bis sie das Filtermedium erreicht haben, kann sich also eine signifikante Oxidationsschicht auf der Partikeloberfläche bilden. Der durch den DMA klassierte und angegebene Durchmesser stimmt dann nicht mehr mit dem Partikeldurchmesser, der das Medium passiert, überein. Da größere Partikel eine erhöhte Penetration aufweisen, ergibt sich ggf. ein zu geringer Retentionswert für die eigentlich angenommene Partikelgröße. Der Einsatz des Faktors C'_D nach Gleichung (19) wirkt sich in diesem Fall also positiv auf die Modellierungsergebnisse aus, da die Retention für sehr kleine Partikel gegen 100 % strebt. Aus diesem Grund wird im Folgenden analysiert wann der Faktor physikalisch sinnvoll eingesetzt werden kann und von welchen Faktoren dies abhängt. Allgemein wird die Retention nach Gleichung (28) berechnet:

$$E = 1 - P = 1 - \exp(-F \eta_\Sigma)$$

mit

$$F = \frac{4 \alpha t}{\pi (1 - \alpha) d_f}$$

η_Σ wird durch die Berechnung mit Gleichung (35) und dem Ansatz nach Payet (Gleichung (19)) für sehr kleine Partikel ca. 1. Damit die Retention für diese Partikel ebenso gegen 1 (= 100 %) strebt, muss gelten:

$$P_{\eta_\Sigma=1} = \exp(-F) = \exp\left(-\frac{4 \alpha t}{\pi (1 - \alpha) d_f}\right) \approx 0$$

Also:

$$\frac{4 \alpha t}{\pi (1 - \alpha) d_f} = \frac{4}{\pi} \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} \frac{t}{d_f} \rightarrow \infty$$

Um den möglichen Geltungsbereich von Gleichung (17) im Hinblick auf Schichthöhe und Faserdurchmesser abzuschätzen, muss der Faktor $\alpha/(1-\alpha)$, also die Packungsdichte α minimal sein. Durch Vergleich mit den vorherigen Ausführungen ergibt sich dafür ein sinnvoller Wert von $\alpha = 0,006$. Dieser stellt sowohl das von Davies (1952) als auch von Hung und Leung (2011) untersuchte Minimum dar. Daraus ergibt sich:

$$\frac{4}{\pi} \approx 1,2732$$

$$\frac{\alpha}{(1-\alpha)} = \frac{0,006}{(1-0,006)} \approx 6,0362 \cdot 10^{-3}$$

Um eine sinnvolle Aussage für den Grenzwert des Quotienten t/d_f treffen zu können, ist in Tabelle 4.7-10 eine Wertetabelle der Exponentialfunktion $\exp(-x)$ aufgeführt.

Tabelle 4.7-10: Wertetabelle für die Funktion $\exp(-x)$

x	$\exp(-x)$
1	0,36788
2	0,13534
3	0,04979
4	0,01832
5	0,00674
6	0,00248
7	0,00091
8	0,00034
9	0,00012
10	0,00005

Hieraus lässt sich extrahieren, dass näherungsweise

$$\frac{4}{\pi} \frac{\alpha}{(1-\alpha)} \frac{t}{d_f} = 7,6853 \cdot 10^{-3} \frac{t}{d_f} > 10$$

$$\frac{t}{d_f} \gtrsim 1300$$

gelten muss, um den Faktor C'_D nach Payet sinnvoll einsetzen zu können - wenn sich die Packungsdichte in der Nähe des untersuchten Minimums ($\alpha = 0,006$) befindet. Bei anderen Werten für die Packungsdichte kann natürlich analog vorgegangen werden. Um dies an einem Beispiel zu präsentieren, werden noch einmal die angegebenen Filterparameter (Tabelle 4.7-4) und die Modellierungsergebnisse aus Abbildung 4.7-4 betrachtet. Hier liegen die Werte der Packungsdichte genau in dem Bereich, der zuvor oben untersucht wurde. Die Berechnung der Quotienten ergeben:

- Filter S: $\frac{6,1 \mu\text{m}}{94 \text{ nm}} \approx 64,89 \ll 1300$

- Filter M1: $\frac{6,3 \mu\text{m}}{185 \text{ nm}} \approx 67,02 \ll 1300$

- Filter M4: $\frac{15,7 \mu\text{m}}{185 \text{ nm}} \approx 84,86 \ll 1300$

- Filter L: $\frac{15 \mu\text{m}}{220 \text{ nm}} \approx 68,18 \ll 1300$

Nach obigen Ausführungen, sollte der Faktor C'_D also nicht verwendet werden, da die Retention somit für kleine Partikel nicht zu einem Maximum von ca. 100 % strebt. Genau das wurde auch in den modellierten Abscheidegradkurven beobachtet (vgl. Abbildung 4.7-4). Dies bestätigt also die getroffenen Annahmen und der beschriebene Ansatz kann für weitere Modellierungen übernommen werden. Für das Medium C (Abbildung 4.7-9 und Tabelle 4.7-9) ergibt sich für den Faktor F

$$F = \frac{4 \alpha t}{\pi (1 - \alpha) d_f} = \frac{4 \cdot 0,20409 \cdot 16,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{\pi (1 - 0,20409) \cdot 350 \cdot 10^{-9} \text{ m}} \approx 15,39 > 10$$

Somit ist der Einsatz von C'_D hier zulässig.

Einfluss elektrostatischer Mechanismen

Anhand des experimentell untersuchten synthetischen Filtermediums der Filterklasse F9 aus Kapitel 4.1.4 sind in Abbildung 4.7-10 die Einflüsse der einzelnen elektrostatischen Abscheidemechanismen anschaulich dargestellt. Die deutliche Verbesserung der Abscheidung resultiert aus der Polarisation (ab $d_p = 60 \text{ nm}$ der dominante Mechanismus) und der Coulomb-Wechselwirkung zwischen Fasern und Partikeln (für $d_p < 60 \text{ nm}$ dominant). Der Einfluss des Spiegelladungseffekts hingegen ist nur von der Partikelladung abhängig und verändert sich somit durch die Entladung mit Isopropanol nicht. Da der Effekt vergleichsweise gering ist, wird er oft vernachlässigt, obwohl er theoretisch immer auftritt, sofern die Partikel geladen sind. Also z.B. auch nach dem Passieren eines Neutralisators, da die Partikel dort zwar in ein Ladungsgleichgewicht überführt werden und das Aerosol als Ganzes nach außen hin neutral ist, die einzelnen Partikel hingegen zum Teil jedoch sehr wohl Ladungen tragen. Da die Wahrscheinlichkeit, dass Partikel Ladungen tragen, aber mit abnehmender Partikelgröße geringer wird, stellt die Vernachlässigung dieses Effekts in den meisten Fällen eine gute Näherung dar.

Die Polarisation von Partikeln durch geladene Fasern nimmt mit steigender Partikelgröße deutlich zu, da es innerhalb des Partikels mehr Dipole gibt, die ausgerichtet werden können und so das resultierende elektrische Feld, welches das Maß für die elektrische Attraktion von Fasern und Partikeln ist, vergrößert wird.

Die Coulomb-Wechselwirkung hingegen nimmt mit steigender Partikelgröße ab, da das elektrische Feld konstant bleibt, die Partikel jedoch schwerer und damit träger werden. Ihre elektrische Mobilität nimmt also ab und damit auch die Rate, mit der die geladenen Partikel von den geladenen Fasern abgeschieden werden können. Die Modellierung bildet das Abscheideverhalten sowohl vor und nach der Entladung für das untersuchte F9-Medium (bei 8 cm/s Anströmgeschwindigkeit) sehr gut ab. Für das geladene Medium weicht die Abscheidung an der rechten Flanke geringfügig ab,

was jedoch möglicherweise auch auf Messungenauigkeiten zurückzuführen ist, da sich die letzten Datenpunkte wieder der modellierten Kurve nähern, bzw. sogar treffen.

