

Schlussbericht

der Forschungsstellen

- 1 Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.,
Bliersheimer Straße 60
47229 Duisburg
- 2 Universität Duisburg-Essen, Institut für Verbrennung und Gasdynamik
Lehrstuhl Nanopartikel-Prozesstechnik,
Lotharstraße 1
47048 Duisburg

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **16076 N**

Praxisnahe Untersuchung der Filtereffizienz von Luftfiltern unter besonderer Berücksichtigung der elektrophoretischen Abscheidung

(Bewilligungszeitraum: 01.05.2009 - 30.09.2011)

der AiF-Forschungsvereinigung
Umwelttechnik

Duisburg,

Ort, Datum

Dr.-Ing. Stefan Haep

Name und Unterschrift des Projektleiters an der
Forschungsstelle 1

Duisburg,

Ort, Datum

PD Dr.-Ing. Frank Schmidt

Name und Unterschrift des Projektleiters an der
Forschungsstelle 2

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Forschungsthema	3
2	Zusammenfassung.....	3
3	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	3
4	Filterprüfungen an Kfz-Innenraum- und RLT-Filtern nach bestehenden Normen.	7
5	Ausgangssituation.....	12
6	Forschungsziel / Lösungsweg / Ergebnisse	15
6.1	Elektrischer Abscheider / Theoretische Auslegung, Konstruktion und Funktionstests.....	15
6.1.1	Theoretische Auslegung.....	15
6.1.2	Konstruktion	20
6.1.3	Funktionstests	21
6.1.4	Untersuchungen zur Standzeit	26
6.1.5	Nutzung an unterschiedlichen Filterprüfständen	29
6.1.6	Zwischenfazit.....	29
6.2	Effizienzmessungen mit A2, NaCl, DEHS	30
6.2.1	Messungen am unbehandelten Elektretmedium	31
6.2.2	Messungen am isopropanolbehandelten Elektretmedium	32
6.2.3	Zwischenfazit.....	33
6.3	Untersuchungen an klimabehandelten und beladenen Filtern	35
6.3.1	Klimabehandelte Filter.....	36
6.3.2	Außenluft- und dieselrußbeladene Filter.....	40
6.3.2.1	Kfz-Innenraumfilter.....	40
6.3.2.2	RLT-Filter	44
6.3.3	Zwischenfazit.....	49
7	Gesamtfazit.....	49
8	Gegenüberstellung von Projektziel und erreichten Ergebnissen.....	51
9	Erzielter wirtschaftlicher und wissenschaftlich-technischer Nutzen.....	52
10	Darstellung der Verwendung der Zuwendung unter besonderer Berücksichtigung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	54
11	Fortgeschriebener, aktualisierter Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft ..	54
12	Literatur.....	55

1 Forschungsthema

Praxisnahe Untersuchung der Filtereffizienz von Luftfiltern unter besonderer Berücksichtigung der elektrophoretischen Abscheidung

2 Zusammenfassung

Ziel des Projektes war die Entwicklung eines Verfahrens, welches es ermöglicht, die Filtereffizienz von Luftfiltern unbeeinflusst von der durch die Partikelgenerierung verursachten Ladungsverteilung zu bestimmen. Hierzu wurde ein Elektroabscheider ausgelegt, konstruiert und erprobt, welcher hinter der Aerosolbereitstellung vor der Zudosierung in den Prüfkanal eingesetzt werden kann. Mit dem vorliegenden Funktionsmuster ist es möglich, den unbekanntem Ladungszustand nach der Aerosolbereitstellung in einen definierten Ladungszustand zu überführen.

Um eine belastbare Prüfprozedur zu entwickeln, erfolgte eine systematische Untersuchung für unterschiedliche Partikelmaterialien und Anwendungsfälle. Des Weiteren wurden unterschiedliche Verfahren zur künstlichen Filteralterung im Sinne der Neutralisierung der Filtermedien gezielt analysiert. Es wurden Filter verwendet, die standardmäßig nach den entsprechenden Normen geprüft wurden, wie Kraftfahrzeuginnenraumfilter (DIN 71460-1, ISO/TS 11155-1) und Filter für raumluftechnische Anlagen (DIN EN 779). Der Elektroabscheider kann modular in der Anlagenperipherie der Filterprüfstände für Filter aus verschiedenen Anwendungsbereichen eingesetzt werden.

Resultat des Projektes ist ein wirtschaftliches und praxisgerechtes Verfahren zur Ermittlung der Filtereffizienz, welches sowohl unabhängig vom Dispergierungsverfahren und damit dem erzeugten Ladungszustand des Prüfaerosols als auch universell an verschiedenen Filterprüfständen einsetzbar ist.

Die Ergebnisse des Projektes fließen durch die Mitarbeit des Projektleiters der FS 2 in die folgenden Norm- bzw. Richtlinienausschüsse ein: in den Arbeitskreis Kfz-Luftfilter des Normenausschusses Automobiltechnik (bisher FAKRA) einer Institution des Verbandes der Automobilindustrie (VDA) und des DIN, in das Gremium Luftfilter des Normenausschusses Maschinenbau (NAM) des VDMA / DIN und in den Richtlinienausschuss VDI 6032 Blatt 2 „Raumluftechnik, Raumlufqualität – Lufthygiene in Fahrzeugen zur Personenbeförderung“.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

3 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Die Effizienz von Tiefenfiltern zur Luftfiltration wird neben den bekannten Abscheidemechanismen wie Diffusion, Interzeption, Impaktion und Sedimentation im Falle

von Synthetikfaservliesen mit einer Elektretwirkung maßgeblich durch elektrophoretische Effekte bestimmt.

Prüfaerosole für die Filterprüfung werden durch Dispergieren von Pulvern oder Zerstäuben von Flüssigkeiten bereitgestellt. Es wird im Allgemeinen ein Aerosol mit definierter Partikelgrößenverteilung, aber unbekanntem Ladungsverteilungszustand erzeugt. Das Ladungsniveau hängt dabei vom verwendeten Partikelmaterial, der Methode der Bereitstellung, den spezifischen Gegebenheiten des eingesetzten Aerosolgenerators und den gewählten Betriebsparametern ab. Demzufolge werden mit den unterschiedlichen generierungsbedingten, undefinierten Ladungszuständen der Prüfaerosole Fraktionsabscheidegrade gemessen, bei denen der elektrophoretische Abscheidebeitrag unterschiedlich stark ausgeprägt ist.

Im Rahmen der Normierung von Filterprüfungen sollten hinreichend definierte Bedingungen vorgegeben werden, die eine Vergleichbarkeit ermöglichen. Denn nur so ist es möglich, eine hohe Produktqualität aufrecht zu erhalten, die Produktqualität fortlaufend zu verbessern und insbesondere die Produktqualität gegenüber den Anwendern zu dokumentieren. Prüfergebnisse sind jedoch nicht immer direkt vergleichbar, wenn diese z. B. an unterschiedlichen Prüfständen mit unterschiedlichen Geräten ermittelt wurden. Um Herstellern, Prüflaboren und Anwendern von Produkten eine wirtschaftliche, verlässliche und vergleichbare Aussage zur Produktqualität zu liefern, besteht z. T. erheblicher Normungsbedarf bzgl. der aktuellen Prüfverfahren.

In diesem Projekt wurden Fragestellungen zum elektrophoretischen Abscheidebeitrag von Kfz-Innenraumfiltern und Filtern aus dem Bereich der allgemeinen Raumlufttechnik (RLT-Filter) untersucht. Kfz-Innenraumfilter werden bzgl. der Partikelfiltration gemäß der nationalen Norm DIN 71460-1 [1] geprüft. Der korrespondierende internationale Standard ist die ISO/TS 11155-1 [4]. RLT-Filter werden nach der Norm DIN EN 779 [2] getestet.

Bzgl. der Kfz-Innenraumfilter schreibt die ISO/TS 11155-1 für die Effizienzmessung eine Neutralisierung des Prüfaerosols mittels Luftionen beider Polarität in hoher Konzentration vor. Die DIN 71460-1 hingegen verweist darauf, dass noch kein praktikables und international anerkanntes Verfahren zur Neutralisierung der verwendeten Prüfaerosole etabliert werden konnte, und verzichtet daher bewusst auf die Forderung nach einer Neutralisierung. Als Prüfaerosole bei der Effizienzermittlung bzw. als Beladungs-aerosole sind die Prüfstäube A2 (bzw. A4) nach DIN ISO 12103-1 [10] vorgegeben. Alternativ kann bei der Effizienzermittlung auch ein Salzaerosol genutzt werden. Dabei werden feste Salzpartikel dem Kanal zugeführt, die durch Zerstäuben einer wässrigen Lösung und durch eine nachgeschaltete Trocknung mittels Diffusionstrockner erzeugt werden.

Die obligatorische Forderung des ISO-Standards nach einer Neutralisierung für die

Effizienzmessung gilt sowohl bei der Verwendung von Prüfstaub als auch beim Salz-aerosol. Für Beladungstests ist die Neutralisierung optional. Als idealer Ladungs-Soll-Zustand wird das Ladungsgleichgewicht eines gealterten Aerosols angestrebt, wobei den Verfassern durchaus bewusst war, dass bei den im Rahmen der Filterprüfung realisierbaren Verweilzeiten lediglich eine graduelle Annäherung an diesen Ideal-Zustand zu erzielen ist. Die Bereitstellung der Luftionen soll durch eine radioaktive Quelle oder eine Koronaentladung erfolgen. Ringversuche haben gezeigt, dass mit dem Versuch, eine solche Neutralisierung zu realisieren, die Streuung der Ergebnisse zwischen den durchführenden Laboren größer wurde [8].

Die Systematik der nach ISO-Norm bei der Ermittlung von Fraktionsabscheidegraden obligatorischen Neutralisierung ist in Abb. 3.1 schematisch dargestellt. Neben dem Problem, dass es bei realisierbaren Verweilzeiten zwangsläufig nur zu einer graduellen Annäherung an den Ladungsgleichgewichtszustand kommen kann, stellt sich als weiteres Problem dar, dass als Methoden zur Kontrolle einer erfolgreichen Neutralisierung Verfahren vorgeschlagen werden, die den Ladungszustand lediglich durch Summenparameter abbilden bzw. nur eine mittelbare Beurteilung ermöglichen [8].

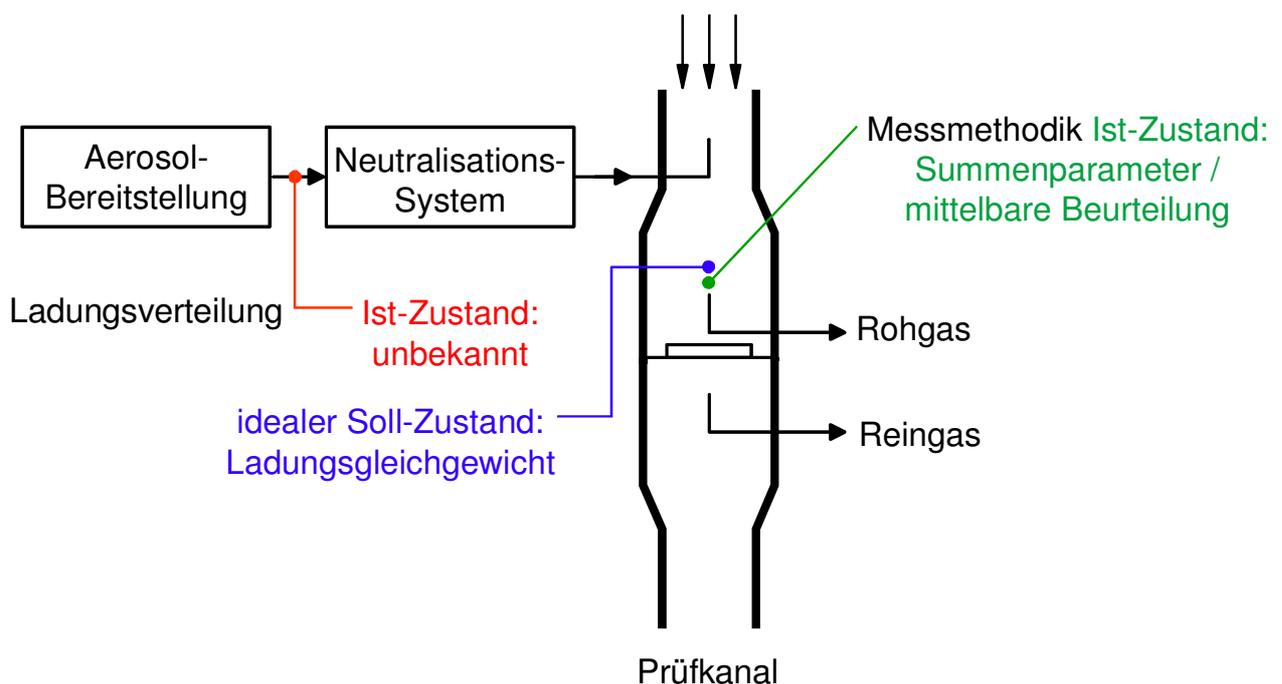


Abb. 3.1: Systematik der Neutralisierung nach ISO/TS 11155-1

Auf Basis der Ergebnisse des IGF-Vorläufervorhabens „Entwicklung eines standardisierten Verfahrens zur Erzeugung eines Prüfaerosols mit definierten Ladungseigenschaften für die Filterprüfung“ (Nr. 14397 N) wurde ein alternatives Konzept zur Neutralisierung der Prüfaerosole vorgeschlagen. Hierzu wurde zunächst der Ladungs-Soll-Zustand des Prüfaerosols neu formuliert. Die Zielvorgabe im Rahmen dieses

Konzeptes ist nicht mehr eine zwangsläufig nur graduelle Annäherung an einen idealen Ladungsgleichgewichtszustand, sondern die definierte Begrenzung der elektrischen Mobilität der Prüfpartikel mithilfe eines elektrischen Abscheiders.

Zur Realisierung wird hinter dem Aerosolgenerator, vor der Zudosierung in den Prüfkanal, ein elektrischer Abscheider verwendet (Abb. 3.2).

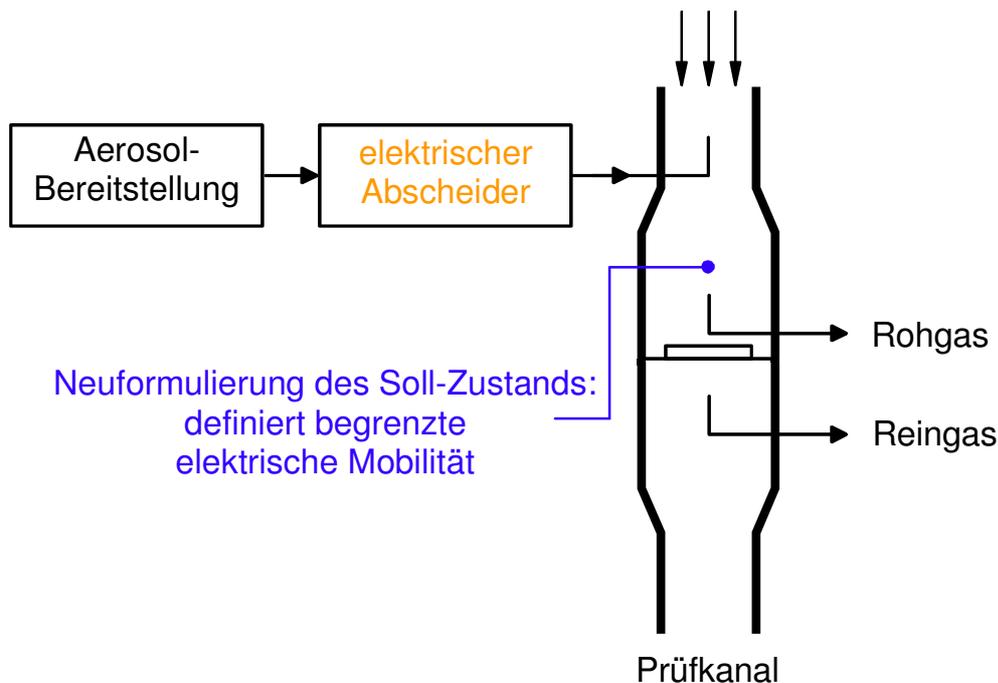


Abb. 3.2: Alternative Methode zur Neutralisation

Bei der Prüfung von RLT-Filtern nach EN 779 dient ein DEHS-Aerosol zur Effizienzmessung. Die Norm schreibt vor, dass das Aerosol ins Ladungsgleichgewicht überführt werden muss. Wie bei dem ISO-Standard für Kfz-Innenraumfilter soll dieses mit Hilfe einer radioaktiven Quelle oder einer Koronaentladung realisiert werden. Es werden keine konkreten Angaben zur Kontrolle des „Erfolgs“ der Neutralisierung gemacht.

Im Rahmen dieses Projektes werden für die Prüfung von Kfz-Innenraumfiltern A2- und NaCl-Aerosole und für RLT-Filter ein DEHS-Aerosol verwendet. Die unterschiedlichen Aerosole werden hinsichtlich ihrer Ladungszustände untersucht, um die Auswirkung auf den elektrophoretischen Abscheidebeitrag zu ermitteln. Die Effizienz beim jeweiligen generierungsbedingten Ladungszustand wird der Effizienz bei Verwendung des zu entwickelnden Abscheiders vergleichend gegenübergestellt.

Um ein besseres Verständnis der elektrophoretischen Prozesse zu erlangen, wird nicht nur der Einfluss des Aerosolladungszustandes untersucht. Auch der Einfluss

der elektrischen Ladung der Filtermedien wird einer eingehenden Betrachtung unterzogen. Bei Filtern, die eine Elektretwirkung aufweisen, kann es unter Prüfbedingungen wie auch im Realeinsatz mit zunehmender Beladung mit Partikeln zu einer signifikanten Reduktion der Effizienz kommen. Dieses Nachlassen des elektrophoretischen Abscheidebeitrages ist überlagert von einer allmählichen Effizienzverbesserung aufgrund der strukturellen Veränderung des Filters mit zunehmender Einlagerung von Partikeln.

Bei der Prüfung von RLT-Filtern nach EN 779 ist eine Messung der Effizienz nach einer elektrischen Neutralisierung von Medienproben vorgesehen. Durch eine Behandlung der Filtermedien mit Isopropanol wird eine Elektretwirkung eliminiert. Man erhält eine Minimaleffizienz, die sich potentiell auch bei zunehmender Beladung als Worst-Case darstellen kann, wenn noch keine Überlagerung mit der allmählichen Effizienzverbesserung gegeben ist.

Es werden erste Untersuchungen sowohl für RLT-Filter als auch für Kfz-Innenraumfilter vorgenommen, bei denen Effizienzen nach einer Isopropanol-Behandlung den Effizienzen vergleichend gegenübergestellt werden, die sich unter Prüfbedingungen und Realanwendungsbedingungen mit zunehmender Beladung ergeben.

4 Filterprüfungen an Kfz-Innenraum- und RLT-Filtern nach bestehenden Normen

Kfz-Innenraumfilter

Die für Kfz-Innenraumfilter gültige nationale Norm DIN 71460-1 sieht sowohl für die Effizienzmessungen als auch für die Beladung des Filters die Prüfstäube A2 oder A4 nach DIN ISO 12103-1 vor. Diese unterscheiden sich lediglich in der Korngrößenverteilung. Optional ist für Effizienzmessungen beispielsweise auch die Verwendung eines NaCl-Aerosols möglich. Auf eine elektrische Neutralisierung der Aerosole wird in der nationalen Norm, wie bereits erwähnt, bewusst verzichtet.

Die Prüfung der Kfz-Innenraumfilter besteht aus folgenden Einzeluntersuchungen:

1. Aufnahme der Druckverlust-Volumenstrom-Kurve;
2. Bestimmung des Anfangsfraktionsabscheidegrads;
3. Gravimetrische Bestimmung der Staubspeicherkapazität bis zu einem definierten Druckverlustanstieg sowie Messung des Fraktionsabscheidegrads und des Anstiegs des Druckverlusts in Abhängigkeit von der eingelagerten Staubmenge.

Während der Staubzugabe können optional auch in Zwischenstadien bis zur festgelegten Enddruckdifferenz Fraktionsabscheidegrade ermittelt werden.

Nachfolgend wird ein Ergebnis einer Filterprüfung vorgestellt, bei der der Fokus darauf lag, den Fraktionsabscheidegrad nicht nur in willkürlichen Zwischenstadien, sondern in seiner gesamten Entwicklung abzubilden.

Abb. 4.1 zeigt in der linken Grafik die Entwicklung des A2-Fraktionsabscheidegrades mit zunehmender A2-Beladung an einem Kfz-Innenraumfilter mit Elektretwirkung. Um ein näherungsweise kontinuierliches Abbild der Veränderung des Fraktionsabscheidegrades zu erzielen, wurde eine entsprechend feine zeitliche Diskretisierung gewählt. Dabei ist es nicht praktikabel, zwecks gravimetrischer Bestimmung der Staubspeicherkapazität den Filter immer wieder aus- und einzubauen. Daher wird statt der gravimetrisch ermittelten Massenzunahme des Filters die zudosierte Partikelmasse zur Beschreibung des Beladungsstadiums zu Grunde gelegt.

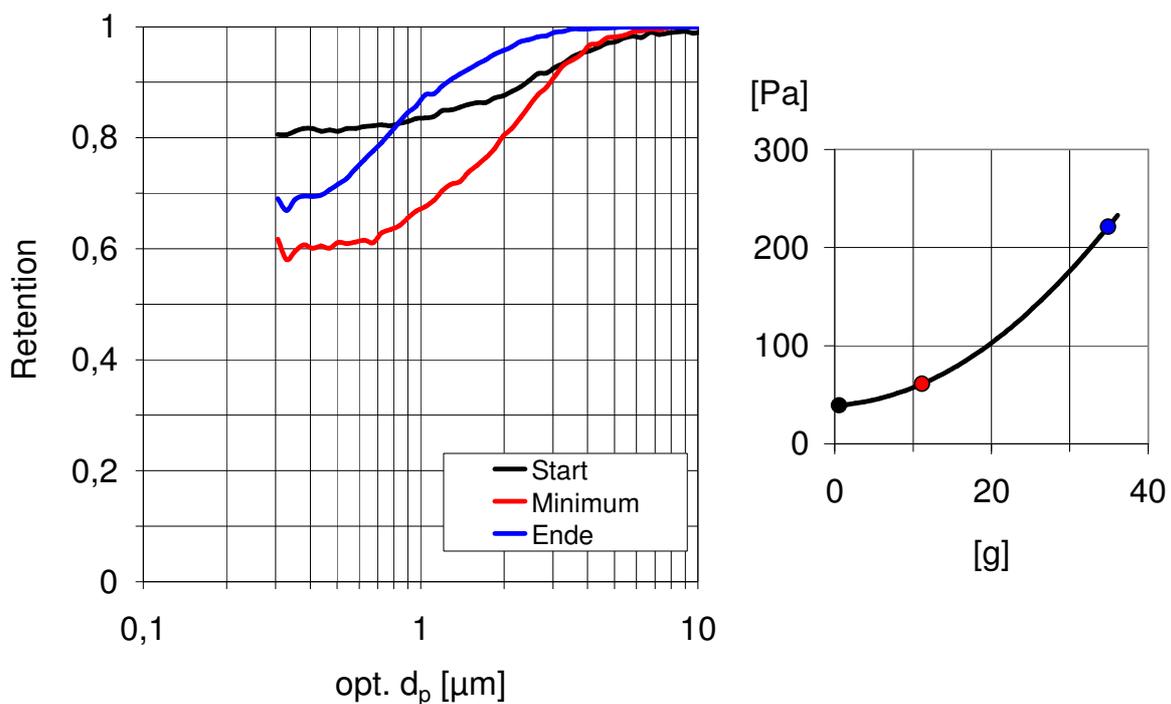


Abb. 4.1: Entwicklung des A2-Fraktionsabscheidegrades mit zunehmender A2-Beladung

Ausgehend vom Anfangsabscheidegrad (schwarze Kurve) erfolgt zunächst eine sukzessive Reduktion der Effizienz bis zu einem Minimum (rote Kurve). Eine weitere A2-Beladung führt zu einem Anstieg der Effizienz (blaue Kurve). Dieses Verhalten begründet sich durch die Überlagerung eines mit zunehmender Beladung nachlassenden elektrophoretischen Beitrages zur Abscheidung und der sich verbessernden mechanischen Abscheidung mit ansteigender eingelagerter Staubmenge.

Das rechte Diagramm der Abbildung zeigt den Druckverlust als Funktion der in den

Prüfkanal zudosierten A2-Partikelmasse. In der Beladungskurve ist mit entsprechender Farbbelegung markiert, in welchem Stadium die gezeigten Fraktionsabscheidegrade gemessen wurden.

Die exemplarisch gezeigte Charakteristik stellt sich grundsätzlich bei allen Elektretfiltern dar. Sie kann sich aber individuell in quantitativer Hinsicht deutlich unterscheiden. Das gesamte Effizienzniveau kann dabei je nach Filterqualität signifikante Unterschiede aufweisen. Wie weit die Minimaleffizienz unterhalb der Anfangseffizienz liegt, kann je nach Filter sehr unterschiedlich sein. Darüber hinaus kann sich die Minimaleffizienz bei manchen Filtern in einem sehr frühen Stadium der A2-Beladung, bei anderen in einem deutlich späteren Stadium einstellen. Weiterhin kann die Effizienz im Endzustand bei einem vorgegebenen Druckverlustanstieg zwischen Minimal- und Anfangseffizienz, teilweise über der der Anfangseffizienz (wie in dem gezeigten Beispiel) oder komplett oberhalb der Anfangseffizienz liegen.

Die optionale Verwendung eines NaCl-Aerosols bei der Effizienzmessung wird im folgenden Beispiel für einen anderen Kfz-Innenraumfilter mit Elektretwirkung erörtert. Abb. 4.2 kontrastiert den NaCl-Anfangsabscheidegrad mit dem A2-Anfangsabscheidegrad. Die Verwendung des NaCl-Aerosols führt zu deutlich niedrigeren ermittelten Effizienzen. Die Ursache hierfür ist nicht zuletzt durch die unterschiedlichen generierungsbedingten Ladungszustände von A2 und NaCl begründet.

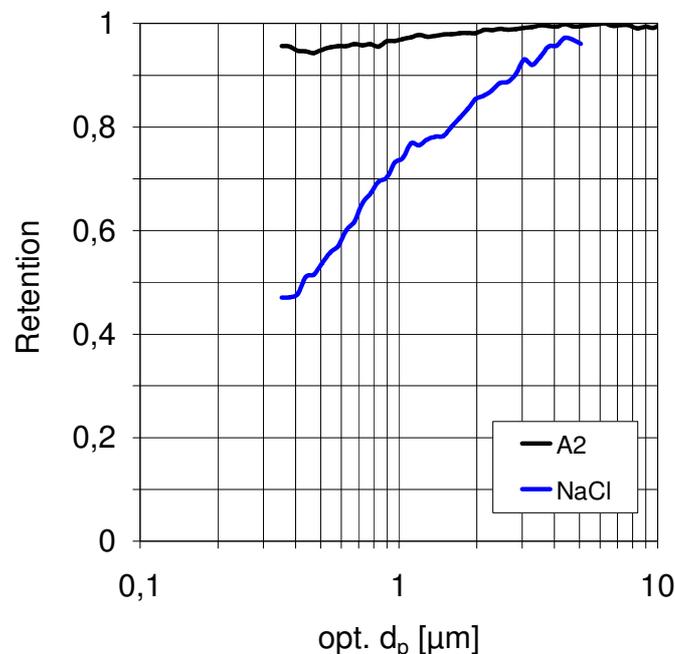


Abb. 4.2: A2- und NaCl-Anfangsabscheidegrad

Vergleichbar zur Entwicklung des A2-Fraktionsabscheidegrades mit zunehmender A2-Beladung (Abb. 4.1) wurde auch der Fraktionsabscheidegrad für NaCl in unter-

schiedlichen A2-Beladungsstadien ermittelt (Abb. 4.3). Im betrachteten Fallbeispiel ergibt sich, ausgehend vom Anfangsabscheidegrad mit den gewählten Druckverlustanstiegen, eine kontinuierliche Verbesserung der Effizienz. Anders als bei A2 ist hier keine Reduktion der Effizienz durch ein Nachlassen des elektrophoretischen Abscheidebeitrags zu erkennen. Dies kann jedoch durch eine zu grobe Diskretisierung der Beladungsstufen zu Beginn begründet sein. Andere Filter zeigen bei der gleichen gewählten Diskretisierung durchaus zunächst einen Einbruch in der Effizienz.

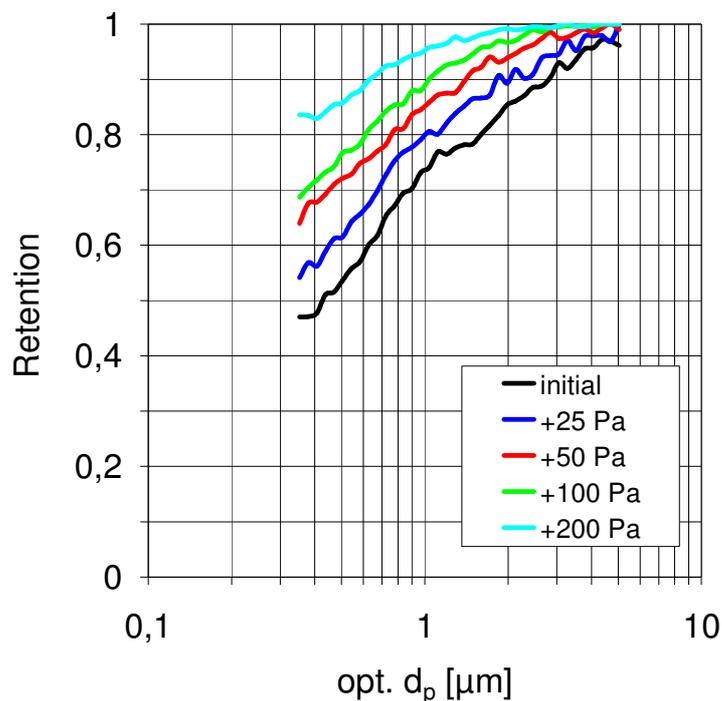


Abb. 4.3: Entwicklung des NaCl-Fraktionsabscheidegrades mit zunehmender A2-Beladung

Während die Anfangseffizienz an einem Elektretfilter bei Verwendung von NaCl immer schlechter ist als die bei Verwendung von A2 (beide Aerosole im generierungsbedingten Ladungszustand), können die Fraktionsabscheidegrade in höheren Beladungsstufen je nach Filter eine gute quantitative Übereinstimmung aufweisen.

RLT-Filter

Partikelfilter für die allgemeine Raumluftechnik (RLT-Filter) werden nach der europäischen Richtlinie DIN EN 779 geprüft. Die Prüfung für Feinstaubfilter sieht folgendes Vorgehen vor:

1. Aufnahme der Druckverlust-Volumenstrom-Kurve
2. Bestimmung des Anfangswirkungsgrads für DEHS-Aerosol
3. Beladung mit 30 g ASHRAE-Staub, Bestimmung des Abscheidegrades (Gravi-

metrie an nachgeschaltetem Endfilter) und des Wirkungsgrads für DEHS-Aerosol

4. Beladung mit ASHRAE-Staub bis zu einem Enddruckverlust von 450 Pa in vier bis fünf Schritten, nach jeder Etappe Bestimmung des Abscheidegrades und des Wirkungsgrads für DEHS-Aerosol

Jede Wirkungsgradmessung besteht aus mindestens 6 Einzelmessungen, die gemittelt werden und für die der 95%-Vertrauensbereich berechnet wird.

Zur Bestimmung des mittleren Wirkungsgrads werden die Wirkungsgrade der einzelnen Staubaufgabe-Intervalle entsprechend der aufgegebenen Staubmassenanteile gewichtet. Das Gleiche gilt für die Berechnung des Vertrauensbereichs und des mittleren Abscheidegrads.

Die Einstufung der Feinstaubfilter in die Filterklassen erfolgt anhand des mittleren Wirkungsgrades bei einem DEHS-Partikeldurchmesser von $0,4 \mu\text{m}$ (optisches Latex-Sphären-Äquivalent).

Abb. 4.4 stellt die Änderung des Wirkungsgrads eines F7-Filters für DEHS bei Beladung mit ASHRAE-Staub dar. Es ergibt sich eine beständige Verbesserung des Wirkungsgrades bei zunehmender Beladung.

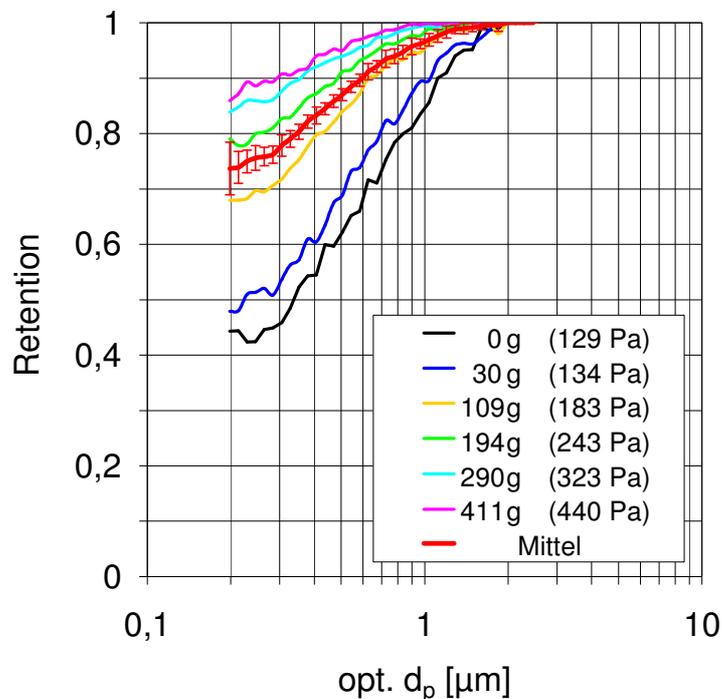


Abb. 4.4: Änderung des Wirkungsgrads eines F7-Filters

Über den bisher beschriebenen Prüfumfang hinaus ist in der EN 779 eine Messung

der Effizienz nach einer elektrischen Neutralisierung von Medienproben vorgesehen. Die aktuell gültige Fassung der Norm nennt neben der detailliert beschriebenen Neutralisierung des Mediums durch eine Isopropanolbehandlung auch weitere Methoden, beispielsweise die Beaufschlagung mit Dieselruß. Ergebnisse der Fraktionsabscheidegradmessungen am elektrisch neutralisierten Filtermedium liefern ergänzende Informationen zum Leistungsvermögen des Filters, werden allerdings nicht zur Klassierung des Filters herangezogen. Im momentanen Entwurfsstadium der Überarbeitung der EN 779 ist ausschließlich die Isopropanolbehandlung zur Neutralisierung vorgesehen. Für Feinstaubfilter der Klassen F7 bis F9 sind Vorgabewerte für 0,4 µm DEHS-Partikel für die Minimaleffizienz nach der Isopropanolbehandlung als zusätzliches Klassierungskriterium vorgesehen.

Untersuchungsergebnisse zur Filtereffizienz bei einem sukzessiven Ladungsverlust des Filters durch die Beaufschlagung mit Dieselruß und zur Effizienz nach einer kompletten elektrischen Neutralisierung durch die Isopropanolbehandlung werden in späteren Abschnitten des Berichtes ausführlich vorgestellt und diskutiert.

5 Ausgangssituation

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse basieren auf Messungen, die im Rahmen dieses Projektes vorgenommen wurden. Sie werden hier genutzt, um die Ausgangssituation bei Start des Projektes zu veranschaulichen.