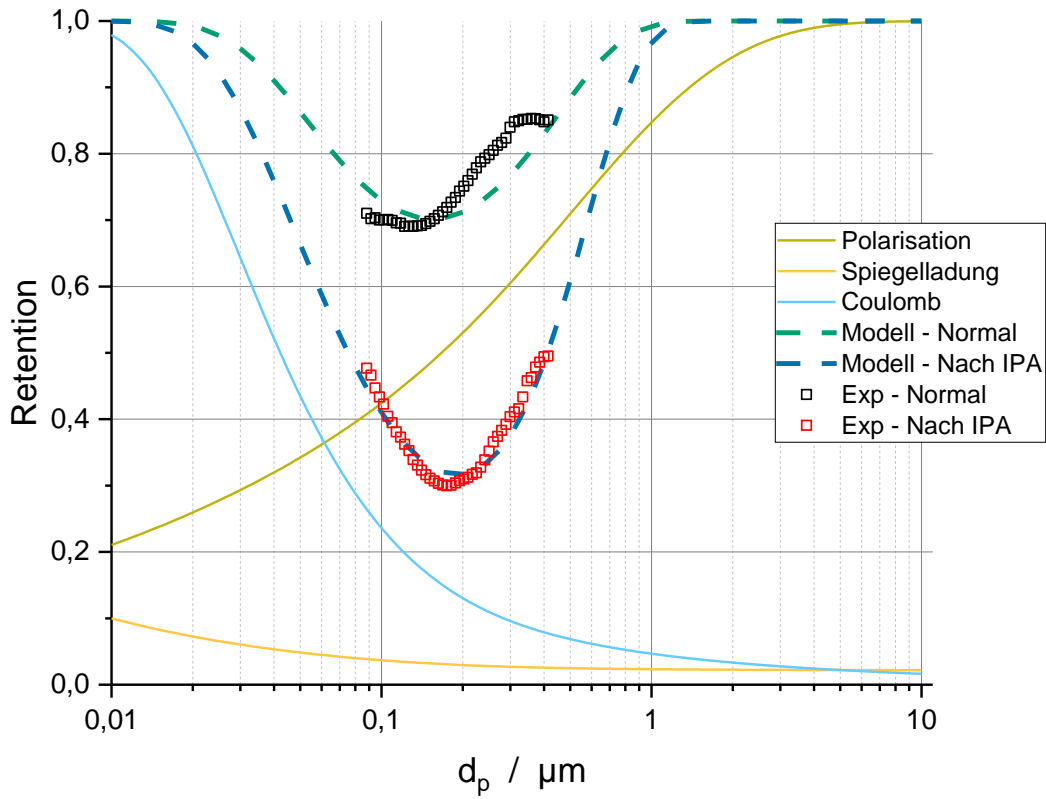


Abbildung 4.7-10: Modellierung der Abscheideeffizienz eines synthetischen Filtermediums vor und nach der IPA-Behandlung (Filterklasse: F9 bei $U_0 = 8 \text{ cm/s}$)

4.7.2 Modellierung unter Berücksichtigung polydisperser Faserverteilung (Nanofasern)

Um zu überprüfen, ob sich eine genauere Modellierung realisieren lässt, wenn eine polydisperse Fasergrößenverteilung statt eines einzelnen mittleren Faserdurchmessers zugrunde gelegt wird, wurde das bestehende Modell erweitert. Zudem sollen die unterschiedlichen Ergebnisse dargestellt werden, wenn zur Berechnung jeweils der zugehörige Anzahl-, Oberflächen- oder Massenanteil (x_N , x_O und x_m) verwendet wird. Die Anzahlanteile lassen sich z.B. aus REM-Aufnahmen durch einfaches Zählen der Fasern einer bestimmten Größenklasse und

$$x_N = \frac{N_{df}}{N_{ges}} \quad (60)$$

bestimmen. Dabei ist N_{df} die Anzahl der Fasern einer bestimmten Fasergrößenklasse d_f und N_{ges} die Gesamtanzahl der gezählten Fasern. Wenn eine solche Anzahlverteilung als Grundlage verwendet wird, muss zur Berechnung der Oberflächen- und Massenanteile die Annahme getroffen werden, dass die einzelnen Fasern die gleiche Länge L besitzen, womit sich ergibt:

$$x_O = \frac{O_{df}}{O_{ges}} = \frac{N_{df} \pi d_f L}{\sum_{i=1}^{N_{ges}} N_{d_{f,i}} \pi d_{f,i} L} = \frac{N_{df} d_f}{\sum_{i=1}^{N_{ges}} N_{d_{f,i}} d_{f,i}} \quad (61)$$

und

$$x_m = \frac{m_{df}}{m_{ges}} = \frac{N_{df} \pi d_f^2 L \rho_f}{\sum_{i=1}^{N_{ges}} N_{d_{f,i}} \pi d_{f,i}^2 L \rho_f} = \frac{N_{df} d_f^2}{\sum_{i=1}^{N_{ges}} N_{d_{f,i}} d_{f,i}^2} \quad (62)$$

Mit diesen Formeln können sowohl Anzahl-, Oberflächen- als auch Massenanteil berechnet werden und der Modellierung zugrunde gelegt werden.

Dies wurde mit Hilfe der Skriptsprache „Visual Basic for Applications“ (VBA) realisiert. Die Eingabemaske des Programms zeigt Abbildung 4.7-11. Es können sowohl REM-Auswertungen in eine Tabelle eingefügt werden, die dann automatisch in die gewählten Fasergrößenklassen einsortiert und die Anteile nach obigen Formeln berechnet werden als auch manuell Daten eingegeben werden. Außerdem besteht die Möglichkeit durch Eingabe eines Mittelwerts, einer Standardabweichung und der gewünschten Anzahl von Fasergrößenklassen automatisch eine Normalverteilung zu erzeugen, die dann zur Berechnung verwendet wird. So lässt sich beispielsweise anschaulich darstellen wie sich die Anzahl-, Oberflächen- und Massenverteilungen unterscheiden (vgl. Abbildung 4.7-12) und überprüfen, ob genauere Ergebnisse erhalten werden, wenn eine gewisse Streuung um einen Mittelwert anstelle eines konkreten Wertes angenommen wird. Dies lässt sich sowohl für mono- als auch bimodale Fasergrößenverteilungen durchführen.

Es wurde zudem eine automatische Überprüfung, ob die Bedingung $F > 10$ (s. Kapitel 4.7.1) erfüllt ist, implementiert. So wird die Diffusionsabscheidung für jede einzelne Fasergrößenklasse entweder mit Gleichung (16) (nicht erfüllt, $F < 10$) oder mit Gleichung (18) (erfüllt, $F \geq 10$) berechnet.

Fasergrößenklassen	
Eingabe der gewünschten Daten	
Anzahl der Fasergrößenklassen:	30
Kleinste Klasse:	0,100 μm
Größte Klasse:	5,000 μm
Fasergrößenklassen berechnen	

d _i [μm]	Anzahl	Anzahlanteil	Oberflächenanteil	Massenanteil
0,114	72	0,286	0,070	0,004
0,130	6	0,024	0,007	0,000
0,148	17	0,067	0,022	0,002
0,168	11	0,044	0,016	0,001
0,192	20	0,079	0,033	0,003
0,219	19	0,075	0,036	0,004
0,249	17	0,067	0,036	0,005
0,284	13	0,052	0,032	0,005
0,323	8	0,032	0,022	0,004
0,368	7	0,028	0,022	0,004
0,420	5	0,020	0,018	0,004
0,478	6	0,024	0,025	0,006
0,545	4	0,016	0,019	0,005
0,621	5	0,020	0,027	0,009
0,707	8	0,032	0,049	0,018
0,806	5	0,020	0,035	0,015
0,918	2	0,008	0,016	0,008
1,046	4	0,016	0,036	0,020
1,191	5	0,020	0,051	0,032
1,357	5	0,020	0,058	0,042
1,546	5	0,020	0,066	0,054
1,762	0	0,000	0,000	0,000
2,007	0	0,000	0,000	0,000
2,287	0	0,000	0,000	0,000
2,605	1	0,004	0,022	0,031
2,968	1	0,004	0,025	0,040
3,381	0	0,000	0,000	0,000
3,852	0	0,000	0,000	0,000
4,389	0	0,000	0,000	0,000
5,000	6	0,024	0,258	0,683

Filter- und Versuchsparameter	
Eingabe der Daten	
Druckverlust:	Δp 179,00 Pa
Anströmgeschwindigkeit:	U_c 3,00 cm/s
Filtermaterialdichte:	ρ_f 2500,00 kg/m ³
Flächengewicht:	w 116,010 g/m ²

Packungsdichten	
Berechnete Daten	
Davies [1952]:	0,1899 Anzahlverteilung
Ogorodnikov [1976]:	0,1032 Oberflächenverteilung
Drummond und Tahir [1984]:	0,0069 Anzahlverteilung
Jackson und James [1986]:	0,2562 Massenverteilung
Brown [1993]:	0,0121 Anzahlverteilung