Bei Filtern aus Synthetikfasermedien, die eine Elektretwirkung aufweisen, ergeben sich unterschiedliche Fraktionsabscheidegrade für verschiedene Prüfaerosole fast ausschließlich aufgrund der jeweiligen generierungsbedingten Aerosolladungszustände. Abb. 5.1 zeigt im linken Diagramm den Anfangsfraktionsabscheidegrad an einem Elektretmedium im Vergleich für A2 und DEHS. Das generierungsbedingt hochaufgeladene A2 führt zu einem Fraktionsabscheidegrad, der sehr viel höher ist als der bei Verwendung von DEHS im generierungsbedingten Ladungszustand. Das mittlere Diagramm der Abbildung zeigt die Effizienzen nachdem das Filtermedium durch eine Isopropanolbehandlung elektrisch neutralisiert worden ist. Da von den Filterfasern kein elektrisches Feld mehr ausgeht, tritt keine Abscheidung aufgrund eines coulombschen und / oder polarisationsbedingten elektrophoretischen Beitrags mehr auf. Die Effizienzen sowohl für A2 als auch für DEHS sind folglich niedriger als im Falle des unbehandelten Mediums. Es besteht aber nach wie vor ein großer Unterschied zwischen der A2- und der DEHS-Effizienz. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass die hochaufgeladenen A2-Partikel zu Spiegelladungen auf den Filterfasern führen und demzufolge ein elektrophoretischer Abscheidebeitrag gegeben ist, obwohl das Filtermedium durch die Isopropanolbehandlung elektrisch neutralisiert worden ist.

Verwendet man als Filtermedium ein elektrisch leitfähiges und geerdetes Drahtgewebe, können hochaufgeladene Partikel auf den Drähten ebenfalls Ladungsverschiebungen verursachen. Es ist jedoch zu erwarten, dass eine mögliche Abscheidung durch den Spiegelladungseffekt deutlich geringer ausgeprägt ist als im Falle der polarisierbaren synthetischen Fasern. Das rechte Diagramm der Abbildung zeigt daher zum Vergleich Fraktionsabscheidegrade an einem Drahtgewebe. Die Diskrepanz der Effizienz zwischen A2 (schwarze Kurve) und DEHS (rote Kurve) jeweils im generierungsbedingten Ladungszustand ist, wie erwartet, im Vergleich zum Elektretmedium nach Isopropanolbehandlung nur gering. Die abnehmende Effizienz für die A2-Feststoffpartikel ab einem Durchmesser von etwa $4\ \mu\text{m}$ lässt sich durch Abpralleffekte begründen. Die blaue Kurve zeigt den Fraktionsabscheidegrad bei Einsatz eines elektrischen Abscheiders unter Verwendung von A2. Die Begrenzung der elektrischen Mobilität der A2-Partikel führt dazu, dass der Fraktionsabscheidegrad am Drahtgewebe in sehr guter Näherung dem bei Verwendung von DEHS entspricht.

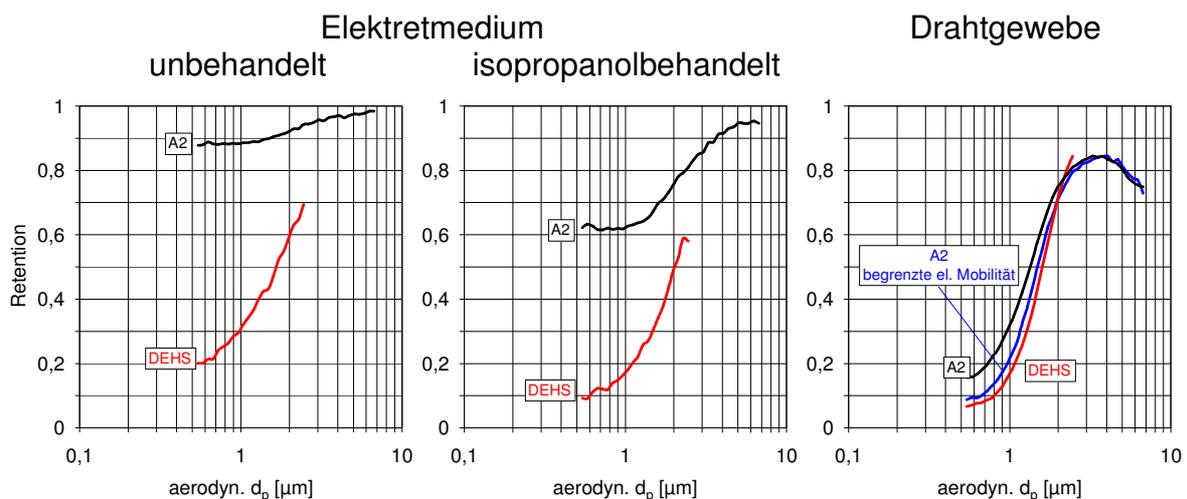


Abb. 5.1: A2- und DEHS-Anfangsfraktionsabscheidegrad am unbehandelten und am isopropanolbehandelten Elektretmedium im Vergleich zum Fraktionsabscheidegrad an einem Drahtgewebe

Es ist zu erwarten, dass die A2- und die DEHS-Effizienz auch an einem Elektretmedium eine akzeptable Übereinstimmung aufweisen, wenn beide Aerosole in den gleichen definierten Ladungszustand überführt werden können.

Im Vorläufervorhaben „Entwicklung eines standardisierten Verfahrens zur Erzeugung eines Prüfaerosols mit definierten Ladungseigenschaften für die Filterprüfung“ (Nr. 14397 N) wurde dargestellt, dass eine hinreichende Annäherung eines gegebenenfalls generierungsbedingt hochaufgeladenen Aerosols an den Ladungsgleichgewichtszustand unter den Rahmenbedingungen einer Filterprüfung nicht realisiert werden kann.

Abb. 5.2 zeigt diesbezüglich beispielhaft Fraktionsabscheidegrade gemessen an einem Elektretmedium. Das linke Diagramm der Abbildung zeigt Messergebnisse für DEHS, das rechte für A2. Die schwarzen Datenpunkte beziehen sich jeweils auf Ergebnisse, die am unbehandelten Medium ermittelt wurden. Die roten Datenpunkte beziehen sich auf Ergebnisse nach einer Isopropanolbehandlung. Die gefüllten Symbole repräsentieren ermittelte Messdaten mit den Aerosolen im jeweiligen generierungsbedingten Ladungszustand, die Kontursymbole Daten, denen der Einsatz einer Corona-Neutralisierung des Aerosols zu Grunde liegt.

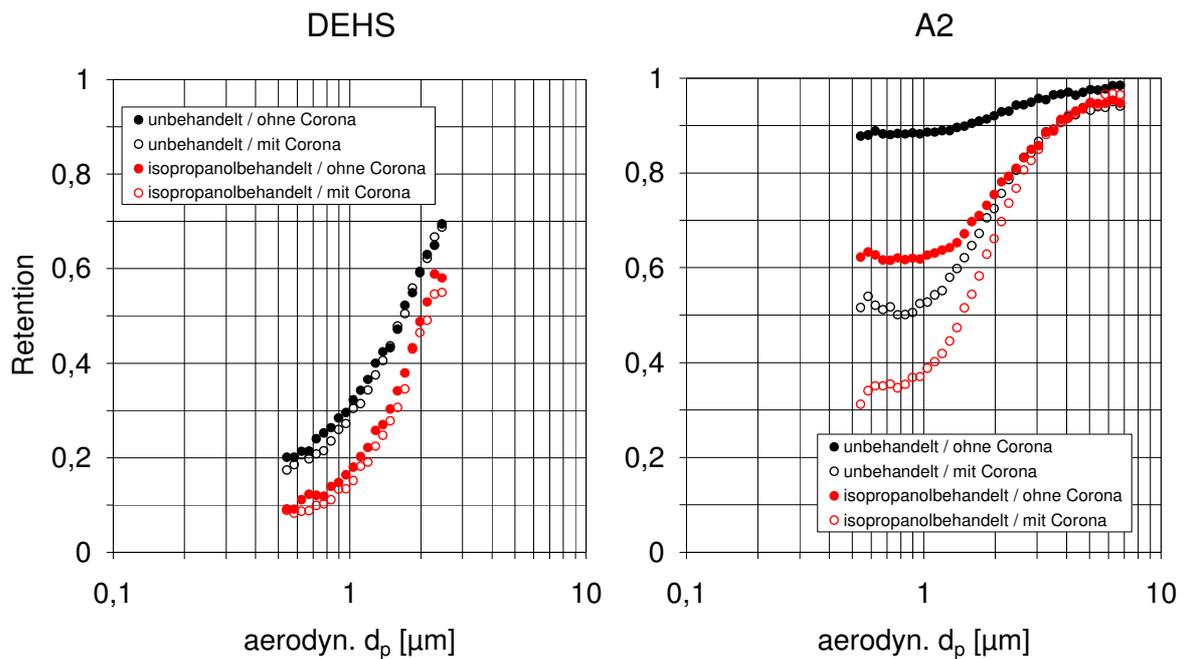


Abb. 5.2: Fraktionsabscheidegrade DEHS und A2 mit und ohne Corona

Im linken Diagramm der Abbildung ist zu erkennen, dass sich für DEHS im betrachteten Durchmesserbereich bei der zu Grunde liegenden Anströmgeschwindigkeit von 20 cm/s keine Unterschiede in der Effizienz für den generierungsbedingten Ladungszustand und den bei Einsatz der Corona-Neutralisierung ergeben. Im Fall des isopropanolbehandelten Mediums liegt die Effizienz in der Größenordnung von 10 Prozentpunkten Retention unter derjenigen, die am unbehandelten Medium ermittelt wurde.

Für A2 ergeben sich deutliche Unterschiede in der Effizienz für den generierungsbedingten Ladungszustand und den bei Einsatz der Corona-Neutralisierung (rechtes Diagramm). Eine Isopropanolbehandlung führt in beiden Varianten zu einer deutlichen Reduktion der Effizienz.

Ein Vergleich zwischen DEHS und A2 zeigt, dass die A2-Effizienzen bei Einsatz der Corona deutlich über den entsprechenden DEHS-Effizienzen liegen. Es ist davon

auszugehen, dass für A2 keine hinreichend gute Annäherung ans Ladungsgleichgewicht erzielt werden konnte.

Eine mehr oder minder gute graduelle Annäherung an den Ladungsgleichgewichtszustand ist offensichtlich keine geeignete Methode, um die Filtereffizienz von Luftfiltern unbeeinflusst von der durch die Partikelgenerierung verursachten Ladungsverteilung bestimmen zu können.

6 Forschungsziel / Lösungsweg / Ergebnisse

Das angestrebte Forschungsziel war die praxisnahe Untersuchung der Filtereffizienz von Luftfiltern unter besonderer Berücksichtigung der elektrophoretischen Abscheidung. Untersuchungsgegenstand waren Filter aus zwei verschiedenen Anwendungsbereichen, einerseits Kraftfahrzeuginnenraumfilter (Prüfung nach DIN 71460-1 bzw. ISO/TS 11155-1), andererseits Filter für raumluftechnische Anlagen (Prüfung nach DIN EN 779).

Im Rahmen des beantragten Forschungsprojekts sollte ein Verfahren entwickelt werden, welches es ermöglicht, die Filtereffizienz von Luftfiltern unbeeinflusst von der durch die Partikelgenerierung verursachten Ladungsverteilung zu bestimmen.

Zu diesem Zweck wurde ein elektrischer Abscheider, der die elektrische Mobilität der Prüfpartikel definiert zu begrenzen vermag, ausgelegt, konstruiert und erprobt.

Ein weiteres Ziel des Projektes war es, ein besseres Verständnis hinsichtlich der elektrophoretischen Abscheidebeiträge zu erlangen, die sich für unterschiedliche Aerosole unter Prüfbedingungen sowie im Bezug auf den Realanwendungsfall ergeben können.

Hierzu wurde einerseits der Ladungszustand der unterschiedlichen Prüfaerosole variiert. Andererseits wurden unterschiedliche Methoden untersucht, die Filter hinsichtlich einer elektrophoretischen Wirkung zu neutralisieren bzw. zu altern. Die Neutralisierung erfolgte durch eine Behandlung der Filter mit Isopropanol oder durch eine Klimabehandlung. Die Beladung der Filter zwecks Alterung vor einer anschließenden Effizienzmessung erfolgte mit Außenluft und alternativ mit Dieselruß.

6.1 Elektrischer Abscheider / Theoretische Auslegung, Konstruktion und Funktionstests

6.1.1 Theoretische Auslegung

Der Elektroabscheider soll als vertikal stehender Zylinderkondensator (Länge L , Radius r) ausgeführt werden. Für die elektrische Feldstärke gilt hierbei:

$$E(r) = \frac{Q}{2\pi r \varepsilon L} \text{ mit } \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r. \quad (1)$$

Die Ladung Q wird durch die Potentialdifferenz (bzw. die angelegte Spannung U) bestimmt:

$$U = \frac{Q}{2\pi \varepsilon L} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2)$$

mit r_1 = Außenradius der Zentralelektrode
und r_2 = Innenradius der Mantelelektrode.

Aus (1) und (2) folgt:

$$E(r) = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (3)$$

Auf geladene Partikeln im Abscheider wirken folgende Kräfte in radialer Richtung:

- Elektrische Kraft $F_{el} = q \cdot E(r)$,
- Widerstandskraft $F_{R,r} = \frac{1}{2} \rho_L w_r^2 \cdot A_P \cdot c_w / C_C$ und
- Trägheitskraft $F_{T,r} = m_P \cdot d^2r / dt^2$.

Die elektrische Kraft lässt sich mit (3) schreiben als

$$F_{el} = ne \cdot \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (4)$$

mit n = Zahl der Ladungen und $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C (Elementarladung).

Für den Stokesschen Bereich gilt: $c_w = \frac{24}{Re_P} = \frac{24\nu}{w_r d_P}$.

Damit beträgt die radiale Widerstandskraft

$$F_{R,r} = \frac{\rho_L w_r^2}{2} \cdot \frac{\pi d_P^2}{4} \cdot \frac{24\nu}{w_r d_P} \cdot \frac{1}{C_C} = 3\pi d_P \eta w_r \cdot \frac{1}{C_C} \quad (5)$$

mit $\eta = \rho_L \cdot \nu$.

Die Cunningham-Korrektur berechnet sich aus

$$C_C = 1 + \frac{\lambda}{d_P} \left[2,514 + 0,8 \cdot \exp\left(-0,55 \cdot \frac{d_P}{\lambda}\right) \right] \quad (\text{nach Hinds [5]})$$

und der mittleren freien Weglänge $\lambda = 66$ nm

für Luft bei 1013,25 hPa und 20 °C.

Für gegenüber dem Abstand $r_2 - r_1$ kleine d_P ist der Trägheitsterm vernachlässigbar. Aus dem Kräftegleichgewicht folgt:

$$\frac{neU}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} = 3\pi\eta w_r d_p \cdot \frac{1}{C_C}$$

oder, mit $w_r = dr / dt$,

$$neU = \frac{3\pi\eta d_p}{C_C} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \cdot r \frac{dr}{dt} \quad (6)$$

Integriert ergibt sich für Partikeln, die sich zum Zeitpunkt $t = 0$ an der Zentralelektrode befinden und zum Zeitpunkt $t = t_{ab}$ an der Mantelelektrode abgeschieden werden (oder umgekehrt),

$$t_{ab} = \frac{3\pi\eta d_p}{2neU \cdot C_C} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \cdot (r_2^2 - r_1^2) \quad (7)$$

Die Bewegungsänderungen aufgrund der in axialer Richtung wirkenden Kräfte (Gewichtskraft, Auftriebskraft, Widerstandskraft und Trägheitskraft) können vernachlässigt werden. Die Durchströmungszeit wird nur durch die Geometrie des Abscheiders und den Volumenstrom bestimmt:

$$t_L = \frac{L}{v} = \frac{L \cdot A}{\dot{V}} = \frac{L \cdot \pi(r_2^2 - r_1^2)}{\dot{V}} \quad (8)$$

Für eine Abscheidung muss $t_{ab} \leq t_L$ sein:

$$\frac{L \cdot \pi(r_2^2 - r_1^2)}{\dot{V}} \geq \frac{3\pi\eta d_p}{2neU \cdot C_C} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \cdot (r_2^2 - r_1^2)$$

Die minimal erforderliche Länge ist daher

$$L_{\min} = \frac{3}{2} \frac{\dot{V} \eta d_p}{neU \cdot C_C} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (9)$$

Für Volumenströme, wie sie beispielsweise der RBG 1000 produziert (2-5 m³/h), ergeben sich für eine vollständige Abscheidung aller geladenen Partikeln unpraktikabel große Mindestbaulängen. Deshalb wurden folgende Überlegungen angestellt. Der Einbau von $m - 2$ konzentrischen, abwechselnd geladenen Zwischenelektroden (m sei die Gesamtzahl der Elektroden) führt zu nachfolgender Veränderung von Gl. (8):

$$t_L = \frac{L}{\dot{V}} \cdot \pi(r_m^2 - r_{m-1,a}^2 + \dots + r_{2i}^2 - r_1^2) \quad (10)$$

(Indices: i = innen, a = außen).

Für die Abscheidezeit in den einzelnen Zylinderringen (j) gilt analog zu Gl. (7):

$$t_{ab,j} = \frac{3\pi\eta d_p}{2neU \cdot C_C} \cdot \ln \frac{r_{j+1,i}}{r_{j,a}} \cdot (r_{j+1,i}^2 - r_{j,a}^2) \quad (11)$$

Damit ergibt sich die Mindestlänge

$$L_{min,j} = \frac{3}{2} \cdot \frac{A_j}{\sum_j A_j} \cdot \frac{\dot{V}\eta d_p}{neU \cdot C_C} \cdot \ln \frac{r_{j+1,i}}{r_{j,a}} \quad (12)$$

Für die Konstruktion wurde ein Aufbau mit einer Zentral-, zwei Zwischen- und einer Mantelelektrode gewählt. Die Mantelelektrode hat einen Innendurchmesser von 104 mm, die Durchmesser der Zwischenelektroden und der Zentralelektrode wurden so ausgesucht, dass die jeweiligen Ringspalte eine Spaltbreite von ca. 7 mm haben.

Um alle Partikel mit einer Elementarladung bis zu einem Partikeldurchmesser von 1 µm sicher abzuscheiden, ergibt sich für einen Volumenstrom des Prüfaerosols von 2 m³/h und eine angelegte Spannung von 12 kV eine theoretische Mindestlänge von ca. 47 cm. Für die Konstruktion wurde eine Länge von 50 cm gewählt.

Bei einem etwas höheren Volumenstrom des Prüfaerosols durch den Elektroabscheider (3 m³/h) und demzufolge geringerer Verweilzeit und einer geringeren angelegten Potentialdifferenz von 9 kV ergibt sich die in Abb. 6.1 gezeigte Charakteristik der maximalen Anzahl an Elementarladungen n_{max} . Diese wird im Diagramm der mittleren betraglichen Elementarladungsanzahl im Ladungsgleichgewicht \bar{n} gegenübergestellt, welche sich nach Brown [7] gemäß folgender Formel beschreiben lässt:

$$\bar{n} = 2,4 \cdot \sqrt{d_p} \quad (13)$$

Der Partikeldurchmesser muss in dieser Formel dimensionsbehaftet in Mikrometern verwendet werden.

Die Herleitung zu dieser Formel basiert auf der Annahme, dass der Anteil der thermodynamischen Energie, die sich als mittlere kinetische Energie darstellt, der elektrostatischen Energie gleichzusetzen ist. Wenn in der folgenden Formel \bar{q} durch $\bar{n} \cdot e$ substituiert und nach \bar{n} aufgelöst wird, erhält man nach Einsetzen entsprechender Zahlenwerte in Gl. (14) die Gl. (13).

$$\frac{\bar{q}^2}{4\pi\epsilon_0 d_p} = \frac{1}{2} k_B T \quad (14)$$

Streng genommen gilt Gl. (13) nicht mehr für Partikel mit einem Durchmesser, der kleiner ist als ca. 0,11 µm. Hier müsste eine Beschreibung über den Ansatz erfolgen, dass die Partikel mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit entweder eine Elementarladung tragen oder neutral sind. In der Abb. 6.1 wird die Kurve für die mittlere betragliche Elementarladungsanzahl zum Vergleich mit der maximalen Elementar-

ladungsanzahl bei Verwendung des E-Abscheiders dennoch auch für Partikel mit einem Durchmesser kleiner $0,11 \mu\text{m}$ dargestellt.

Die dargestellte Kurve der maximalen Elementarladungsanzahl liegt für Partikel mit einem Durchmesser kleiner $1,5 \mu\text{m}$ unterhalb der Kurve für die mittlere betragliche Ladungsanzahl im Ladungsgleichgewicht. Wird das Aerosol bei Verwendung des Elektroabscheiders bei der Fraktionsabscheidegradermittlung an Elektretfiltern verwendet, ergibt sich zwangsläufig ein geringerer coulombscher Abscheidebeitrag als bei Vorliegen des Ladungsgleichgewichtszustandes.

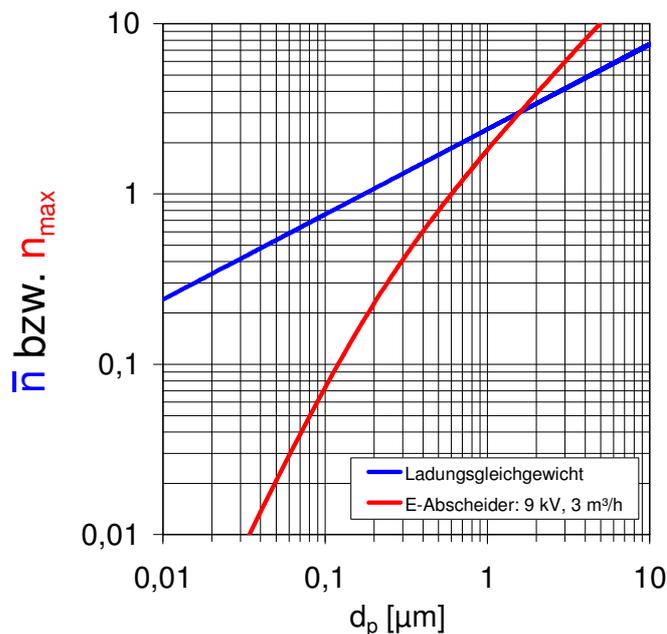


Abb. 6.1: Maximale betragliche Anzahl an Elementarladungen bei Verwendung des E-Abscheiders im Vergleich zur mittleren betraglichen Ladungsanzahl im Ladungsgleichgewicht

Der Vorteil bei Verwendung des Elektroabscheiders ist, dass der durch die rote Kurve repräsentierte Ladungszustand sicher erzielt wird. Er ist durch die Geometrie des Elektroabscheiders und die gewählten Betriebsparameter festgelegt und lässt sich durch die Veränderung der Betriebsparameter darüber hinaus variieren. Es lassen sich also definierte Ladungszustände auf einem sehr geringen Ladungsniveau gezielt einstellen.

Wenn man hingegen versucht, das Aerosol durch Bereitstellung von Luftionen beider Polarität dem Ladungsgleichgewicht anzunähern (also der blauen Kurve), ist es völlig unwägbar, wie gut oder schlecht man sich diesem Idealzustand angenähert hat.

Die Methoden zur Beurteilung einer „erfolgreichen“ Neutralisierung durch die messtechnische Abbildung von Summenparametern oder gar einer nur mittelbaren Beurteilung des Ladungszustandes haben hierbei eine sehr begrenzte Aussagekraft.

Der Ladungszustand ist im Vergleich zum Ladungszustand bei Verwendung des elektrischen Abscheiders undefiniert.

6.1.2 Konstruktion

Entsprechend der Auslegung wurde der Abscheider konstruiert und in der Werkstatt für Elektromechanik der Universität Duisburg-Essen angefertigt. Die Konstruktion besteht aus einer Zentralelektrode und zwei Zwischenelektroden, die mit zwei Naben unter Zuhilfenahme einer Gewindestange gegeneinander verspannt werden (Abb. 6.2). Die eine Nabe ist so ausgeführt, dass sie in das als Mantelelektrode dienende Rohr eingesteckt werden kann. Die andere Nabe ist in einen Flansch mit elektrischer Durchkontaktierung integriert (Abb. 6.3). Die Elektroden liegen alternierend auf Masse bzw. Hochspannungspotential. Die Mantelelektrode liegt dabei aus sicherheitstechnischen Gründen auf Masse. Als Spannungsquelle dient ein handelsübliches HV-Netzteil. An der An- und Abströmseite ist jeweils ein konisch ausgeführter Deckel an der Mantelelektrode angeflanscht. Der Anschluss an die Deckel erfolgt über Kleinflansch-Verbinder.



Abb. 6.2: E-Abscheider / teildemontierter Zustand



Abb. 6.3: E-Abscheider / Zwischenelektroden und Zentralelektrode mit in Flansch integrierter Nabe und elektrischer Durchkontaktierung

6.1.3 Funktionstests

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse wurden am Prüfkanal für Kfz-Innenraumfilter nach DIN 71460-1 gewonnen.

Im Prüfkanal war eine Blende mit einem lichten Querschnitt von 510 cm² eingebaut. Der Volumenstrom im Prüfkanal betrug 200 m³/h. Als Aerosolspektrometer wurde ein aerodynamischer Partikelzähler und Größenanalysator (APS 3321, Fa. TSI) eingesetzt. Die Aerosole wurden dem Messgerät durch isokinetische Probenahme aus dem Prüfkanal zugeführt. Die Wirkung des elektrischen Abscheiders im Zudosierungsstrang wird also örtlich dort beurteilt, wo es für die Filterprüfung von Interesse ist.

Als Aerosole wurden A2, NaCl und DEHS verwendet. Die Messergebnisse charakterisieren den elektrischen Abscheider in seiner Funktion und lassen darüber hinaus Aussagen zum Ladungszustand des jeweiligen Aerosols zu.

In Abb. 6.4 ist für A2 (bereitgestellt mit einem Rotierenden-Bürsten-Aerosol-Generator / RBG 1000, Fa. Palas) die normierte Gesamtanzahlkonzentration als Funktion der Spannung am elektrischen Abscheider dargestellt. Die Normierung erfolgte mit der gemessenen Anzahlkonzentration ohne eine angelegte Spannung am elektrischen Abscheider.

Die Partikelanzahlkonzentration nimmt bei Erhöhung der Spannung bis zu 1 kV rapide ab. Es sind bei dieser Spannung nur noch 10 % der bereitgestellten Partikel übrig. Bei weiterer Erhöhung der Spannung zeigt sich ein asymptotisches Verhalten hin zu einem Wert von ca. 1 % der ursprünglichen Partikelanzahlkonzentration.

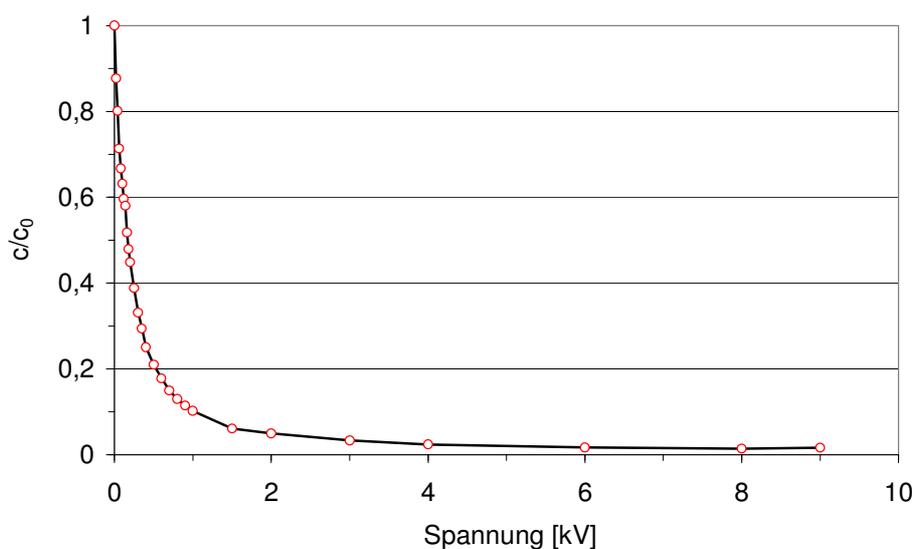


Abb. 6.4: Normierte Gesamtanzahlkonzentration A2 als Funktion der Spannung am E-Abscheider

Die nachfolgende Abb. 6.5 zeigt für A2 den Fraktionsabscheidegrad des elektrischen

Abscheiders bei Variation der Spannung in ausgewählten Diskretisierungsschritten. Zu erkennen ist, dass schon ab einer angelegten Spannung von 6 kV quasi partikelgrößenunabhängig ca. 99 % der Partikel zurückgehalten werden.

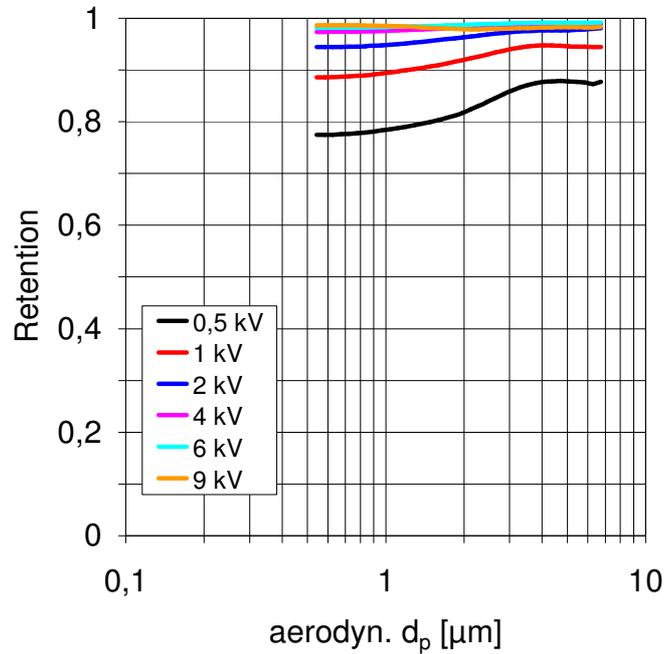


Abb. 6.5: Fraktionsabscheidegrad A2 des E-Abscheiders

Abb. 6.6 zeigt die normierte Anzahlverteilung von A2 bei ausgeschaltetem Elektroabscheider im Vergleich zur Verteilung bei einer angelegten Potentialdifferenz von 9 kV. Eine geringfügige Abreicherung an größeren Partikeln ($> \text{ca. } 1,5 \mu\text{m}$) ist zu erkennen. Die Anzahlverteilung erfährt aber keine relevante Veränderung.

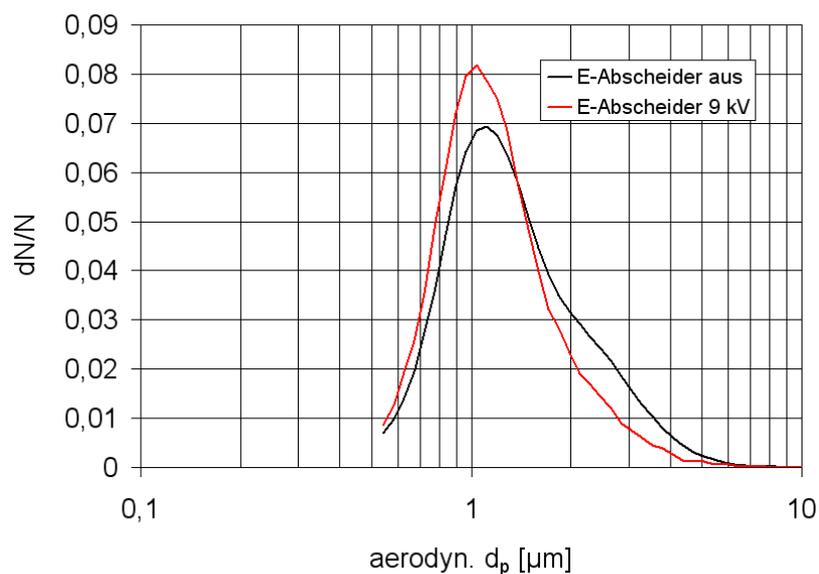


Abb. 6.6: A2 normierte Anzahlverteilung mit und ohne Spannung am E-Abscheider

Abb. 6.7 stellt die normierte Gesamtanzahlkonzentration bei Variation der Spannung für NaCl (bereitgestellt mit einem Zerstäuber AGK 2000, Fa. Palas und nachgeschalteten Diffusionstrocknern) dar. Die Konzentration nimmt bei Erhöhung der Spannung im Vergleich zu A2 deutlich langsamer ab (vergl. Abb. 6.4). Es stellt sich ein asymptotisches Verhalten hin zu einem Wert von ca. 10 % der ursprünglichen Partikel dar.

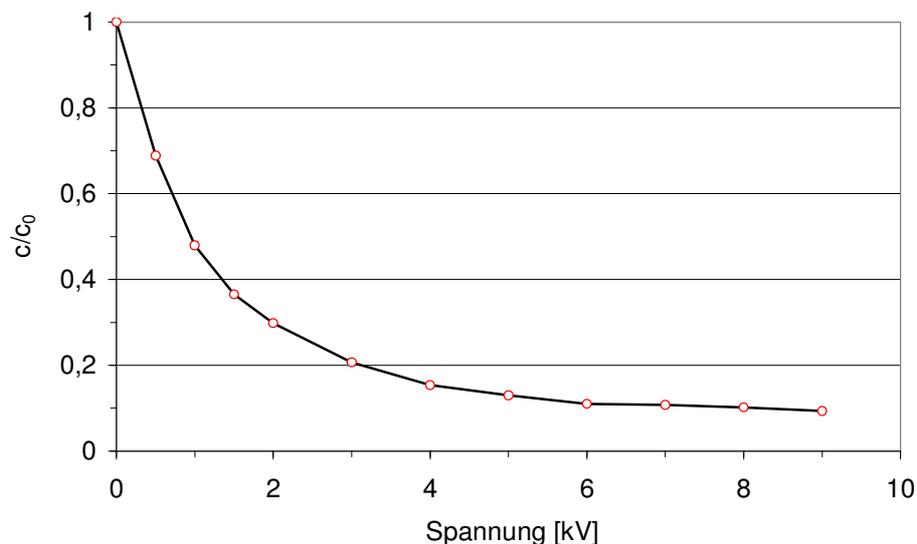


Abb. 6.7: Normierte Gesamtanzahlkonzentration NaCl als Funktion der Spannung am E-Abscheider

Die nachfolgende Abb. 6.8 zeigt den Fraktionsabscheidegrad des elektrischen Abscheiders bei Variation der Spannung für NaCl. Es ist zu erkennen, dass im Vergleich zu A2 bei gleichen Spannungswerten weniger Partikel abgeschieden werden. Darüber hinaus ist die Abscheidecharakteristik bzw. der Kurvenverlauf ein anderer als bei A2. Die Abscheidung nimmt sowohl hin zu kleineren als auch hin zu größeren Partikeln zu. Ein Minimum des Fraktionsabscheidegrads des Elektroabscheiders liegt bei einem Durchmesser von ca. 3 μm .