Packungsdichten berechnen

Effizienzberechnung

Abbildung 4.7-11: Eingabemaske des entwickelten VBA-Tools

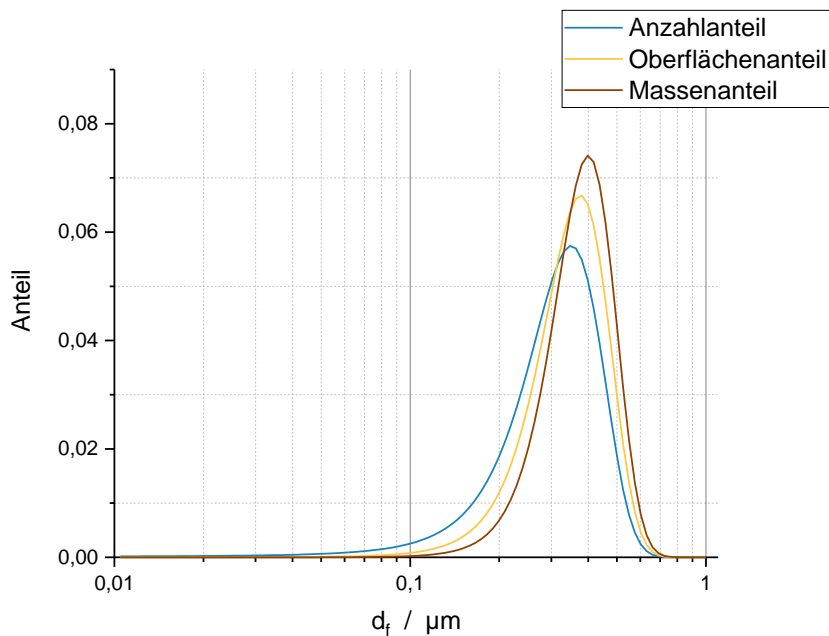


Abbildung 4.7-12: Anzahl-, Oberflächen- und Massenanteil für eine Fasergrößenverteilung mit $d_f = 350 \text{ nm} \pm 30 \%$

Um die Modellierung mit Hilfe einer erzeugten Normalverteilung zu veranschaulichen, wird noch einmal Medium S aus dem vorherigen Kapitel betrachtet. Der mittlere Faserdurchmesser liegt für dieses Medium bei 94 nm. Wird für die Normalverteilung eine Abweichung von 20 % angesetzt, ergeben sich die Anteilverteilungen in Abbildung 4.7-13. Werden diese nun als Grundlage zur Berechnung der Fraktionsabscheidegrade gewählt, ergeben sich die Abscheidegradkurven in Abbildung 4.7-14. Bei der Kalkulation wurde sich diesmal übersichtshalber auf die Formel nach Davies beschränkt, da sie auch zuvor bei diesem Medium die besten Resultate lieferte. Es ist zu erkennen, dass die Modellierung mit Hilfe der Anzahlverteilung die höchsten und die der Massenverteilung die niedrigsten Werte ergibt. Das resultiert daraus, dass besonders die kleineren Fasern einen höheren Beitrag zur Retention liefern; deren Gewicht jedoch einen sehr kleinen Massenanteil ausmachen (vgl. Abbildung 4.7-13), weshalb bei der Berechnung mit Hilfe des Massenanteils eher die größeren Fasern, deren Abscheideleistung geringer ist, ins Gewicht fallen.

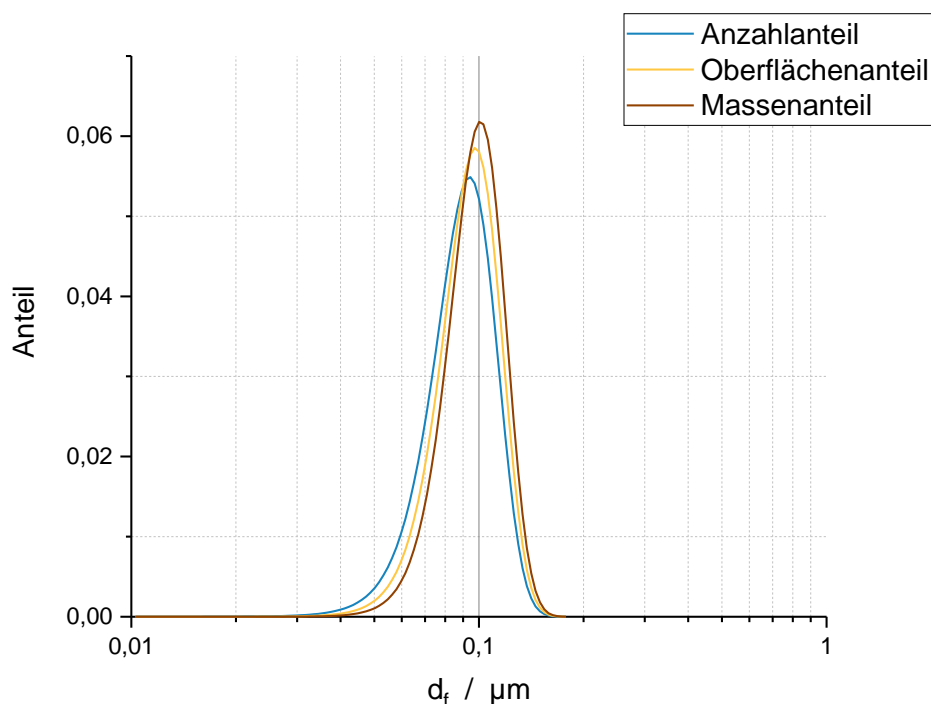


Abbildung 4.7-13: Berechnete Anteilverteilungen des Mediums S mit 94 nm \pm 20 %

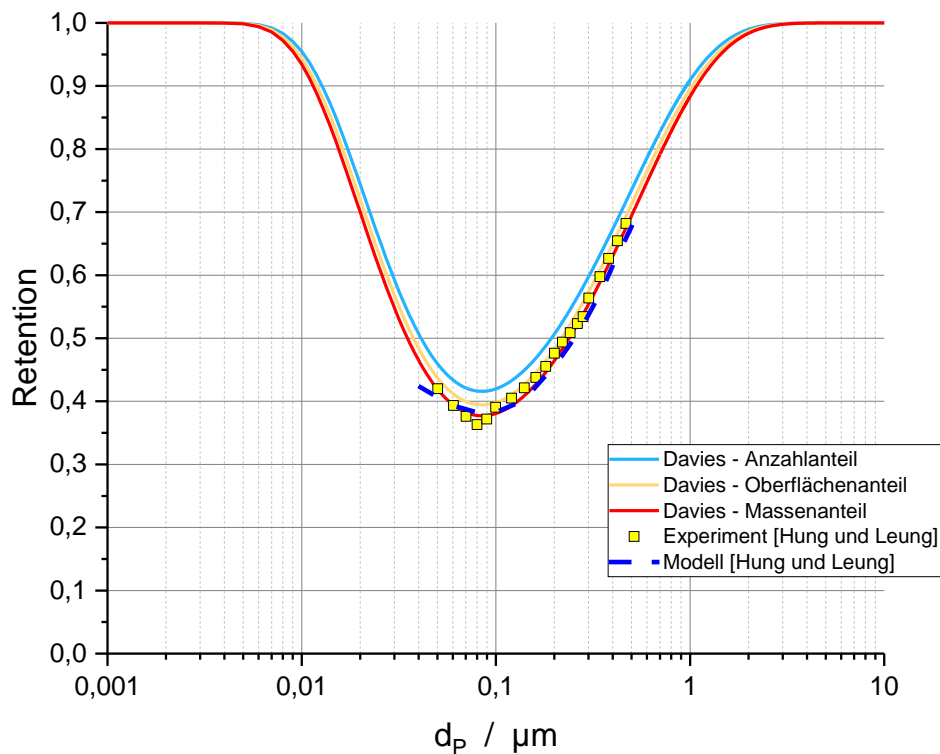


Abbildung 4.7-14: Vergleich der Abscheidegrade für die Berechnung mit Anzahl-, Oberflächen- und Massenanteil bei Annahme polydisperser Fasergrößenverteilung

Im nachfolgenden Abschnitt wird das Vorgehen bei Vorhandensein einer bimodalen Fasergrößenverteilung vorgeführt. Hier soll als Beispiel das Medium A aus Kapitel 4.2.1 dienen, welches aus einer Kombination von $\mu\text{-}$ großen Fasern und integrierten Nanofasern besteht. Die Fasergrößenverteilung, die aus den REM-Aufnahmen erhalten wurde, ist in Abbildung 4.2-1 und die zugehörigen Daten in Tabelle 4.2-1 dargestellt. Aus den Vorversuchen mit den Medien S, M4 und L konnten die Formeln nach Davies und Jackson und James als am vielversprechendsten extrahiert werden, weshalb zur besseren Übersicht hauptsächlich diese für die weiteren Untersuchungen verwendet werden sollen. Wird die Modellierung – wie bei den Medien mit monodisperser Fasergrößenverteilung – nun mit einem diskreten Faserdurchmesser durchgeführt, ergibt sich die Abscheidegradkurve in Abbildung 4.7-15. Hier wurde der Mittelwert, also ca. $4,5 \mu\text{m}$ zur Berechnung verwendet. Wie zu erkennen, ergeben Kalkulationen mit solchen Fasergrößenverteilungen keine zufriedenstellenden Ergebnisse: die Retention im MPPS (hier: ca. 250 nm , experimentell: ca. 150 nm) liegt für dieses Vorgehen bei ca. 65% (experimentell: über $99,8 \%$). Aus diesem Grund wurde die Funktion in das VBA-Tool eingebaut eine mehrmodale (in diesem Fall bimodale) Verteilung zu erzeugen, die dann als

Grundlage zur Modellierung verwendet werden kann. Dies ist in Abbildung 4.7-16 dargestellt. Aus den REM-Daten abgeschätzt oder durch Herstellerangaben angegeben, kann die Gewichtung der beiden Modi eingestellt werden. In diesem Fall wurde ein Anteil von 80 % „Stützfasern“ ($8,598 \mu\text{m} \pm 2,311 \mu\text{m}$) und 20 % Nanofasern ($416 \text{ nm} \pm 299 \text{ nm}$) gewählt.