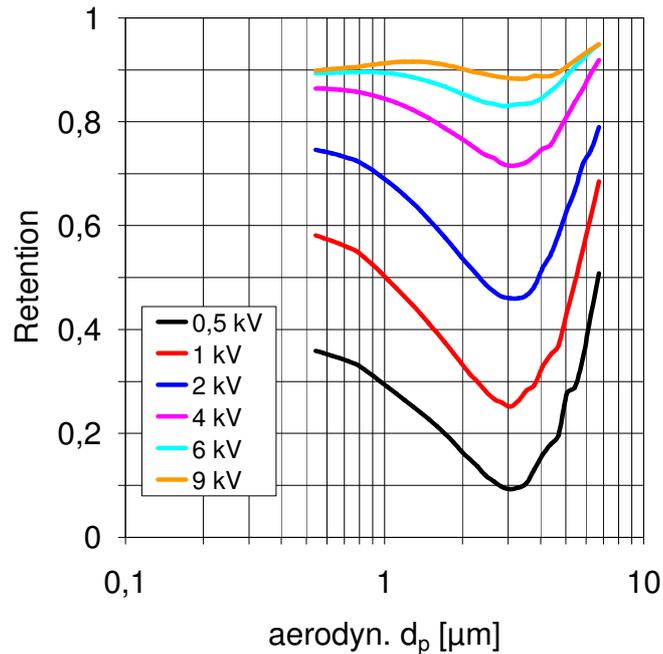


Abb. 6.8: Fraktionsabscheidegrad NaCl des E-Abscheiders

Für NaCl ergibt sich im Vergleich der normierten Anzahlverteilung bei ausgeschaltetem Elektroabscheider zur Verteilung bei einer Spannung von 9 kV keine relevante Verschiebung (siehe Abb. 6.9).

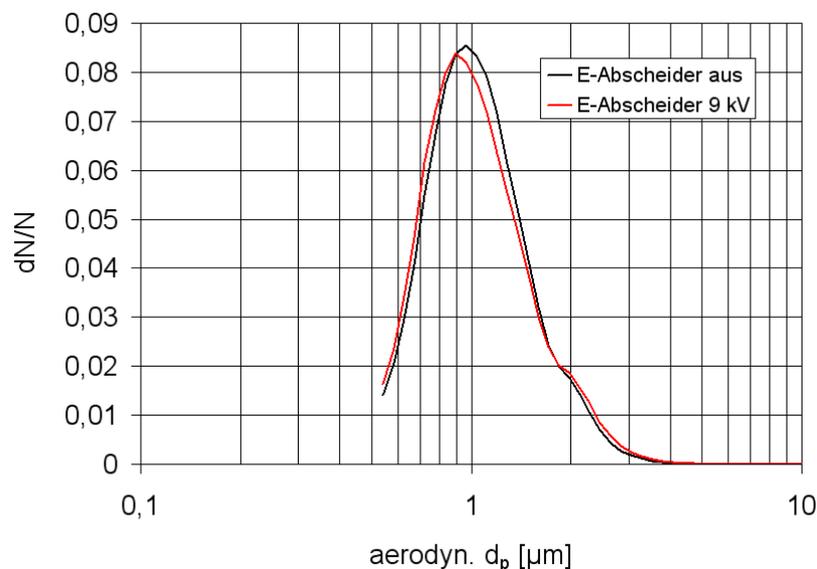


Abb. 6.9: NaCl normierte Anzahlverteilung mit u. ohne Spannung am E-Abscheider

Bei der Verwendung von DEHS (bereitgestellt mit einem Zerstäuber AGF 2.0, Fa. Palas) als Aerosol ergibt sich der in Abb. 6.10 gezeigte Verlauf der normierten Gesamtanzahlkonzentration über der angelegten Spannung am Elektroabscheider. Ein asymptotisches Verhalten hin zu einem Wert von 30 % der ursprünglichen Parti-

kel ist zu erkennen. Die Abnahme der normierten Gesamtanzahlkonzentration ist deutlich geringer als bei A2 und NaCl (vergl. Abb. 6.4 und Abb. 6.7).

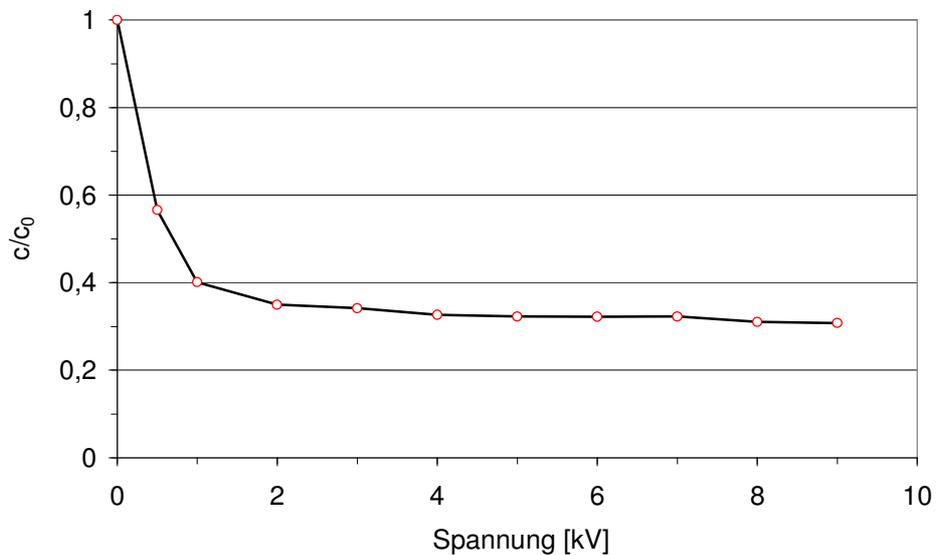


Abb. 6.10: Normierte Gesamtanzahlkonzentration DEHS als Funktion der Spannung am E-Abscheider

Der Fraktionsabscheidegrad am Elektroabscheider für DEHS wird in der folgenden Abb. 6.11 gezeigt. Die Kurven haben einen deutlich anderen Verlauf als bei A2 und auch als bei NaCl (vergl. Abb. 6.5 und Abb. 6.8). Die Abscheideeffizienz nimmt mit zunehmendem Durchmesser zu.

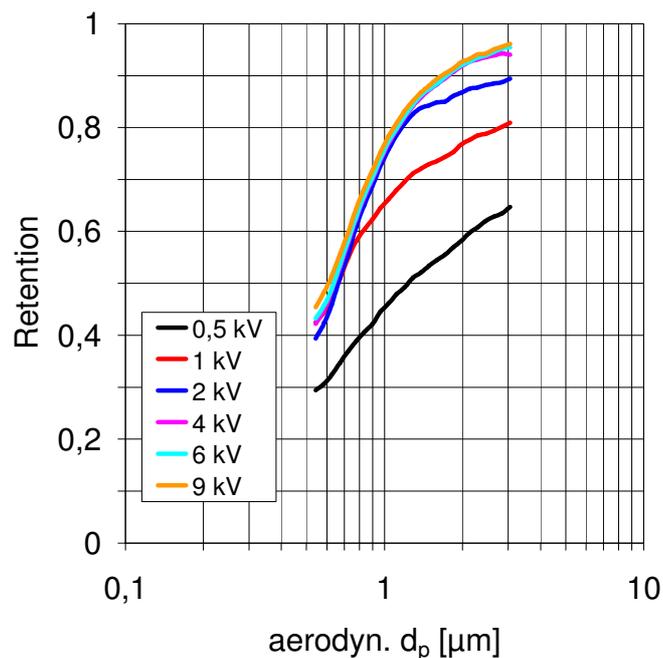


Abb. 6.11: Fraktionsabscheidegrad DEHS des E-Abscheiders

Aus der Gegenüberstellung der normierten Anzahlverteilung mit und ohne Spannung am elektrischen Abscheider (Abb. 6.12) für DEHS erkennt man, dass der Abscheider eine Verschiebung der Verteilung hin zu kleineren Partikeldurchmessern bewirkt.

In einem von außen aufgeprägten elektrischen Feld werden neben elektrisch geladenen Partikeln ggf. auch elektrisch neutrale Partikel elektrophoretisch transportiert. Das elektrische Feld bewirkt auf nach außen elektrisch neutralen Partikeln eine Ladungsverschiebung. Hat das Partikel einen ausreichend großen Durchmesser, so dass die durch die Polarisierung getrennten Ladungen einen ausreichend großen Abstand haben, erfolgt ein Transport im elektrischen Feld. Demzufolge werden in einem elektrischen Abscheider nicht nur geladene Partikel abgeschieden, sondern ggf. auch neutrale.

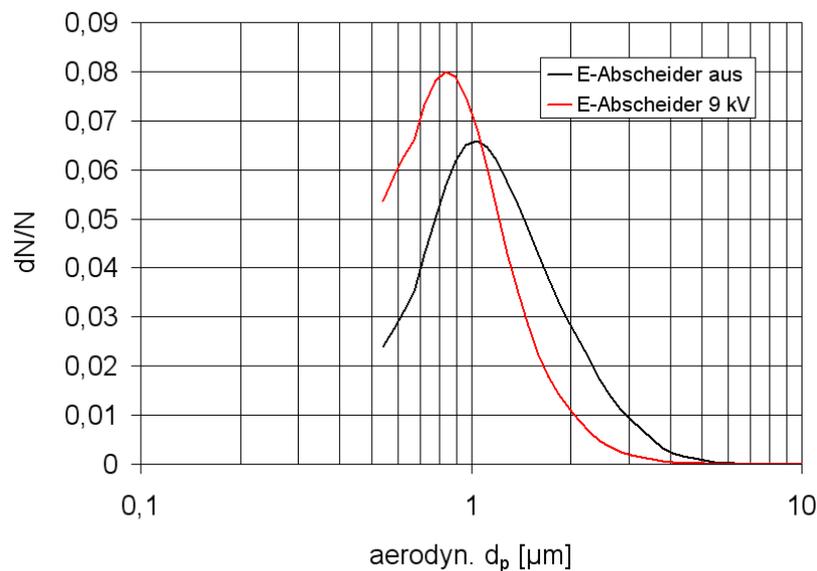


Abb. 6.12: DEHS normierte Anzahlverteilung mit u. ohne Spannung am E-Abscheider

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Abscheidecharakteristiken basieren auf einem Zusammenspiel von coulombscher und polarisationsbedingter Elektrophorese. Eine Abscheidung durch Polarisierung erhöht sich mit zunehmendem Partikeldurchmesser, während sich eine coulombsche Abscheidung in der Regel mit abnehmendem Durchmesser verbessert. Im Falle von DEHS (siehe Abb. 6.11) liegt die Hypothese nahe, dass die Abscheidung gänzlich durch den Polarisierungseffekt bedingt ist.

6.1.4 Untersuchungen zur Standzeit

Bis der theoretisch ausgelegte Abscheider zur Verfügung stand, wurden erste Experimente mit vorhandenen Elektroabscheider-Konstruktionen durchgeführt. Die vorhandenen Abscheider waren nicht für den hier beabsichtigten Anwendungsfall kon-

zipiert worden, wurden aber entsprechend angepasst und umfunktioniert. Die gesammelten Betriebserfahrungen sind in die konstruktive Ausgestaltung des endgültigen Abscheiders eingeflossen. Abb. 6.13 zeigt ein Foto einer dieser zu Beginn im Projekt verwendeten Konstruktionen. Auch dieser Abscheider war schon als koaxialer Zylinderkondensator ausgeführt, hatte aber eine geringere Länge und eine höhere Anzahl an Zwischenelektroden als die endgültige Konstruktion. Aufgrund der nicht optimalen Anströmung wurde das Aerosol nicht gleichmäßig auf die Ringspalte aufgeteilt. Bei einem Spaltmaß von ungefähr 3 mm führte dieses relativ schnell zu einem Zusetzen des Abscheiders. Ein für die Filterprüfung ausreichend langer stabiler Betrieb konnte daher mit dieser Konstruktion nicht realisiert werden, die Reinigungsintervalle waren zu kurz.



Abb. 6.13: Elektroabscheider-Konstruktion / Vorstadium

Die auf Basis des theoretischen Modells ausgelegte, endgültige Konstruktion ermöglicht ausreichende Standzeiten bei stabilem Betrieb. Bei Verwendung von DEHS als Prüfaerosol war ein stabiler Betrieb über viele Tage problemlos möglich. Die sich unten im senkrecht angeordneten Abscheider sammelnde Flüssigkeit kann durch eine entsprechende Drainage problemlos abgeführt werden.

Wurde NaCl als Prüfaerosol genutzt, war eine Reinigung nach ca. 2 bis 3 Tagen eines kontinuierlichen Messbetriebs notwendig. Die Abb. 6.14 und Abb. 6.15 zeigen den Abscheider nach Verwendung von NaCl. Zur Reinigung wurde die Mantelelektrode entfernt. Auf der äußeren Zwischenelektrode ist eine deutliche Abnahme der Beladung mit NaCl von der Anströmseite rechts zur Ausströmseite links zu erkennen (Abb. 6.14). Auf der Innenwandung der Mantelelektrode, auf der zweiten Zwischenelektrode und der Zentralelektrode stellt sich ein gleichartiger axialer

Verlauf der Partikelbeladung dar.



Abb. 6.14: E-Abscheider nach Verwendung von NaCl (ohne Mantelelektrode)

Auf den Elektroden bilden sich gleichartige Schichtdicken der abgeschiedenen Salzpartikel aus. Auf der zur Strömungsführung dienenden Halbkugel auf der Nabe sind im Staupunkt stärkere Partikelablagerungen (Abb. 6.15) zu erkennen. Hierbei handelt es sich um Partikelverluste durch Trägheitsabscheidung.



Abb. 6.15: E-Abscheider nach Verwendung von NaCl (Zwischenelektroden und Zentralelektrode mit Nabe)

Bei Verwendung von A2, welches als Aerosol mit einem Rotierenden-Bürsten-Aerosol-Generator bereit gestellt wurde, liegen hinter dem Elektroabscheider nur

noch ca. 1 % der ursprünglichen Partikel vor (siehe Abb. 6.4, S. 21). Die hochaufgeladenen A2-Partikel scheiden sich, bezogen auf die axiale Richtung im Abscheider, primär in vorderen Bereich auf der Anströmseite ab. Dieses ist im Vergleich zu NaCl deutlich ausgeprägter. Es kommt zu einem sehr viel schnelleren Anwachsen der Schichtdicken in diesem Bereich. Die Reinigungsintervalle verkürzen sich dadurch entsprechend. Effizienzmessungen an Filtern sind aber über die Dauer eines Mess-tages bei ausreichender Zählstatistik durchaus möglich.

Die Verwendung des Elektroabscheiders im Rahmen einer Beladungsprüfung mit der nach DIN 71460-1 vorgegebenen Partikelmassenkonzentration von 75 mg/m^3 ist zwar grundsätzlich möglich, aber aufgrund der zu kurzen Reinigungsintervalle nicht praktikabel.

6.1.5 Nutzung an unterschiedlichen Filterprüfständen

Der elektrische Abscheider wurde im Rahmen des Projektes am Kfz-Innenraumfilterprüfstand (DIN 71460-1), am Prüfstand für RLT-Filter (DIN EN 779) sowie an einem Medienprüfstand (MFP 1000, Fa. Palas) genutzt. Die jeweilige Prüfstandsperipherie wurde baulich und bezüglich der Betriebsparameter angepasst. Der Elektroabscheider wurde, wenn räumlich möglich, in einer senkrechten Anordnung betrieben. Bei der Anordnung zwischen der Aerosolbereitstellung und der Zudosierung in den Prüfkanal wurden möglichst kurze und gerade Zuleitungswege realisiert. Im Falle der Verwendung von NaCl als Aerosol mussten dabei aber Kompromisse eingegangen werden. Hinter dem Zerstäuber wurden mehrere Diffusionstrockner eingesetzt, um eine vollständige Trocknung sicherzustellen. Im Rahmen der Reihenschaltung der Komponenten im Zudosierungsstrang ließen sich dabei die kurzen Zuleitungswege nicht immer bewerkstelligen.

6.1.6 Zwischenfazit

Mit dem Elektroabscheider ist es bei gegebener Geometrie und bekanntem Volumenstrom möglich, durch die Wahl der angelegten Spannung elektrisch mobile Partikel definiert abzutrennen. Bei ausreichend großer Verweilzeit ist es theoretisch auch möglich, jegliche elektrisch mobilen Partikel abzuscheiden. Ausgehend vom unbekanntem Ladungszustand nach der Aerosolbereitstellung erfolgt durch Verwendung des Elektroabscheiders eine Überführung in einen definierten Ladungszustand.

Die Funktionstests zeigten, dass die Partikelgrößenverteilungen der verwendeten Aerosole A2, NaCl und DEHS durch die Abscheidung der elektrisch mobilen Partikel

je nach Aerosol geringfügige Änderungen erfahren (Abb. 6.6, Abb. 6.9, Abb. 6.12). Diese Verschiebungen sind für die Effizienzmessungen im Rahmen der Filterprüfung jedoch nicht relevant.

Die Veränderung der Gesamtanzahlkonzentration (Abb. 6.4, Abb. 6.7 und Abb. 6.10) und die Kurvencharakteristik der Fraktionsabscheidegrade (Abb. 6.5, Abb. 6.8 und Abb. 6.11) bei Einsatz des Elektroabscheiders unterscheiden sich für die einzelnen Aerosole deutlich.

Im Falle der Verwendung von DEHS kann bei höheren Spannungen im kV-Bereich am Elektroabscheider ca. 30 % der ursprünglichen Partikel für eine Filterprüfung genutzt werden. Die restlichen 70 % der Partikel werden nicht zwangsläufig aufgrund ihrer Ladung durch einen coulombschen elektrophoretischen Effekt abgeschieden. Die Fraktionsabscheidegrade für DEHS zeigen, dass die Abscheidung im elektrischen Abscheider umso größer ist, je größer der Partikeldurchmesser ist. Im Falle einer Abscheidung neutraler Partikel durch einen polarisationsbedingten Effekt ist genau dieses gegeben. Je größer der Abstand voneinander durch Ladungsverschiebung getrennter Ladungen auf dem Partikel ist, desto ausgeprägter macht sich dieser Effekt bemerkbar.

Eine Abscheidung aufgrund des Polarisierungseffektes ist vermutlich auch für den Anstieg der Effizienz bei Verwendung von NaCl ab einem aerodynamischen Durchmesser von 3 μm verantwortlich (siehe Abb. 6.8). Der ebenfalls zu verzeichnende Anstieg hin zu kleineren Partikeldurchmessern resultiert aus einem coulombschen Transport der Partikel.

Da es bei Verwendung des E-Abscheiders für A2 zu einer geringfügigen Abreicherung an größeren Partikeln ($> \text{ca. } 1,5 \mu\text{m}$) kommt (s. Abb. 6.6), könnte dies im Rahmen einer Beladungsprüfung an einem Filter gegebenenfalls zu einem anderen Druckverlustverlauf führen. Für die Effizienzmessung ist die Verschiebung der Größenverteilung irrelevant, da es hierbei lediglich darauf ankommt, dass in den jeweiligen Größenklassen eine ausreichende Partikelanzahl für eine belastbare Statistik vorliegt.

6.2 Effizienzmessungen mit A2, NaCl, DEHS

In diesem Abschnitt werden für die drei betrachteten Aerosole A2, NaCl und DEHS Fraktionsabscheidegrade vergleichend gegenübergestellt, die an einem exemplarischen Elektretmedium ermittelt wurden. Die mittlere Anströmgeschwindigkeit bei den Messungen betrug 0,2 m/s. Gleiche Betrachtungen wurden auch mit anderen Anströmgeschwindigkeiten angestellt. Dabei stellten sich zwar erwartungsgemäß

quantitativ andere Ergebnisse dar, im Vergleich der drei Prüfaerosole hat sich qualitativ jedoch immer ein ähnliches Bild ergeben.

Die A2-, NaCl- und DEHS-Partikel unterscheiden sich hinsichtlich einer ganzen Reihe von Eigenschaften (Aggregatzustand, Morphologie, etc.). Im Rahmen der Aerosolmesstechnik werden Partikeldurchmesser im Sinne von Kugeläquivalenten quantifiziert. Wenn Fraktionsabscheidegrade, die mit unterschiedlichen Aerosolen ermittelt werden, miteinander verglichen werden sollen, ist es wichtig zu beachten, welcher Äquivalentdurchmesser für den Vergleich herangezogen wird. Man kann einen optischen, einen geometrischen oder einen aerodynamischen Durchmesser zu Grunde legen. Im Hinblick auf die Filtration ist der zum Vergleich der unterschiedlichen Prüfaerosole sinnvoll zu wählende Äquivalentdurchmesser abhängig vom dominierenden Abscheidemechanismus. Für die Diffusionsabscheidung, die Abscheidung durch Interzeption und auch die Abscheidung durch Elektrophorese sollte der geometrische Äquivalentdurchmesser gewählt werden, weil dieser für die Transportprozesse bzw. die Abscheidung maßgeblich ist. Im Falle einer dominierenden Impaktionsabscheidung ist es aufgrund der unterschiedlichen Dichte des Partikelmaterials der verschiedenen Aerosole sinnvoll, den Vergleich auf Basis des aerodynamischen Äquivalentdurchmessers anzustellen.

Die in den beiden folgenden Abschnitten 6.2.1 und 6.2.2 vorgestellten Messergebnisse basieren alle auf mindestens drei Wiederholungsmessungen. Dargestellt ist der Mittelwert, auf Fehlerbalken wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Die Streuung der Messergebnisse an den Medienproben ist nicht zuletzt aufgrund struktureller und elektrostatischer Inhomogenitäten teilweise in der Größenordnung von bis zu ± 10 Prozentpunkten Retention angesiedelt.

6.2.1 Messungen am unbehandelten Elektretmedium

Abb. 6.16 zeigt den Fraktionsabscheidegrad im Vergleich der drei Prüfaerosole in ihrem jeweiligen generierungsbedingten Ladungszustand (schwarze Kurven) und bei Verwendung des Elektroabscheiders (definierte Begrenzung der elektrischen Mobilität der Partikel / blaue Kurven).

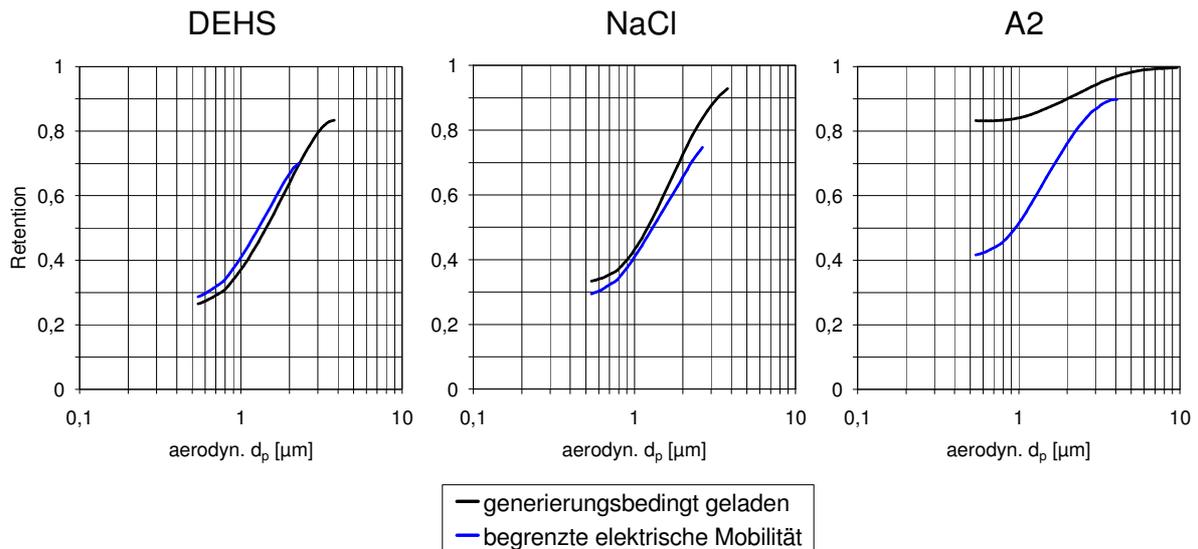


Abb. 6.16: Fraktionsabscheidegrade DEHS, NaCl, A2 am unbehandelten Elektretmedium

Während die Effizienzen bei DEHS und NaCl durch Einsatz des Elektroabscheiders keine signifikante Veränderung erfahren, wird für A2 bei Verwendung des Elektroabscheiders eine deutlich geringere Effizienz gemessen als im generierungsbedingten Ladungszustand. Die Effizienzen für DEHS und NaCl weisen im betrachteten Beispiel auch ohne Verwendung des Elektroabscheiders schon eine akzeptable Übereinstimmung zueinander auf. Die A2-Effizienz zeigt erst mit der Verwendung des Elektroabscheiders eine vergleichbare Abscheidecharakteristik wie bei den anderen beiden Aerosolen.

Die Unterschiede, die zwischen den Fraktionsabscheidegraden von DEHS und NaCl jeweils im generierungsbedingten Ladungszustand und im Zustand nach Begrenzung der elektrischen Mobilität sowie von A2 nach Begrenzung der elektrischen Mobilität noch bestehen, liegen im Bereich der Streuung der Messergebnisse.

6.2.2 Messungen am isopropanolbehandelten Elektretmedium

Abb. 6.17 zeigt den Fraktionsabscheidegrad im Vergleich der drei Prüfaerosole nach einer Behandlung des Elektretmediums mit Isopropanol. Die Effizienzen für DEHS und NaCl stimmen jeweils im generierungsbedingten Ladungszustand (rote Kurven) und unter Verwendung des elektrischen Abscheiders zur definierten Begrenzung der elektrischen Mobilität (grüne Kurven) im Rahmen der Streuung der Ergebnisse miteinander überein. Darüber hinaus zeigen DEHS und NaCl auch untereinander eine gute Übereinstimmung. Die A2-Effizienz ist auch am Elektretmedium, dem durch die Behandlung mit Isopropanol seine Elektretwirkung genommen wurde, zu DEHS und NaCl erst vergleichbar, wenn A2 mit begrenzter elektrischer Mobilität vorliegt. Wenn A2 im generierungsbedingten Ladungszustand verwendet wird (rote Kurve des

rechten Diagramms), liegt der gezeigte Mittelwert des Fraktionsabscheidegrades höher. Wie schon dargestellt, können die hochaufgeladenen A2-Partikel zu Spiegel-
ladungen auf den Filterfasern führen, und demzufolge kann ein elektrophoretischer
Abscheidebeitrag resultieren, obwohl das Filtermedium durch die Isopropanol-
behandlung elektrisch neutralisiert worden ist.

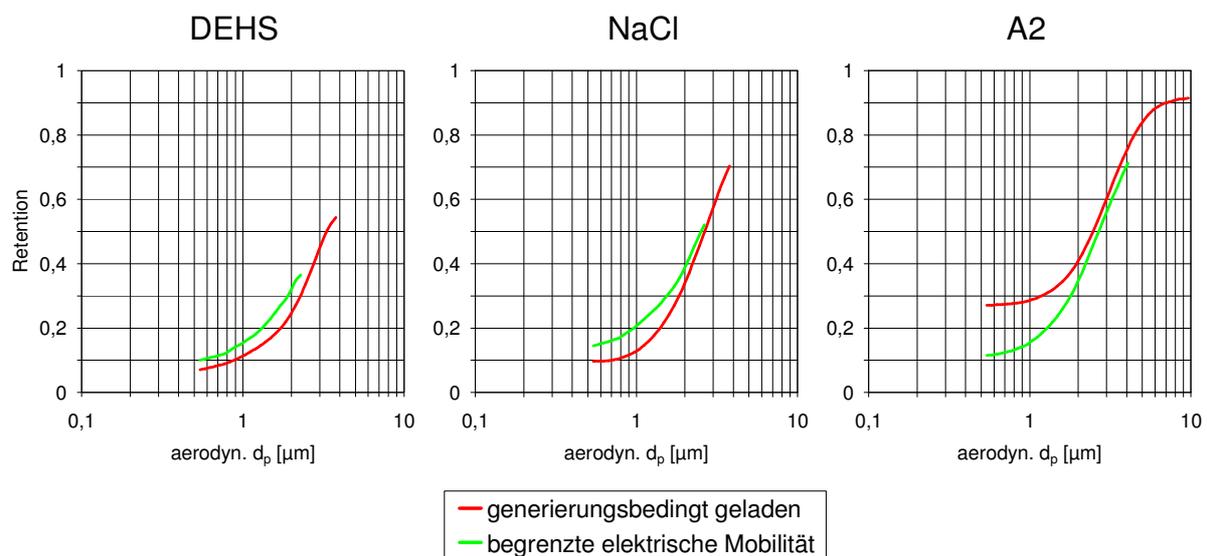


Abb. 6.17: Fraktionsabscheidegrade DEHS, NaCl, A2 am isopropanolbehandelten Elektretmedium

6.2.3 Zwischenfazit

Die Abscheidung im betrachteten Partikeldurchmesserbereich wird in den vorliegenden Fallbeispielen der Abschnitte 6.2.1 und 6.2.2 hinsichtlich der mechanischen Abscheidemechanismen von der Impaktion dominiert.

Im Fall des unbehandelten Elektretmediums kommt es in Addition zu einer polarisationsbedingten elektrophoretischen Abscheidung neutraler Partikel. Geladene Partikel werden darüber hinaus durch den Transportprozess aufgrund der Coulombkraft abgeschieden.

Das im Vergleich zu den anderen Effizienzkurven hohe Retentionsniveau von A2 im generierungsbedingten Ladungszustand (Abb. 6.16) ist durch die coulombsche Abscheidung zu erklären. Erst bei Verwendung des elektrischen Abscheiders und einer deutlichen Reduktion der elektrischen Mobilität der A2-Partikel ist auch für A2 die Abscheidung maßgeblich nur noch durch Impaktion und den Polarisierungseffekt gegeben.

Im Falle des isopropanolbehandelten Mediums kann es nur im Falle eines sehr hoch aufgeladenen Aerosols zu einer Überlagerung der Impaktion mit einem elektro-

retischen Abscheidebeitrag kommen. Die Abscheidung aufgrund von Coulombkraft und Polarisierungseffekt ist ausgeschlossen, weil das Filtermedium vorher elektrisch neutralisiert worden ist. Eine zusätzliche elektrophoretische Abscheidung kann sich daher nur aufgrund des Spiegelladungseffektes ergeben. Dies ist lediglich für A2 im generierungsbedingten Ladungszustand (Abb. 6.17) der Fall.

In den Abb. 6.16 und Abb. 6.17 wurde der aerodynamische Äquivalentdurchmesser gewählt. Dieser ist, wie bereits erwähnt, zwar im Hinblick auf die Impaktion der richtige Vergleichsmaßstab für die Beurteilung der drei unterschiedlichen Aerosole, jedoch nicht für den überlagerten Polarisierungseffekt. Hier wäre der geometrische Äquivalentdurchmesser der sinnvollere Vergleichsmaßstab, weil es auf den Abstand der voneinander getrennten Ladungen ankommt. Ferner stellt sich zum Polarisierungseffekt noch die Frage, wie gut die jeweiligen Partikelmaterialien polarisierbar sind. Auch wenn der coulombsche elektrophoretische Abscheidebeitrag für den betrachteten Partikeldurchmesserbereich noch von Relevanz ist (A2 im generierungsbedingten Ladungszustand), wäre der geometrische Äquivalentdurchmesser für diesen isolierten Effekt der sinnvollere Vergleichsmaßstab.

Obige Ausführungen veranschaulichen, dass es nicht trivial ist, Fraktionsabscheidegrade, die mit unterschiedlichen Prüfaerosolen ermittelt worden sind, nach objektiven Maßstäben einander gegenüber zustellen. Es konnte aber dennoch gezeigt werden, dass die Ergebnisse in guter Näherung korrespondieren, wenn ein definierter Ladungszustand eingestellt wird.

Die vorgestellten Ergebnisse wurden an einem Elektretmedium bei einer mittleren Anströmgeschwindigkeit von 0,2 m/s ermittelt. Gleiche Betrachtungen wurden auch mit anderen Anströmgeschwindigkeiten angestellt. Im Vergleich der drei Prüfaerosole hat sich qualitativ zwar immer ein ähnliches Bild ergeben, die Gewichtung zwischen den unterschiedlichen Abscheidemechanismen verschiebt sich jedoch in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit bzw. der Verweilzeit. Auch das gesamte Abscheideniveau wird natürlich beeinflusst.

Die Abscheidung durch Interzeption ist generell unabhängig von der Anströmgeschwindigkeit. Sie ist aber bei den betrachteten Medien und Randbedingungen von untergeordneter Bedeutung. Der Impaktionsanteil ist bei höheren Anströmgeschwindigkeiten etwas ausgeprägter und fällt bei kleineren Geschwindigkeiten geringer aus. Die Diffusionsabscheidung ist im bisher betrachteten Durchmesserbereich nicht von Relevanz, aber naturgemäß verweilzeitabhängig. Ebenso sind auch alle drei Varianten der elektrophoretischen Abscheidung verweilzeitabhängig.

Bei Verwendung von Elektretmedien mit hoher elektrostatischer Aufladung wurde bei geringeren Anströmgeschwindigkeiten (z. B. 0,05 m/s) und resultierenden höheren Verweilzeiten beobachtet, dass die mit NaCl im generierungsbedingten Ladungs-

zustand ermittelten Fraktionsabscheidegrade am unbehandelten Medium deutlich höher waren als die bei Verwendung von NaCl mit reduzierter elektrischer Mobilität. Bei DEHS hat sich hingegen stets der gleiche Fraktionsabscheidegrad ergeben, unabhängig davon, ob es im generierungsbedingten Ladungszustand verwendet, oder der elektrische Abscheider eingesetzt wurde. Im Falle des isopropanolbehandelten Mediums war es sowohl für DEHS als auch für NaCl irrelevant, in welchem der beiden Ladungszustände die Aerosole verwendet wurden.

Während bei DEHS und den individuellen Gegebenheiten der im Projekt gewählten Bereitstellung der Einsatz des Elektroabscheiders nicht unbedingt nötig zu sein scheint, ist es sowohl für NaCl als auch für A2 sinnvoll, den Elektroabscheider einzusetzen, um einen definierten Ladungszustand zu erzielen.

6.3 Untersuchungen an klimabehandelten und beladenen Filtern

Im Abschnitt 6.3.1 wird als mögliche Alternativmethode zur Neutralisierung von Elektretmedien eine Konditionierung mit höheren Temperaturen und Feuchten betrachtet. Als Referenz im Hinblick auf eine erfolgreiche Neutralisierung dient der Zustand nach einer Isopropanolbehandlung.

Im Abschnitt 6.3.2 wird die Auswirkungen einer Beladung der Filter mit Außenluft bzw. Dieselruß auf die Effizienz dargestellt.

Zur Beurteilung der von einem Filter ausgehenden Elektretwirkung wird zunächst das makroskopische elektrische Potential mittels eines Feldstärkenmessgerätes der Fa. Simco gemessen. Dieses makroskopische elektrische Potential repräsentiert zwar nicht in adäquater Form das im Nahbereich einer Filterfaser auf Partikel wirkende mikroskopische elektrische Feld. Die Erfassung des makroskopischen Potentials wird jedoch zur qualitativen Beurteilung der Elektretwirkung genutzt.

Abb. 6.18 zeigt ein Beispiel für das makroskopische elektrische Potential an einem Zuschnitt eines Elektretmediums. In diesem Fall erkennt man an- und abströmseitig vom Medium die qualitativ gleiche Topographie des Potentials. Bei anderen Elektretmedien kann sich an der An- und Abströmseite eine unterschiedliche Topographie darstellen. Schon das einfache Hantieren mit den Medienzuschnitten kann das elektrische Potential durch triboelektrische Effekte gänzlich verändern.