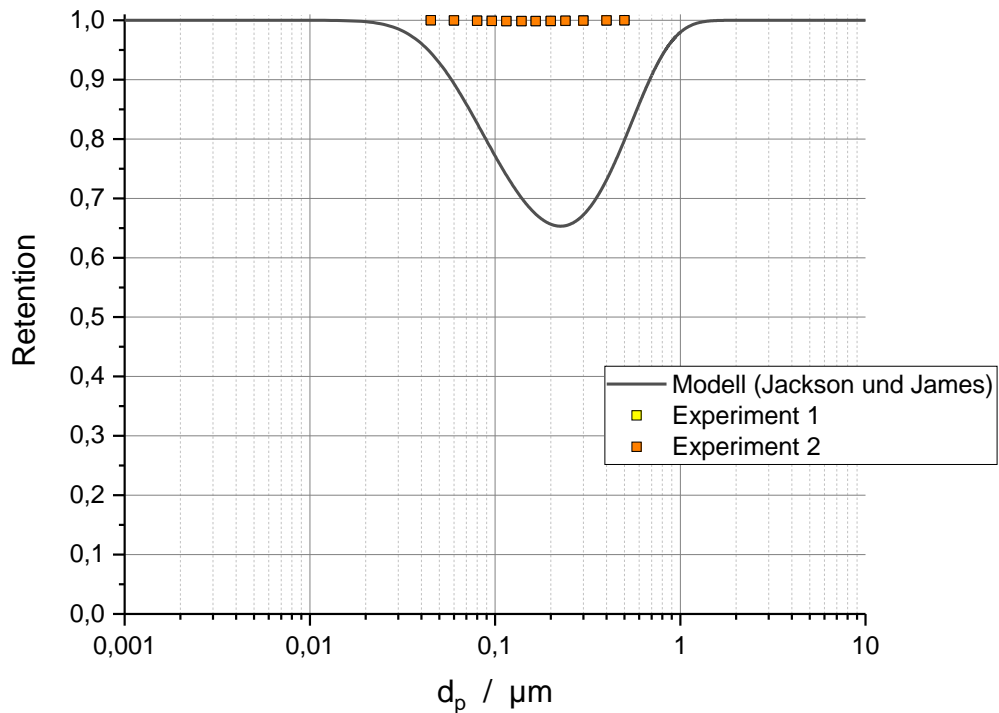


Abbildung 4.7-15: Modellierung der Abscheideeffizienz des Mediums A mit $d_f = 4,5 \mu\text{m}$

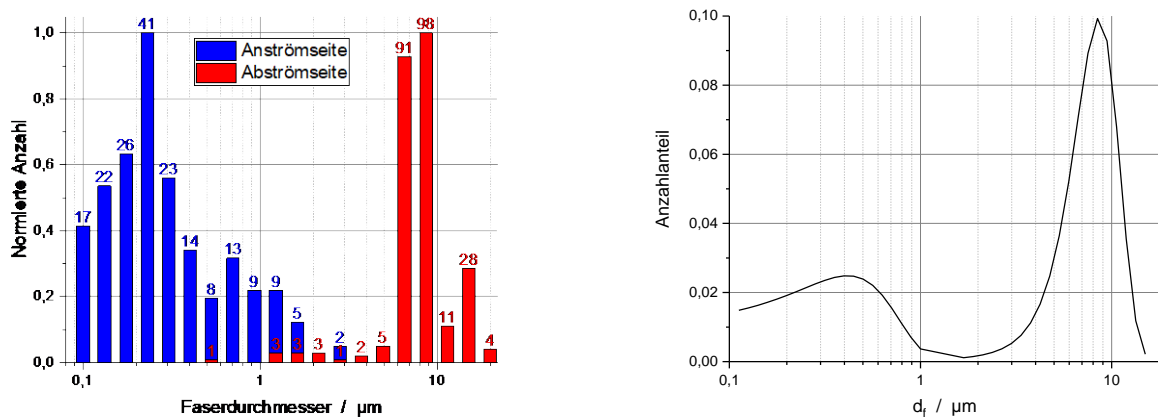


Abbildung 4.7-16: Bimodale Fasergrößenverteilung (Medium A) - REM-Auswertung und Modell

Mit dieser Vorgehensweise ergeben sich die in Abbildung 4.7-17 dargestellten Fraktionsabscheidegradkurven. Die experimentell ermittelten Ergebnisse liegen genau zwischen den beiden Kurven, die einmal mit der Formel nach Davies und einmal nach Jackson und James berechnet wurden. In beiden Fällen wird die Filterklasse (E12) des Mediums richtig ermittelt und das Minimum liegt beim selben Partikeldurchmesser wie aus den Messungen. So können also auch Filtermedien mit mehrmodaler Fasergrößenverteilung richtig und sinnvoll – im Vergleich zu einem diskreten Mittelwert – modelliert werden.

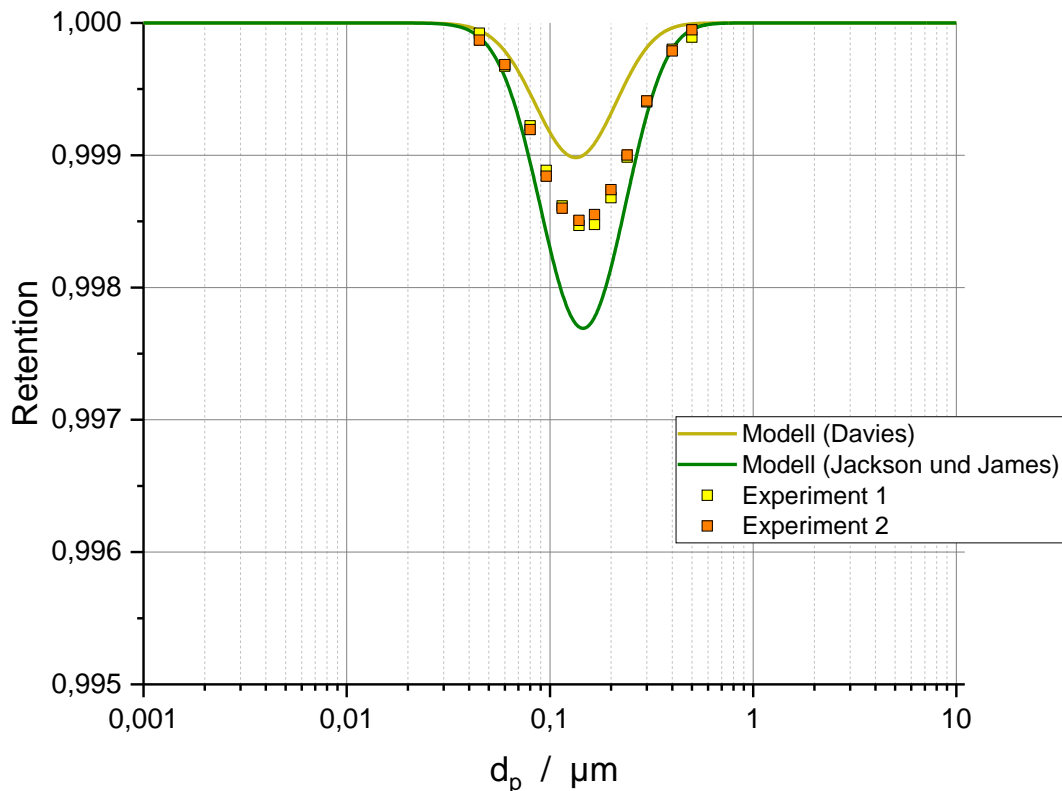


Abbildung 4.7-17: Modellierung mit Grundlage einer bimodalen Fasergrößenverteilung und Vergleich mit experimentellen Ergebnissen

5 Fazit

Im Rahmen des Projektes wurde ein vorhandener Filtermedienprüfstand für Medientests an Filtern der Klasse F7 - U15 so umgerüstet, dass auch die Abscheidung von Nanopartikeln untersucht werden konnte. Als Bereitstellungsquelle diente dazu ein Funkengenerator mit Kupfer- oder Silberelektroden. Der Filtertest wurde mit vorher klassierten monodispersen Partikeln durchgeführt, um eine Medienbeladung durch die Testpartikel zu verhindern. Mit dem umgerüsteten Prüfaufbau und der erarbeiteten Messstrategie konnten alle Medientests mit guter Wiederholbarkeit durchgeführt werden.