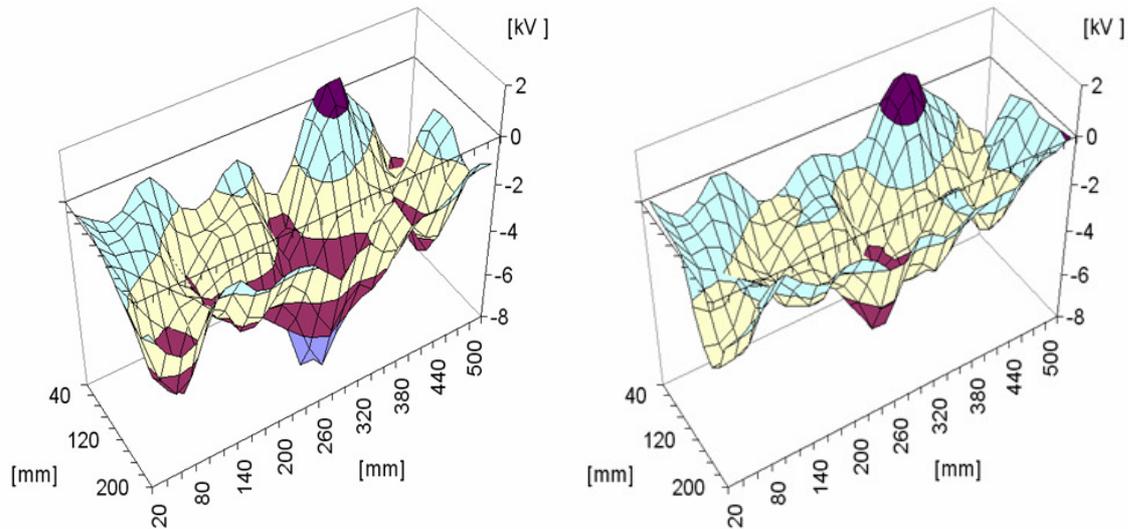


Abb. 6.18: Makroskopisches elektrisches Potential / an- und abströmseitig an einem Zuschnitt eines Elektretmediums

6.3.1 Klimabehandelte Filter

Zur Untersuchung, in wie weit eine klimatische Konditionierung eine elektrische Neutralisierung und damit eine Reduktion der Effizienz von Elektretfiltern bewirken kann, wurden sowohl Filter als auch Medienzuschnitte aus dem Anwendungsbereich Kfz-Innenraumfilter betrachtet. Die Klimabehandlung erfolgte in den Varianten ohne Durchströmung in einem Klimaschrank und mit Durchströmung unmittelbar im PrüfkanaI nach DIN 71460. Wie sich gezeigt hat, dauerte es bei gleichen Temperaturen und relativen Feuchten im Falle ohne Durchströmung deutlich länger, bis sich ein vergleichbarer Gleichgewichtszustand gegenüber der Variante mit Durchströmung mit einer anschließenden Ruhephase eingestellt hat.

Daher werden im Folgenden nur Ergebnisse der Klimabehandlung mit Durchströmung im PrüfkanaI vorgestellt.

Abb. 6.19 zeigt das makroskopische elektrische Potential vor Beginn einer Klimabehandlung an einem Zuschnitt eines Elektretmediums.

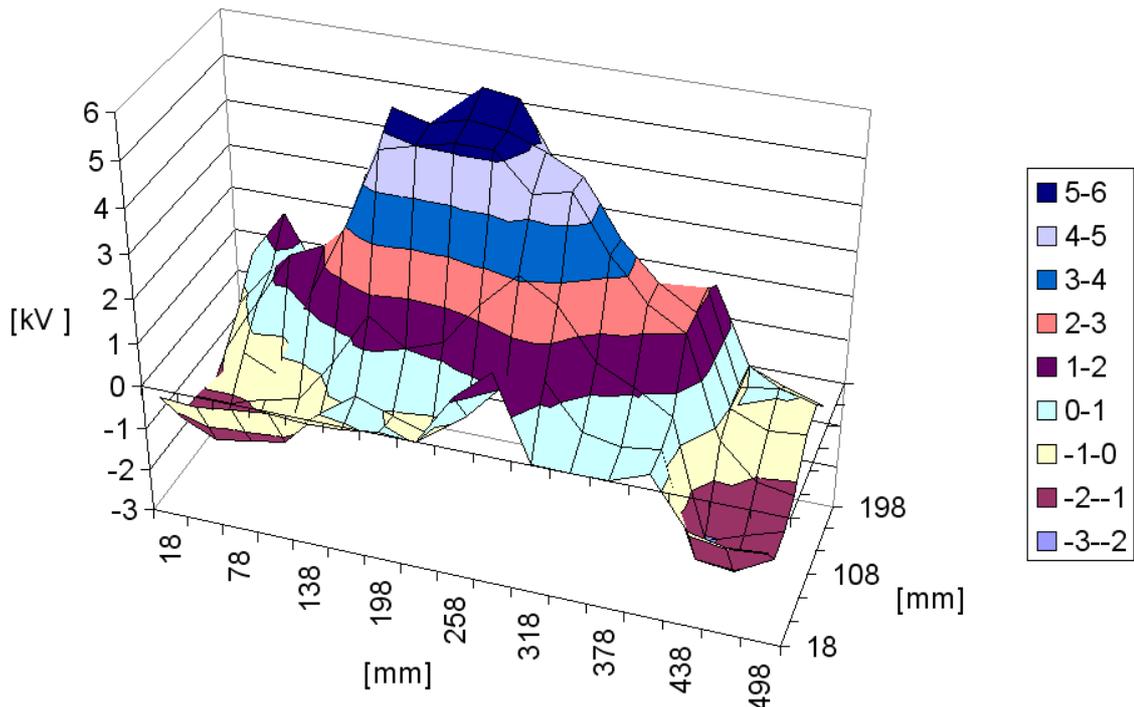


Abb. 6.19: Makroskopisches elektrisches Potential vor Klimabehandlung

Nach einer einstündigen Klimabehandlung bei einer Temperatur von 50 °C und einer relativen Luftfeuchte von 75 % bei einer mittleren Gasgeschwindigkeit von 0,2 m/s stellt sich das in Abb. 6.20 gezeigte elektrische Potential dar. Gegenüber dem Ursprungszustand stellt man eine deutliche Reduktion fest. Eine längere Dauer der klimatischen Konditionierung mit Durchströmung führt, wie durchgeführte Messungen gezeigt haben, nicht zu einer stärkeren Reduktion des elektrischen Potentials. Erfährt das Medium im Anschluss bei reduzierter Temperatur und Feuchte ($T = 23 \text{ °C}$ und $r. F. = 50 \%$; entspricht den Bedingungen bei der späteren Effizienzmessung) eine Ruhephase von einigen Stunden ohne Durchströmung, erfolgt eine weitere Reduktion des makroskopischen Potentials (Abb. 6.21). Es ist aber immer noch ein elektrisches Potential vorhanden.

Eine Isopropanolbehandlung hingegen führt unmittelbar zu einer kompletten Neutralisierung des Elektretfilters. Es ist kein elektrisches Potential mehr messbar. Dieses ist sowohl in einem noch benetzten Zustand als auch nach einer ausreichend langen Trocknungszeit der Fall.

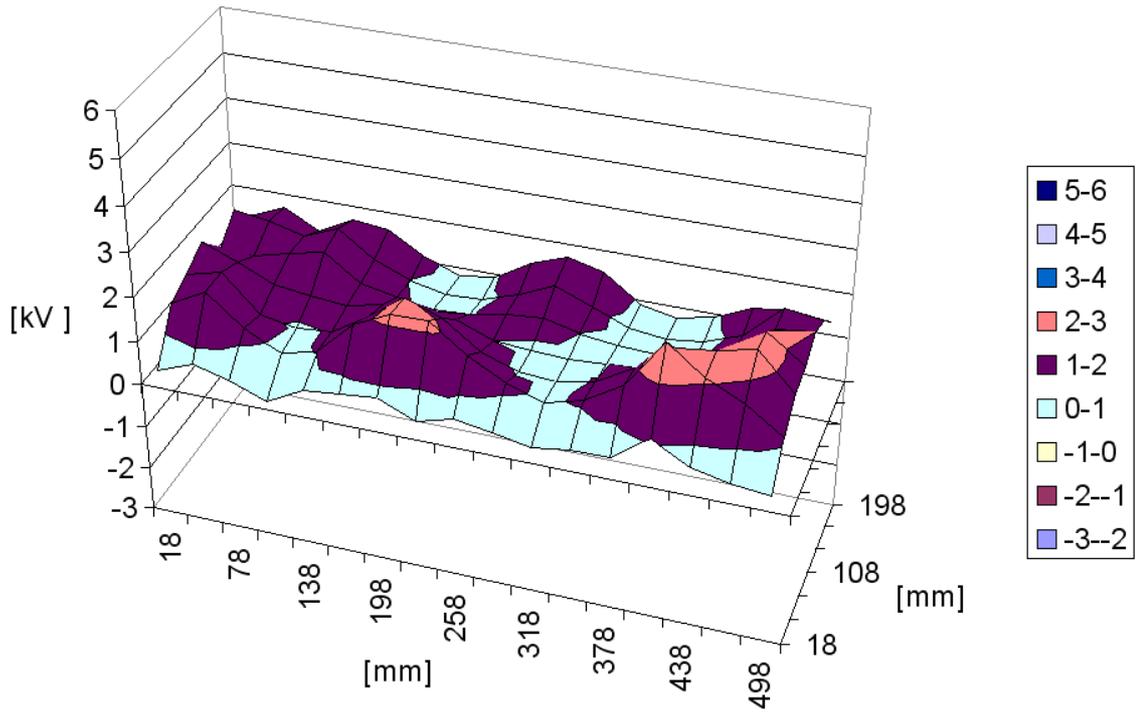


Abb. 6.20: Makroskopisches elektrisches Potential nach Klimabehandlung

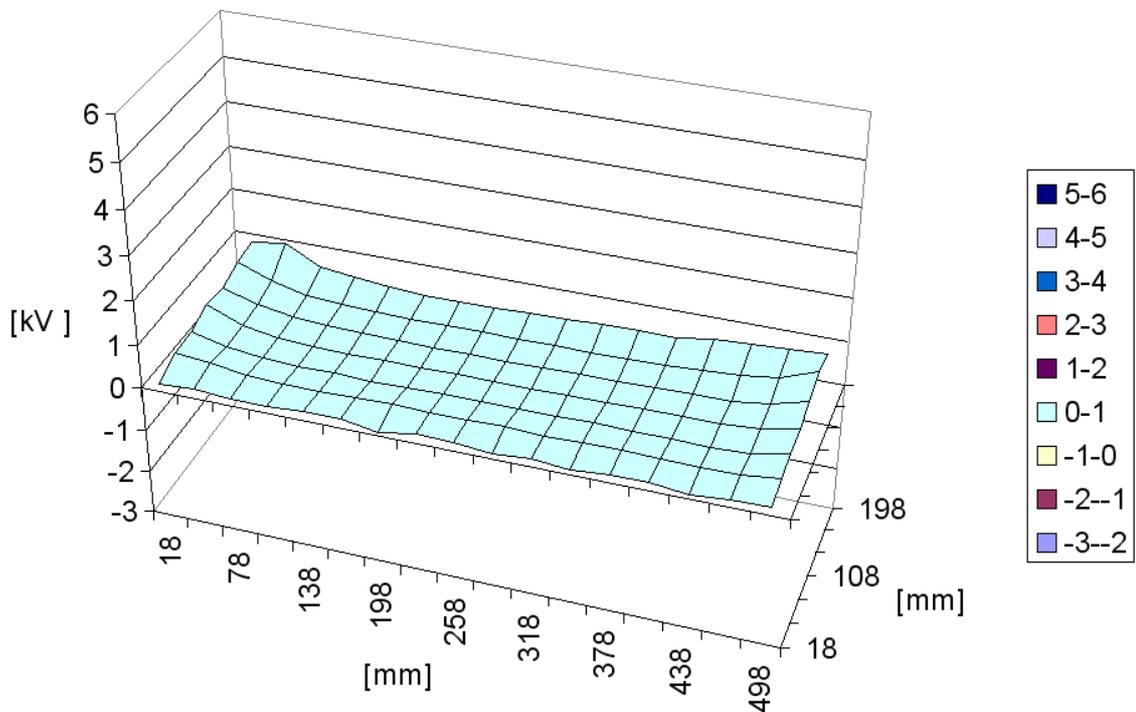


Abb. 6.21: Makroskopisches elektrisches Potential nach Ruhephase

Einen Vergleich der Fraktionsabscheidegrade mit A2 für ein unbehandeltes, klimabehandeltes und isopropanolbehandeltes Elektretmedium zeigt Abb. 6.22. In Abb. 6.23 wird selbiges für das Aerosol NaCl dargestellt. Eine effizienzreduzierende Wirkung der Klimabehandlung ist in beiden Fällen zu verzeichnen, die Reduktion der Effizienz ist jedoch geringer als im isopropanolbehandelten Fall.

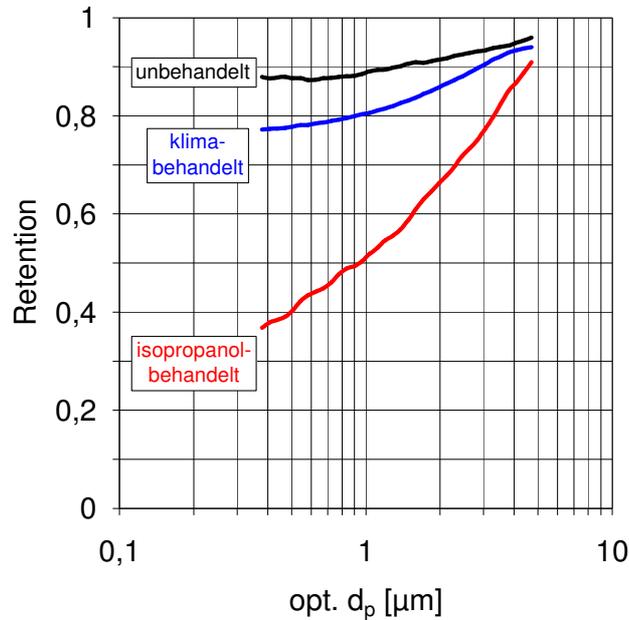


Abb. 6.22: Fraktionsabscheidegrade A2 (unbehandeltes, klimabehandeltes und isopropanolbehandeltes Medium)

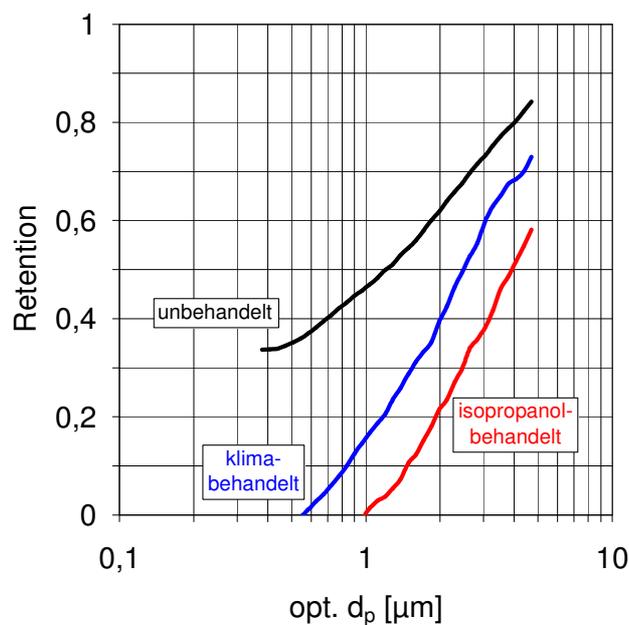


Abb. 6.23: Fraktionsabscheidegrade NaCl (unbehandeltes, klimabehandeltes und isopropanolbehandeltes Medium)

6.3.2 Außenluft- und dieselrußbeladene Filter

Bei unter definierten Prüfbedingungen ermittelten Filtereffizienzen stellt sich die grundsätzliche Frage, wie repräsentativ sie für den realen Filtereinsatz sind. Ergebnisse, die im Rahmen von Feldmessungen bei Beaufschlagung mit Außenluft zu erzielen sind, unterliegen aufgrund der instationären Gegebenheiten einer großen Streuung [9]. Es kann daher eine sinnvolle Vorgehensweise sein, beide Betrachtungsmethoden dadurch miteinander zu kombinieren, dass man lediglich die Auswirkungen einer Realbeladung unter definierten Bedingungen im Labor untersucht.

Im Straßenverkehr im urbanen Raum ist Dieselruß ein relevanter Bestandteil der Außenluft, mit der Filter beaufschlagt werden. Um zu ermitteln, ob eine gezielte Beaufschlagung von Filtern mit dieselmotorischen Emissionen vergleichbare Auswirkungen auf die Filtrationseigenschaft hat wie eine Beladung mit Außenluft, werden beide Beladungsmethoden untersucht.

In den folgenden Abschnitten werden Ergebnisse für Kfz-Innenraumfilter bzw. -medien und Ergebnisse für RLT-Filter hierzu vorgestellt.

6.3.2.1 Kfz-Innenraumfilter

Außenluftbeladung

Zunächst wurde an Medienproben die Entwicklung der DEHS-Effizienz bei zunehmender Beladung mit Außenluft betrachtet. Die Beladung erfolgte im ortsfesten Betrieb durch Ansaugung städtischer Außenluft im Nahbereich einer Straße. Die dergestalt gealterten Medienzuschnitte wurden nach unterschiedlichen Zeiten der Durchströmung, beginnend bei 8 Stunden bis hin zu 230 Stunden, der Messung des Fraktionsabscheidegrades unterzogen. Das DEHS-Aerosol befand sich dabei im generierungsbedingt neutralen Zustand. Die Außenluftbeladung hat in den gewählten Zeitschritten keinen nennenswerten Druckverlust- und Massenanstieg der Medienproben hervorgerufen.

Bei der Messung des Fraktionsabscheidegrades wurde ein aerodynamischer Partikelzähler und Größenanalysator (APS 3321, Fa. TSI) eingesetzt, abgebildet wird der Partikeldurchmesserbereich größer 500 nm. Darüber hinaus kam ein FMPS zur Abbildung des submikronen Partikelgrößenbereichs zum Einsatz. Für die Gegenüberstellung wurde der geometrische Äquivalentdurchmesser gewählt. Die Kurven in Abb. 6.24 wurden auf die jeweiligen statistisch relevanten Bereiche beschnitten. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden von den Effizienzen in unterschiedlichen Beladungsstadien lediglich zwei gezeigt. Als Referenz sind sowohl der Anfangsabscheidegrad am neuen Medium als auch der am isopropanolbehandelten dargestellt. Sämtliche Effizienzkurven der Medien in den unterschiedlichen Beladungsstadien

liegen zwischen der Effizienz im Neuzustand und der nach Isopropanolbehandlung.