Analog wurde ein vorhandener Prüfstand, der Messungen der Effizienz von konfektionierten RLT Filtern gemäß EN779 erlaubt dahingehen um- und aufgerüstet, dass er ebenfalls Messungen mit Nanopartikeln ermöglicht. Hierzu kommt ein neuartiger Flammennanopartikelgenerator zum Einsatz, der quasi-monodisperse NaCl Nanopartikel mit sehr hoher Anzahlkonzentration bereitstellt. Es wurden für die unterschiedlichen Abscheidegrade der Filter drei verschiedene Messstrategien entwickelt, die es erlauben Filter der Klassen F7 bis U15 im Partikelgrößenbereich von (mindestens) 5 nm bis 100 nm zu testen. Während niedrigeffiziente Filter bis zu Klasse E10 die Vermessung die Vermessung der Anzahlgrößenverteilung vor und hinter dem Filter erlauben, ist dies für hocheffiziente Filter reingasseitig nicht möglich. Gleichzeitig lassen sich monodisperse Partikel nicht in ausreichenden Mengen bereitstellen, um die Filter bei Nennenvolumenströmen zwischen 1.700 m³/h und 4.250 m³/h zu testen. Eine der entwickelten Messstrategien für hocheffiziente Filter sieht vor, die mit dem Nanopartikelgenerator produzierten Prüfaerosole als quasi-monodispers zu betrachten. Da die Größenverteilungen überwiegend geometrische Standardabweichungen $\leq 1,4$ aufweisen, ist diese Annahme gerechtfertigt. Reingasseitig kann dann mit einem Partikelzähler die Anzahlkonzentration bestimmt und die resultierende Effizienz dem Mediandurchmesser der Verteilung zugeordnet werden. Die zweite Messstrategie sieht vor, die Filter mit polydispersen Aerosolen zu beaufschlagen, hieraus aber immer nur mithilfe eines DMA monomobile Fraktionen zu betrachten. Nach einer entsprechenden Mehrfachladungskorrektur lässt sich so der Fraktionsabscheidegrad bestimmen. Die zweite Methode für hocheffiziente Filter zeichnet sich durch eine hohe Spezifität der Partikelgrößen und hohe Präzision aus, während die erste Methode weniger aufwändig und zeitintensiv ist. Beide Methoden lieferten eine gute Übereinstimmung. Messungen an Filtern der Klassen F7 bis U15 zeigten bei Verwendung der jeweiligen Messstrategie hohe Plausibilität und gute Reproduzierbarkeit.

Zum Ergebnisabgleich der Medien- und Filterelemente wurden die Untersuchungen stets bei gleichen typspezifischen Filtrationsgeschwindigkeiten durchgeführt. Die untersuchten Filtermedien und die daraus hergestellten Filterkassetten stammten überwiegend aus derselben Produktionscharge. In den meisten Fällen zeigten sich zufriedenstellende oder sehr gute Übereinstimmungen der an Medien und Filterkassetten bestimmten Fraktionsabscheidegrade. Allerdings ergaben sich mitunter auch Unterschiede, die darauf heindeuten, dass nicht in allen Fällen vom Fraktionsabscheidegrad des Mediums auf den ganzen Filter geschlossen werden kann.

Die Fraktionsabscheidegrade von Elektretmedien im Neuzustand und nach elektrischer Neutralisierung mit Isopropanol stellen ein Maximum und ein Minimum der Effizienzen dar, die sich während des Realeinsatzes ergeben können. Dabei zeigte sich, dass sowohl im Bereich des größten Durchlasses (MPPS), ebenso wie für Nanopartikel, der Abscheidegrad durch die Isopropanolbehandlung deutlich abnahm. Des Weiteren konnte durch speziell erworbene Elektretmedien, die im geladenen und ungeladenen Zustand geliefert wurden, die vollständige Entladung durch die Behandlung mit Isopropanol nachgewiesen werden, da sich für ungeladene und entladene Medien ein nahezu identischer Fraktionsabscheidegrad nachweisen ließ.

Eine normkonforme Beladung mit dem Teststaub A2-Staub (Arizona Fine Dust) führte bei konventionellen Flachfiltern ohne Nanofasern zu einer Verbesserung des Abscheidegrades im Durchmesserbereich des MPPS. Vergleichbare Ergebnisse zeigten sich ebenfalls für entsprechend gealterte Filterkassetten. Mit zunehmender Beladung verbesserte sich ebenso der Abscheidegrad gegenüber Nanopartikeln, wobei sich mit weiteren Beladungsstufen die Erhöhung der Retention weniger stark ausgeprägt zeigte, während sich der Druckverlust annähernd quadratisch erhöhte.

Zusätzlich zu Tests an konventionellen Filtermedien wurden neuartige Filter mit Nanofasern untersucht. Dabei wurde zum einen unterschieden zwischen Filtermedien mit integrierten Feinstfasern und solchen, die einen progressiven Aufbau aus mehreren Schichten aufweisen. Zum anderen wurde untersucht, inwiefern die an- oder abströmseitige Anordnung der Nanofaserschicht die Filtrationseigenschaften beeinflusst.

Für die begleitende Modellierung wurden alle Mediensichten einzeln im REM untersucht und anhand einiger hundert Fasern eine Faserdurchmesserverteilung erstellt, die als Grundlage für die Modellierung dient. Dabei wurden zwei unterschiedliche Themenkomplexe untersucht. Der erste bezog sich auf die

unterschiedlichen elektrophoretischen Abscheidebeiträge, die auf den durchgeführten Messungen der Elektretfiltermedien basieren und durch Sensitivitätsanalysen untersucht wurden. Der zweite Aspekt betraf die Implementierung mehrmodaler Faserverteilungen zur Abbildung von Nanofasern und deren Filtrationscharakteristika. Die bei der Modellierung gewonnenen Erkenntnisse haben zu einem besseren Verständnis der relevanten Effekte beigetragen und halfen bei der Interpretation der Messergebnisse. Gegenüberstellung von Projektziel und erreichten Ergebnissen

Primäres Ziel des Projektes war es, Vorschläge für einen Prüfaufbau und die Messstrategie zur Prüfung von Filtermedien und Filterelementen gegenüber Nanopartikeln zu entwickeln. Dazu wurden vorhandene Prüfstände umgerüstet, Messstrategien entwickelt und Untersuchungen an Filtermedien und Filterkassetten im Neuzustand, nach Beladung mit einem Teststaub und bei synthetischen Elektretmedien zur Entladung durchgeführt. Des Weiteren wurden neuartige Medien mit Nanofasern eines Faserdurchmessers von $d_f \leq 500$ nm analysiert. Hierbei lagen die Nanofasern entweder anströmseitig, abströmseitig oder integriert vor.

Ziel der begleitenden modellierenden Untersuchungen war es darüber hinaus, ein verbessertes Verständnis für die einzelnen elektrophoretischen Abscheidebeiträge zu gewinnen. Dabei wurden die Medien im geladenen und, nach einer Behandlung mit Isopropanol, entladenen Zustand untersucht. Ferner wurde eine Erweiterung des Modells zur Implementierung mehrmodaler Faserdurchmesserverteilungen durchgeführt, um die Abscheidung an Nanofasern erfassen zu können.

Zur Erreichung des Projektziels wurden im Einzelnen bearbeitet:

- Retentionsuntersuchung an konventionellen Medien ohne Nanofasern
 - Effizienzbestimmung von Filtermedien der Feinstaub- bis Schwebstoffklasse mit unterschiedlichen Testaerosolen
 - Untersuchung beladener Filtermedien in definierten Beladungsstadien
 - Filtereffizienzmessung an geladenen und neutralisierten Elektretmedien
 - Untersuchung unterschiedlicher Testaerosolladungszustände und deren Auswirkung auf den Fraktionsabscheidegrad
- Retentionsuntersuchung an Medien mit Nanofasern
 - Untersuchung von Medien mit integrierten Nanofasern
 - Untersuchung von Medien mit Schicht aus Nanofasern
 - Untersuchung von Medien mit anströmseitigen Nanofasern
 - Untersuchung von Medien mit abströmseitigen Nanofasern
- Aufrüstung eines Filterprüfstandes gemäß EN779 für Filter der allgemeinen Raumlufttechnik

- Aufrüsten und Abdichten des Prüfstandes
- Erzeugen und Einbringen reproduzierbarer NaCl Aerosole mit Modaldurchmesser zwischen ca. 4 nm und 80 nm
- Entwicklung von Messstrategien für Filter mit unterschiedlichen Klassen (F7 bis U15)
 - Messung der polydispersen Größenverteilungen im Roh- und Reingas für niedrigeffiziente Filter (Klassen F7 bis E10)
 - Annahme quasi-monodisperser Verteilungen; Messung der Anzahlgrößenverteilung im Rohgas und der gesamten Anzahlkonzentration im Reingas; Anwendung insb. für hocheffiziente Filter (Klassen \geq E11)
 - Klassierung monomobiler Fraktionen aus dem polydispersen Prüfaerosol im Roh- und Reingas; Anwendung einer neu entwickelten Routine zur Mehrfachladungskorrektur; Anwendung insb. für hocheffiziente Filter (Klassen \geq E11)
- Retentionsuntersuchungen an niedrigeffizienten Filtern (F7 bis E10)
 - Bestimmung des Fraktionsabscheidegrades im Neuzustand
 - Zweistufige Beladung der Filter mit ASHRAE Staub
 - Bestimmung des Fraktionsabscheidegrades im gealterten Zustand
- Retentionsuntersuchungen an hocheffizienten Filtern (H13 bis U15)
 - Bestimmung des Fraktionsabscheidegrades im Neuzustand
 - Überprüfung der Messstrategien
- Abgleich der Fraktionsabscheidegrade an Medien und Filtern
- Modellierung
 - Begleitende Modellierung zur Abscheidung von Partikeln an nanoskaligen Fasern unter Berücksichtigung einer mehrmodalen Faserverteilung
 - Theoretische Untersuchungen unterschiedlicher elektrophoretischer Abscheidebeiträge zur Gesamtabseidung

Projektziel	Ergebnis
Entwicklung eines Prüfsystems und einer Messstrategie zur Effizienzmessung für Filter unterschiedlicher Reinheitsklassen gegenüber Nanopartikel ($d_p \geq 5$ nm).	<p><u>Filtermedien:</u></p> <p>Der vorhandene Filtermedienprüfstand wurde erfolgreich umgebaut und eine Nanopartikelquelle wurde implementiert.</p> <p>Mit der entwickelten Messstrategie können Filtertests mit guter Reproduzierbarkeit und geringem Fehler durchgeführt werden.</p> <p>Die Verwendung monodisperser Partikel hat sich insbesondere für Messungen an höherklassigen Medien</p>

	<p>(EPA bis ULPA) als sinnvoll dargestellt.</p> <p>Die Filterbeladung mit dem Teststaub A2 führte zu einer deutlichen Verbesserung der Abscheideleistung im MPPS sowie auch für Nanopartikel. Höhere Beladungsstufen gingen stets mit verbesserter Nanopartikelabscheidung einher.</p> <p>Der Fraktionsabscheidegrad nach elektrischer Neutralisierung von Elektretmedien mit Isopropanol konnte erneut nachgewiesen werden. Der Abscheidegrad für Nanopartikel verringerte sich durch die Entladung ebenso wie im Durchmesserbereich des MPPS.</p> <p><u>Konfektionierte Filter:</u></p> <p>Der vorhandene Prüfstand für RLT Filter gemäß EN779 wurde erfolgreich umgebaut und ein Nanopartikelgenerator für NaCl Nanopartikel implementiert.</p> <p>Mit den entwickelten Messstrategien können Filtertests mit guter Reproduzierbarkeit und geringem Fehler durchgeführt werden.</p> <p>Für niedrigeffiziente Filter (F7 bis E10) erwies sich die Möglichkeit der Messung der Anzahlgrößenverteilung vor und hinter dem Filter als praktikabel und zielführend. Für hocheffiziente Filter ($\geq E11$) wurden entsprechende Strategien entwickelt, die es ermöglichen, den Fraktionsabscheidegrad für (quasi-) monodisperse Partikel zu bestimmen. Die Strategien haben sich bis zur Filterklasse U15 als robust und zuverlässig erwiesen.</p> <p>Die Filterbeladung mit AHSRAE Teststaub führte auch bei den Filterkassetten zu einer deutlichen Verbesserung der Abscheideleistung im MPPS sowie auch für Nanopartikel. Höhere Beladungsstufen gingen stets mit verbesserter Nanopartikelabscheidung einher.</p>
<p>Die Modellierung soll zu einem tieferen Verständnis des Filtrationsverhaltens bei Nanofasermitteln führen. Ebenso soll der Abscheidebeitrag unterschiedlicher elektrophoretischer Mechanismen besser verstanden werden.</p>	<p>Zur Modellierung der Abscheidebeiträge an Faserdurchmessern im Nanometerbereich wurden die verschiedenen Ansätze aus der Literatur überprüft und ihr Einsatzbereich ermittelt. U.a. erfasst eine Korrektur mit Hilfe der Faser-Knudsenzahlschlupf analog zur Abscheidemodellierung von submikronen Partikeln.</p> <p>Zur genaueren Analyse der Nanofaser-Filter wurde dem Modell eine mehrmodale Faserverteilung zugrunde gelegt, um die Abscheidung von Medien mit beispielsweise bimodaler (Nanofaser- und Stüttschicht), polydispenser</p>

	<p>Fasergrößenverteilung berechnen zu können.</p> <p>Für die Erfassung unterschiedlicher elektrophoretischer Abscheidebeiträge ist der Ladungszustand des Testaerosols sowie der Filterfasern variiert worden.</p> <p>Durch experimentelle Testergebnisse konnte das erweiterte Abscheidemodell validiert werden.</p>
--	---

Das Ziel des Forschungsprojektes wurde erreicht.

6 Erzielter wirtschaftlicher und wissenschaftlich-technischer Nutzen

Im Bereich der Filtertechnik sind viele kleine und mittelgroße Unternehmen tätig. Daher ist der Einsatz von standardisierten Prüfverfahren unabdingbar, um eine hohe Produktqualität gegenüber den Anwendern dokumentieren und fortlaufend verbessern zu können. Die Problematik der noch nicht vorliegenden Standards zur Nanopartikelfiltration ist den Unternehmen bekannt, weswegen es aufgrund fehlender Daten teilweise schwer oder auch unmöglich ist, Garantien gegenüber Kunden abzugeben.

Die Projektergebnisse liefern den Filterherstellern erstmals eine Basis, ihre Filter im Hinblick auf die Abscheidung von Nanopartikeln weiterzuentwickeln bzw. zu optimieren. Dies fängt an bei der Auswahl der Filtermedien (Struktur des Filtervlieses, ggf. progressiver Aufbau, Elektret-Wirkung...) und geht hin bis zur Auslegung des konfektionierten Filters (benötigte Filterfläche, ggf. Abstand und Höhe der Falten...). Die Resultate haben im Hinblick auf Materialeinsatz und Fertigungskosten für den Filterhersteller eine direkte Auswirkung auf wirtschaftliche Aspekte. Ferner verschafft die wissenschaftlich fundierte Basis den Filterherstellern einen Wettbewerbsvorteil bei der Vermarktung ihrer Produkte.

Schließlich werden kommerziell arbeitende Prüflabore unter Berücksichtigung der hier vorgestellten Ergebnisse in die Lage versetzt, den Filter- bzw. Medienherstellern mit finanziell vertretbarem Aufwand Untersuchungsergebnisse zu liefern. Die Resultate dieses Projekts bringen einen branchenübergreifenden Nutzen für Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Filterherstellung von Material- und Filtermedienherstellern bis hin zu Filterkonfektionierern. Auch Firmen aus dem Bereich der Anwendungstechnik und der Prüftechnik profitieren von den Ergebnissen, denn sie können nun erstmals Aussagen über die Reinheit z. B. ihrer Produktionsstätten im Hinblick auf Nanopartikel machen.

Das Prüfprozedere und daraus gewonnene Erkenntnisse werden in Normen, Standards und Qualitätsanforderungen für die Filter einfließen. Kontakt zur CEN TC 195 „Air Filters for General Air Cleaning“ wurde bereits aufgenommen, um zukünftig die im Rahmen des Mandats M/461 erarbeiteten, aber noch nicht veröffentlichten Normen zu Medientests zu ergänzen. Der Charakter der Vorwettbewerblichkeit der Arbeiten in diesem Projekt ist somit erfüllt.

7 Darstellung der Verwendung der Zuwendung unter besonderer Berücksichtigung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Forschungsstelle 1 (IUTA)

IUTA wurden insgesamt 18 Personenmonate (PM) HPA A, 12 PM HPA B und 6 Monate HPA C bewilligt und verausgabt. Die Erarbeitung der Messmethoden, sowie die Auswertung der damit erhobenen Daten erforderte eine wissenschaftliche Ausbildung und wurde somit von MitarbeiterInnen der Gruppe HPA A durchgeführt. Die Komplexität der reinen Durchführung der Messungen war etwas geringer und konnte somit durch MitarbeiterInnen der Gruppe HPA B erfolgen. Zum Aufbau und Einrichten des Prüfstandes wurden MitarbeiterInnen der Gruppe HPA C eingesetzt.

- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)

Im IUTA wurde zur Durchführung des Projektes ein Nanopartikelgenerator benötigt, der in der Lage ist, Partikel mit Größen bis hinunter zu 5 nm bei sehr hohen Anzahlkonzentrationen zu erzeugen. Hierzu wurde ein Nanopartikelgenerator, Modell FG2 der Fa. MoTec Konzepte beschafft und intensiv genutzt.

- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

entfällt

Forschungsstelle 2 (Universität Duisburg-Essen)

Die Arbeiten an der Forschungsstelle 2 wurden bedingt durch das Ausscheiden eines Mitarbeiters und die interne Umsetzung eines weiteren Mitarbeiters von insgesamt 3 Mitarbeitern mit wiss. Hochschulstudium und einem Mitarbeiter mit Bachelorabschluss bearbeitet, dabei wurden in der Abrechnung 18 HPA A und 19,2 HPA B wie genehmigt abgerechnet.

- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)

entfällt

- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

entfällt

Die durchgeführten Arbeiten und der Personaleinsatz waren zur Erreichung des Projektzieles notwendig. Die Mitarbeiter an den beiden Forschungsstellen waren mit den Planungen, den Durchführung und den Auswertungen der Messungen sowie den modelltechnischen Untersuchungen befasst.

Forschungsstelle	Ansätze	bewilligte PM	geleistete PM	Differenz PM
IUTA	HPA A	18	21,89	+3,89
	HPA B	12	8,3	-3,7
UDE	HPA A	18	18	-
	HPA B	19,2	19,825	+0,625

Der Einsatz des Personals war bei der inhaltlichen Komplexität und dem zeitlichen Aufwand angemessen.

8 Fortgeschriebener, aktualisierter Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Informationen zu den Inhalten und Ergebnissen des Projektes werden seitens der AiF-Mitgliedsvereinigung und der Forschungsstellen auch nach Vorhabenabschluss über folgende Maßnahmen und Wege transferiert, um eine breitenwirksame Nutzung der Ergebnisse in der Wirtschaft sicherzustellen.

- Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme im Berichtszeitraum	Rahmen	Datum/Zeit
Einstellung von Projektinformationen in die öffentlich zugängliche IUTA Webseite, Bereich Industrielle Gemeinschaftsforschung, Internet-Projektdatenbank	Projektdatenbank (www.iuta.de/index.php?article_id=555&clang=0)	erfolgt
Erstellung von Zwischenberichten und Weitergabe dieser Berichte an interessierte Branchenfachverbände und alle interessierten Unternehmen	Vorstellung der Ergebnisse	ab März 2014 zugänglich
Regelmäßige Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses und kontinuierliche Berichterstattung	Vorstellung der ersten erzielten Ergebnisse und	am 05.11.2015, 28.06.2016,

gegenüber den hierin vertretenen Unternehmen und Verbänden (PA)	Diskussion des weiteren Vorgehens	03.11.2016, 17.06.2017 durchgeführt
Information und Beratung interessierter Unternehmen (außerhalb des PA) durch die Forschungsstellen	Bilaterale Gespräche mit Mitarbeitern der Forschungsstellen	kontinuierlich
Vorstellung der Ergebnisse auf verschiedenen Veranstaltungen 2016	Processnet Jahrestagung Gasreinigung, Duisburg STFI Symposium „Textile Filter“, Chemnitz (Vortrag) European Aerosol Conference, Tours, Frankreich (Vortrag) ProcessNet, Aachen (Poster) Filtech Köln (Plenarvortrag) Filtech Köln (Vortrag) 8. IUTA Filtrationstag, Duisburg European Aerosol Conference, Zürich (Vortrag) TSI Filtration Workshop, Aachen (Vortrag)	18.02.2016 09.03.2016 04.-09.09.2016 13.-15.09.2016 11.-13.10.2016 11.-13.10.2016 3. November 2016 27. August - 1. September 2017 28. September 2017
Publikation von Projektergebnissen	Veröffentlichung in <i>Aerosol & Air Quality Research</i> ; Asbach et al., <i>Aerosol Air Qual. Res.</i> 17: 1132-1141	2017 erschienen
Tätigkeitsbericht des IUTA		für 2015 und 2016 erfolgt
Die Vermittlung der Ergebnisse in akademischen Lehrveranstaltungen	Vorlesungen an der Uni Duisburg-Essen: „Aerosol-Prozesstechnik“ Prof. Dr.-Ing. Schmidt „Air pollution control“ Dr.-Ing.	Ab SS 2015 Ab WS 2014/2015 Ab SS 2015

	Haep "Umweltmesstechnik" Dr.-Ing. Asbach	
Normen- und Richtlinienarbeit	CEN, DIN, VDI und NAM	fortlaufend durch die Projektleiter der FS 1 und FS 2

- Noch geplante Transfermaßnahmen

Maßnahme	Rahmen	Datum/Zeit
Information und Beratung interessierter Unternehmen (außerhalb des PA) durch die Forschungsstellen	Bilaterale Gespräche mit Mitarbeitern der Forschungsstellen	wird kontinuierlich vorangetrieben
Publikationen in Fachzeitschriften	Publikation in Separation and Purification Technology	In Vorbereitung; Einreichung noch 2017
Tätigkeitsbericht des IUTA		2017
Die Vermittlung der Ergebnisse in akademischen Lehrveranstaltungen	Vorlesungen an der Uni Duisburg-Essen: „Aerosol Prozesstechnik“ Prof. Dr.-Ing. Schmidt „Umweltmesstechnik“ Dr.-Ing. Asbach	SS 2017 SS2017
Normen- und Richtlinienarbeit	CEN, DIN, VDI und NAM	fortlaufend durch die Projektleiter der FS 1 und FS 2

9 Literaturverzeichnis

- [1] DIN-EN779:2012, *Partikel-Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik - Bestimmung der Filterleistung*, Beuth Verlag, 2012.
- [2] DIN-EN1822:2011, *Schwebstofffilter (EPA, HEPA und ULPA)*, Beuth Verlag, 2011.
- [3] A. Ibal-Mulli, H. Wichmann, W. Kreyling und A. Peters, „Epidemiological evidence on health effects of ultrafine particles,“ *Journal of Aerosol Medicine*, Bd. 15, pp. 189-201, 2002.
- [4] J. Sunyer, „The neurological effects of air pollution in children,“ *European Respiratory Journal*, Bd. 32, p. 535–537, 2008.
- [5] ICRP, „International Commission for Radiological Protection publication 66: Human respiratory tract model for radiological protection,“ *Annals of ICRP*, Nr. 24, pp. 1-3, 1994.
- [6] ASML, „EUV production insertion: Factors to watch,“ 14 April 2016. [Online]. Available: <https://www.asml.com/euv-is-at-the-cusp-of-being-introduced-in-volume-chip-production-the-industrialization-metrics-of-euv-most-importantly-productivity-and-availability-will-drive-the-decision-/en/s41905?rid=41906>. [Zugriff am 22.09.2017].
- [7] B. Wehner, W. Birmilli, T. Gnauk und A. Wiedensohler, „Particle number size distributions in a street canyon and their transformation into the urban-air background: measurements and a simple model study,“ *Atmospheric Environment*, Bd. 35, pp. 2215-22, 2002.
- [8] R. Brown, *Air Filtration - An integrated approach to the theory and applications of fibrous filters*, Exeter: Pergamon Press, 1993.
- [9] W. Hinds, *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, New York: Wiley, 1999.
- [10] K. W. Lee und R. Mukund, „Filtration Collection, in,“ in *s Aerosol Measurement – Principles, Techniques and Applications, 2nd Ed.*, John Wiley and Sons, 2001.
- [11] C.-S. Wang und Y. Otani, „Removal of Nanoparticles from Gas Streams by Fibrous Filters: A Review,“ *Ind. Eng. Chem. Res.*, Bd. 52, p. 5–17, 2013.
- [12] J. Wang, „Effects of particle size and morphology on filtration of airborne nanoparticles,“ *KONA*, Bd. 30, pp. 256-266, 2013.
- [13] M. Cagna, *Numerische Modellierung des zeitlichen Verhaltens von Strömungen in der Umgebung von Tiefenfiltern*, Karlsruhe: Dissertation Fakultät für Maschinenbau Universität Karlsruhe (TH), 2003.

- [14] A. Peters, I. F. Goldstein, U. Beyer, K. Franke, J. Heinrich, D. W. Dockery, J. D. Spengler und H. E. Wichman, „Acute health effects of exposure to high levels of air pollutants in eastern Europe,“ *American Journal of Epidemiology*, Bd. 144, pp. 570-581, 1996.
- [15] D. W. Dockery, J. Schwartz und J. D. Spengler, „Air pollution and daily mortality: Associations with particulates and acid aerosols,“ *Environmental Research*, Bd. 59, pp. 362-373, 1992.
- [16] D. W. Dockery und C. A. Pope, „Acute respiratory effects of particulate air pollution,“ *Annual Review of Public Health*, Bd. 15, pp. 107-132, 1994.
- [17] K. Driscoll, „Role of inflammation in the development of rat lung tumor in response to chronic particle exposure,“ *Inhalation Toxicology*, Nr. 8 [Suppl.], pp. 139-153, 1996.
- [18] K. Donaldson, X. Y. Li und W. Macnee, „Ultrafine (nanometre) particle mediated lung injury,“ *Journal of Aerosol Science*, Bd. 29, pp. 553-560, 1998.
- [19] G. Oberdörster, „Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles,“ *International Archives of Occupational and Environmental Health*, Bd. 74, pp. 1-8, 2000.
- [20] G. Oberdörster, „Toxicology of ultrafine particles: in vivo studies,“ *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Bd. 358, pp. 2719-2740, 2000.
- [21] B. Mouret, D. Thomas, S. Chazelet und J.-C. B. D. Appert-Collin, „Penetration of nanoparticles through fibrous filters perforated with defined pinholes,“ *Journal of Aerosol Science*, Bd. 40, pp. 762-775, 2009.
- [22] T. Schuldt, Wiederinbetriebnahme eines Filtermedienprüfstandes nach DIN EN 1822 und Überprüfen der Messgenauigkeit insbesondere im Hinblick auf die Abscheidung ultrafeiner Partikel (Bachelorarbeit), Duisburg: Universität Duisburg-Essen, 2015.
- [23] F. Schmidt und S. Haep, „Experimentelle Untersuchung der Effizienz von RLT-Filtern als Grundlage für praxisorientierte Prüfmethode sowie für die Weiterentwicklung der Filter durch Modellierung des Filtrationsverhaltens (IGF-Vorhaben 17659 N),“ http://www.veu.de/index.php?article_id=28&clang=0&show=detail&id=479, 2016.
- [24] C. Monsé, C. Monz, D. Dahmann, C. Asbach, B. Stahlmecke, N. Lichtenstein, K.-E. Buchwald, R. Merget, J. Bünger und T. Brüning, „Development and Evaluation of a Nanoparticle Generator for Human Inhalation Studies with Airborne Zinc Oxide,“ *Aerosol Science & Technology*, Nr. 48, pp. 418-426, 2014.
- [25] J. M. Mäkelä, J. Haapanen, J. Harra, P. Juuti und S. Kujanpää, „Liquid flame spray - A hydrogen-oxygen flame based method for nanoparticle synthesis and

- functional materials," *KONA Powder and Particle Journal*, Bd. 34, pp. 141-154, 2017.
- [26] C. Monsé, C. Monz, D. Dahmann, C. Asbach, B. Stahlmecke, N. Lichtenstein, K.-E. Buchwald, R. Merget, J. Bünger und T. Brüning, „Vorbereitung zur Untersuchung gesundheitlicher Effekte von Zinkoxidpartikeln," *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft*, Nr. 73, pp. 144-148, 2013.
- [27] D. Chen, D. Pui, D. Hummes, H. Fissan, F. Quant und G. Sem, „Design and calibration of a nanometer aerosol differential mobility analyzer (Nano-DMA)," *Journal of Aerosol Science*, Bd. 29, pp. 497-509, 1998.
- [28] M. Maricq, „On the electrical charge of motor vehicle exhaust particles," *Journal of Aerosol Science*, Bd. 37, pp. 858-874, 2006.
- [29] W. Hoppel, „Determination of the aerosol size distribution from the mobility distribution of the charged fraction of aerosols," *Journal of Aerosol Science*, Bd. 9, pp. 41-54, 1978.
- [30] P. Sachinidou, Y. Bahk, M. Tang, N. Zhang, S. Chen, D. Pui, B. Lima, G. Bosco, P. Tronville, T. Mosimann, M. Eriksson und J. Wang, „Inter-laboratory validation of the method to determine the filtration efficiency for airborne particles in the 3-500 nm range and results sensitivity analysis," *Aerosol and Air Quality Research*, p. doi: 10.4209/aaqr.2017.03.0104, 2017.
- [31] E. Hontañón und F. Kruis, „A differential mobility analyzer (DMA) for size selection of nanoparticles at high flow rates," *Aerosol Science & Technology*, Bd. 43, pp. 25-37, 2009.
- [32] E. Hontañón, M. Rouenhoff, A. Azabal, E. Ramiro und F. Kruis, „Assessment of a Cylindrical and a Rectangular Plate Differential Mobility Analyzer for Size Fractionation of Nanoparticles at High-Aerosol Flow Rates," *Aerosol Science & Technology*, Bd. 48, pp. 333-339, 2014.
- [33] A. Wiedensohler, „An approximation of the bipolar charge distribution for particles in the submicron size range," *Journal of Aerosol Science*, Nr. 19, pp. 387-389, 1988.
- [34] N. A. Fuchs, „On the stationary charge distribution on aerosol particles in a bipolar ionic atmosphere," *Pure and Applied Geophysics*, Bd. 56, pp. 185-193, 1963.
- [35] C. Asbach, A. Schmitz, F. Schmidt, C. Monz und A. Todea, „Intercomparison of a personal CPC and different conventional CPCs," *Aerosol and Air Quality Research*, Bd. 17, pp. 1132-1141, 2017.
- [36] VDI, *VDI 3491 - Part 1: Measurement of particles - Methods for generating test*

aerosols, principles and overview, Berlin: Beuth Verlag, 2016.

- [37] P. Gormley und M. Kennedy, „Diffusion from a stream flowing through a cylindrical tube,“ *Proceedings of the Royal Irish Academy*, Nr. 52A, pp. 163-169, 1949.
- [38] J. Pich, "Pressure drop of fibrous filters at small knudsen numbers," *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 9, no. 1, pp. 23-27, January 1966.
- [39] B. Y. H. Liu and K. L. Rubow, "Efficiency, Pressure Drop and Figure of Merit of High Efficiency Fibrous and Membrane Filter Media," in *5th World Filtration Congress*, Nice, 1990.
- [40] K. W. Lee and B. Y. H. Liu, "Theoretical Study of Aerosol Filtration by Fibrous Filters," *Aerosol Science and Technology*, vol. 1, no. C, pp. 147-161, 1982.
- [41] S. Kuwabara, "The Forces experienced by Randomly Distributed Parallel Circular Cylinders or Spheres in a Viscous Flow at Small Reynolds Numbers," *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 14, no. 4, pp. 527-532, 1959.
- [42] C.-H. Hung and W.-F. Leung, "Filtration of nano-aerosol using nanofiber filter under low Peclet number and transitional flow regime," *Separation and Purification Technology*, vol. 79, no. 1, pp. 34-42, 19 May 2011.
- [43] H. D. Landahl and R. G. Herrmann, "Sampling of liquid aerosols by wires, cylinders, and slides, and the efficiency of impaction of the droplets," *Journal of Colloid Science*, vol. 4, no. 2, pp. 103-136, April 1949.
- [44] C. N. Davies, "The Separation of Airborne Dust and Particles," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 1B, pp. 185-198, 1952.
- [45] R. M. Werner and L. A. Clarenburg, "Aerosol Filters. Pressure Drop across Single-Component Glass Fiber Filters," *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, vol. 4, pp. 288-293, July 1965.
- [46] S. Payet, D. Boulard, G. Madelaine und A. Renoux, „Penetration and pressure drop of HEPA filter during loading with submicron liquid particles,“ *Journal of Aerosol Science*, Bd. 23, pp. 723-735, 1992.
- [47] G. Jackson und D. James, „The permeability of fibrous porous media,“ *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Bd. 64, pp. 364-374, 1986.
- [48] B. Odgornikov, „Pressure drop across FP fiber filters under gas slip flow and in transition regime,“ *Colloid Journal of teh USSR*, Bd. 38, pp. 168-172, 1976.
- [49] J. Drummond und M. Tahir, „Laminar viscous flow through regular arrays of parallel solid cylinders,“ *International Journal of Multiphase Flow*, Bd. 10, pp. 515-540, 1984.
- [50] X. Zhao, S. Wang, X. Yin, J. Yu and B. Ding, "Slip-Effect Functional Air Filter for

Efficient Purification of PM 2.5," *Scientific Reports*, vol. 6, 17 October 2016.

- [51] R. Givhchi and Z. Tan, "An overview of airborne nanoparticle filtration and thermal rebound theory," *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 14, no. 1, pp. 45-63, February 2014.