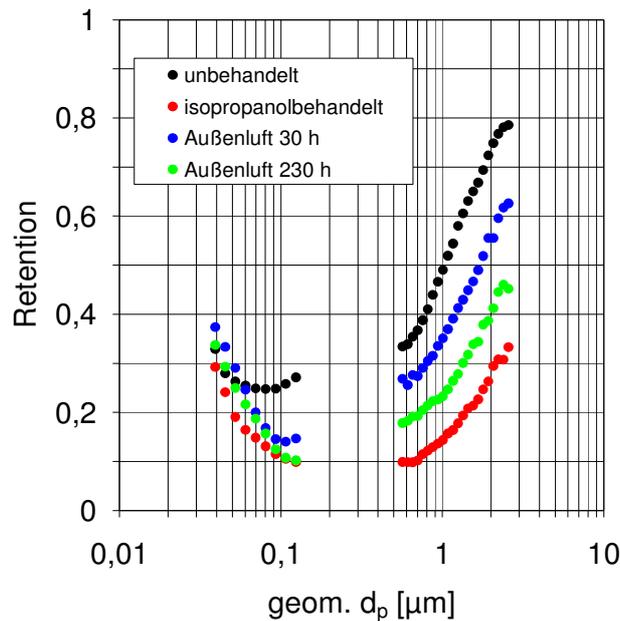


Abb. 6.24: Fraktionsabscheidegrade DEHS (unbehandeltes, außenluftbeladenes und isopropanolbehandeltes Medium)

Dieselfußbeladung

In Abb. 6.25 werden für einen exemplarischen Kfz-Innenraumfilter Fraktionsabscheidegrade im Neuzustand des Filters mit denen nach einer Dieselfußvorbeladung verglichen. Das linke Diagramm zeigt die Messergebnisse unter Verwendung von A2 als Prüfaerosol, das rechte Diagramm zeigt diejenigen für NaCl.

Der Anfangsabscheidegrad wird jeweils durch die schwarzen Kurven abgebildet. Die Filtereffizienzen nach einer Beladung des Filters mit Dieselfuß bis zu einem Druckverlustanstieg von 50 Pa werden durch die farbigen Kurven dargestellt. Die Dieselfußbeladung führt zu einer ausgeprägten Reduktion des Abscheidevermögens. Bei Verwendung von A2 als Prüfaerosol liegt für Partikeldurchmesser $< 1 \mu\text{m}$ die Effizienz in der Größenordnung von 60 bis 80 Prozentpunkten unter der Anfangseffizienz, für NaCl liegt die Reduktion bei ca. 60 Prozentpunkten.

Bei Verwendung von NaCl als Prüfaerosol liegen die Filtereffizienzen aufgrund der geringeren Ladung erwartungsgemäß insgesamt auf einem niedrigeren Niveau.

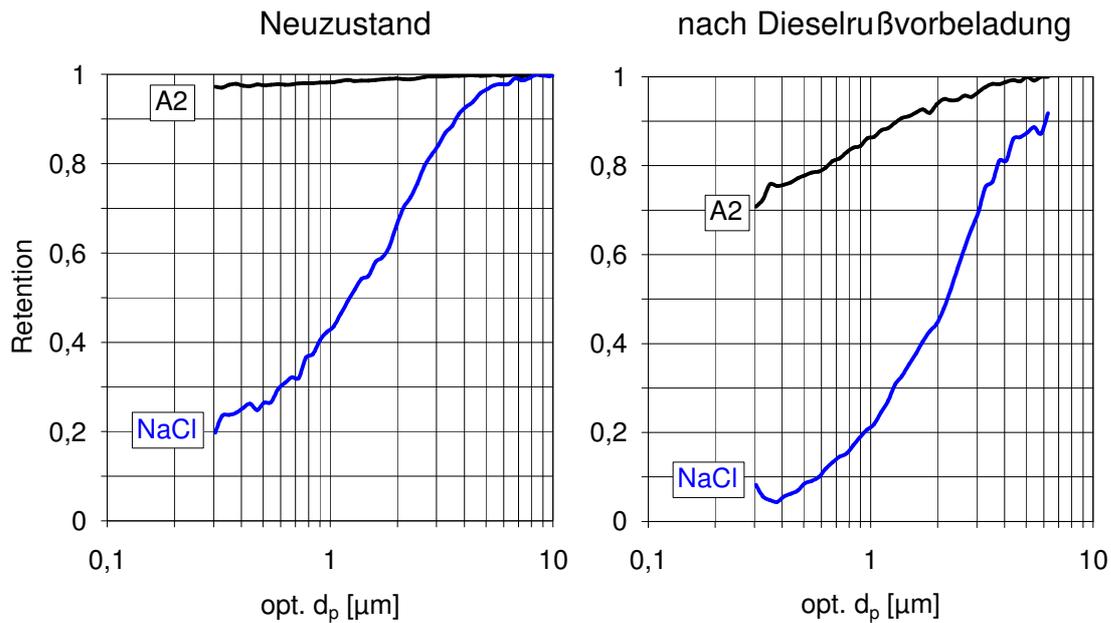


Abb. 6.25: Fraktionsabscheidegrade A2 und NaCl im Neuzustand und nach Dieselrußvorbelastung

In der Abfolge der Abb. 6.26 und Abb. 6.27 werden Ergebnisse dargestellt, bei denen wiederum Dieselruß zum Zwecke der Vorbelastung eingesetzt wurde. Darüber hinaus wurde Dieselruß auch als Prüfaerosol verwendet. Die Dieselrußagglomerate weisen einen Modaldurchmesser von ungefähr 100 nm auf. Für die Fraktionsabscheidegradmessung mit Dieselruß wurde ein SMPS-System eingesetzt.

Abb. 6.26 zeigt zunächst den Vergleich der Dieselruß-, der A2- und der NaCl-Effizienz für den Filter im Neuzustand. Der elektrische Mobilitäts-Äquivalenzdurchmesser der SMPS-Messung und der optische Latex-Äquivalenzdurchmesser der WELAS-Messung werden einander bewusst ohne Korrekturen gegenüber gestellt. Während die Verwendung von A2 im generierungsbedingten Ladungszustand zu Effizienzen führt, die auf einem überproportionalen elektrophoretischen Beitrag basieren, liegt die NaCl-Effizienz auf einem realistischerem Niveau deutlich darunter. Die Rußeffizienz im Durchmesserbereich unter 300 nm liegt auf einem korrespondierenden Effizienzniveau, wie die für NaCl.

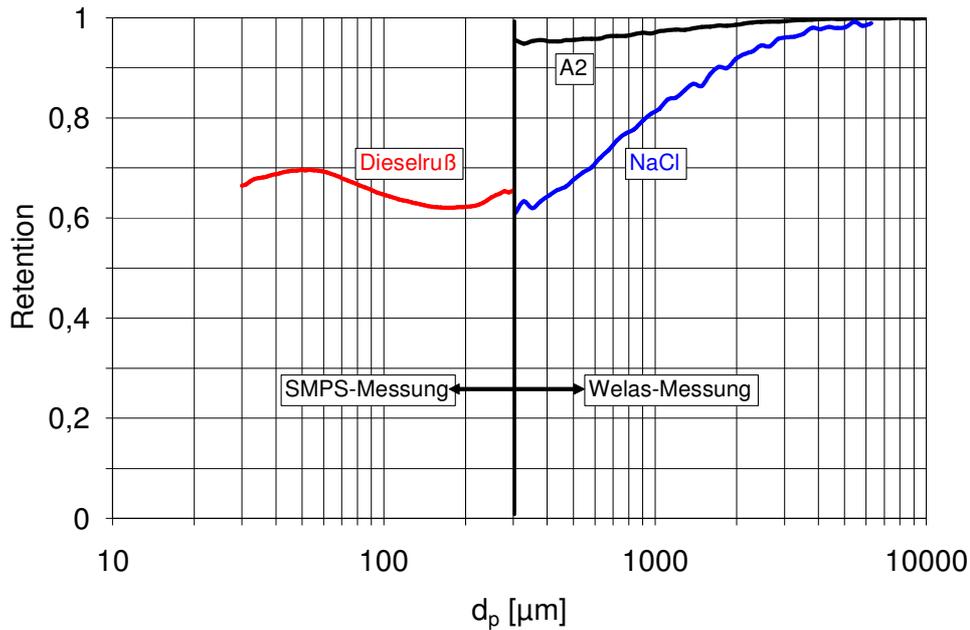


Abb. 6.26: Fraktionsabscheidegrade A2, NaCl und Dieselruß im Neuzustand des Filters

Abb. 6.27 zeigt den Vergleich der drei verwendeten Prüfaerosole am selben Filtertyp, nachdem dieser eine Dieselrußvorbeladung bis zu einem Druckverlustanstieg von 50 Pa erfahren hat. Die Charakteristik ist dieselbe wie schon bei den Anfangsfraktionsabscheidegraden, alle drei Kurven sind dabei deutlich nach unten verschoben. Die Dieselrußbeladung führte zu einem signifikanten Einbruch der Elektretwirkung des Filters.

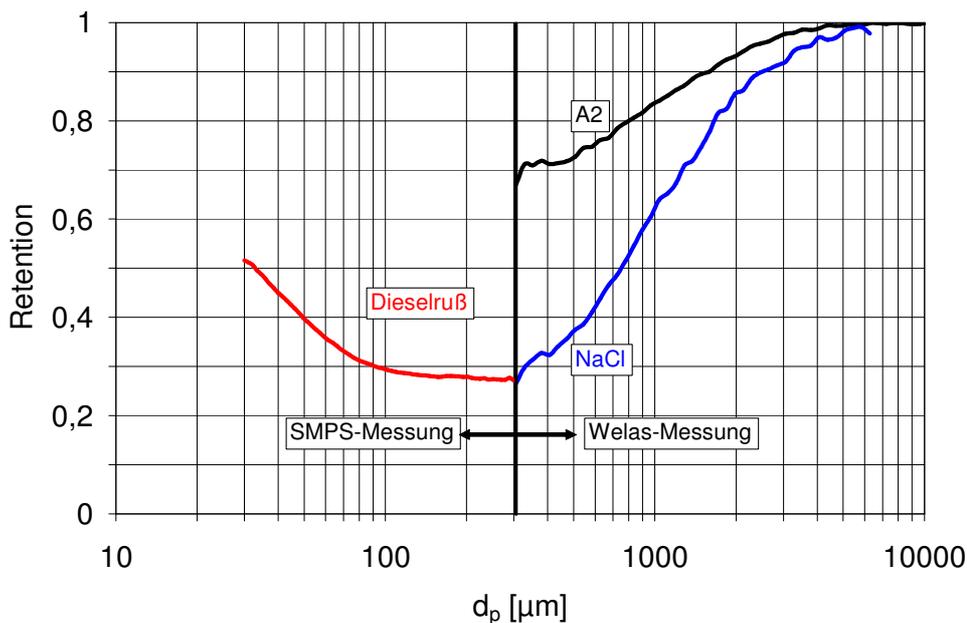


Abb. 6.27: Fraktionsabscheidegrade A2, NaCl und Dieselruß nach Dieselrußvorbeladung

6.3.2.2 RLT-Filter

Bei einer Prüfung von RLT-Filtern nach DIN EN 779 wird zur Ermittlung der Filterklasse von F-Filtern der Fraktionsabscheidegrad mit DEHS im Anfangszustand des Filters und in verschiedenen Stadien der Beladung mit ASHRAE-Staub ermittelt. Zur Klassifizierung des Filters wird ein beladungsstufenabhängig gewichteter mittlerer Wirkungsgrad für $0,4\ \mu\text{m}$ DEHS-Partikel herangezogen. Im Rahmen der Prüfung wird also untersucht, wie sich die Filtereffizienz durch eine Beladung des Prüflings ändert. In diesem Abschnitt wird betrachtet, wie sich die Filtereffizienz mit zunehmender Beladung ändert, wenn nicht ASHRAE-Staub im Rahmen der normkonformen Prüfung genutzt wird, sondern die Filter im Realbetrieb mit Außenluft beaufschlagt werden.

Zu diesem Zweck wurden Filter aus einem Frischluftzug einer Lüftungsanlage an der Universität Duisburg-Essen nach zwei Wochen, drei Monaten und sechs Monaten entnommen. Die Ermittlung des Fraktionsabscheidegrades erfolgte dann mit DEHS am Normprüfkanal. Abb. 6.28 zeigt die Effizienzen der F7-Filter aus der ersten Filterstufe der Lüftungsanlage im Vergleich zur Anfangseffizienz des Filters im Neuzustand. Während eine zweiwöchige Nutzung noch zu keiner merklichen Veränderung geführt hat, liegt die Effizienz für DEHS mit $0,4\ \mu\text{m}$ nach drei Monaten bei ca. 35 % Retention und damit 20 Prozentpunkte unterhalb der Anfangseffizienz. Nach weiteren drei Monaten Nutzung der Filter in der Lüftungsanlage ist eine geringfügige Verbesserung der Abscheidung zu verzeichnen. Die Effizienz nach sechs Monaten liegt aber nach wie vor deutlich unterhalb der Anfangseffizienz. Im Diagramm ist der Effizienzbereich für $0,4\ \mu\text{m}$ DEHS-Partikel eingetragen, der als mittlerer Wirkungsgrad bei Beladung mit ASHRAE-Staub nach Norm zur Klassierung eines F7-Filters herangezogen wird.

Aufgrund der Beaufschlagung mit Außenluft im Realbetrieb erreicht der Filter Effizienzen, die ca. 45 Prozentpunkte unterhalb des Effizienzbereichs liegen, der zur Klassierung dient. Während durch die ASHRAE-Beladung in den zugrunde liegenden Diskretisierungsschritten eine kontinuierliche Verbesserung der Effizienz hervorgerufen wird, ergibt sich im Realbetrieb eine Verschlechterung. Im aktuellen Entwurfsstadium der Überarbeitung der EN 779 ist für Filter der Klassen F7 bis F9 als zusätzliches Kriterium ein vorgegebener Wert der Minimaleffizienz vorgesehen. Die Ermittlung der Minimaleffizienz soll an Medienproben erfolgen, die durch eine Isopropanolbehandlung elektrisch neutralisiert worden sind. Für F7-Filter liegt der Vorgabewert bei 35 % Wirkungsgrad für $0,4\ \mu\text{m}$ DEHS. In der Abb. 6.28 sieht man, dass der Wert nach einem dreimonatigen Betrieb genau diese 35 % Wirkungsgrad trifft. Ob der betrachtete Filter den Minimaleffizienzvorgabewert zu einem anderen Zeitpunkt der Entnahme aus dem Realbetrieb gegebenenfalls noch unterschritten hätte, ist nicht auszuschließen.

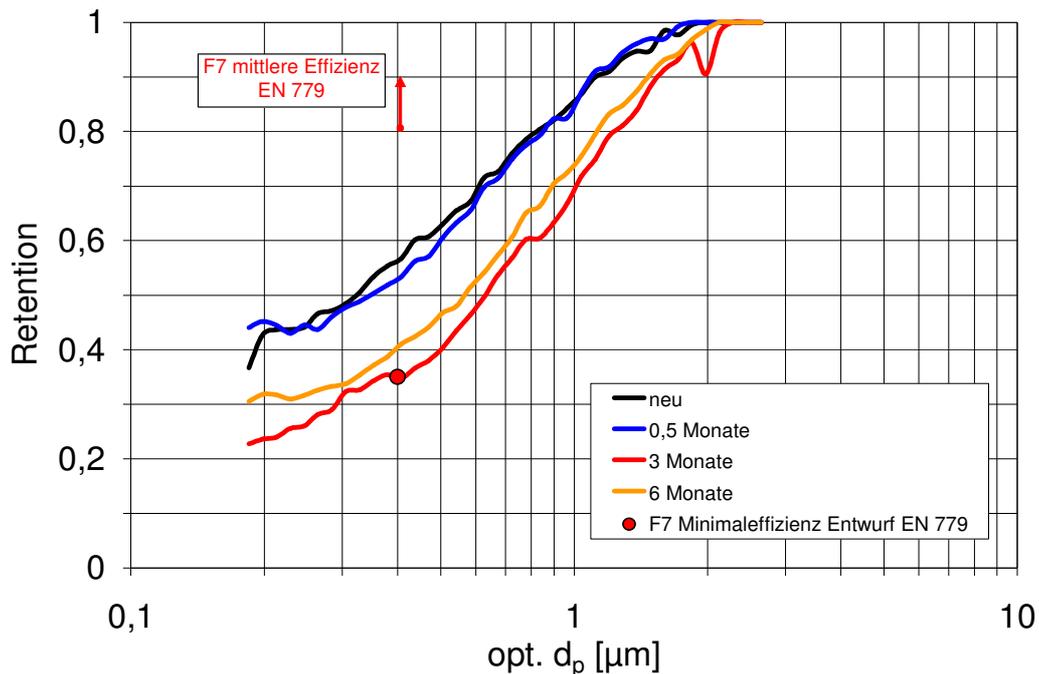


Abb. 6.28: Entwicklung des Fraktionsabscheidegrads eines F7-Filters

In Abb. 6.29 ist die Entwicklung des Fraktionsabscheidegrads für den F8-Filter aus der zweiten Stufe des gleichen Frischluftzuges aus der Lüftungsanlage der Universität Duisburg-Essen aufgetragen.

Die F8-Filter der zweiten Stufe werden aufgrund der Vorabscheidung an den F7-Filtern der ersten Stufe nicht mehr mit der gesamten Partikelfracht der angesaugten Außenluft beaufschlagt. Darüber hinaus werden sie anders als die F7-Filter, die den schwankenden klimatischen Außenluftbedingungen unterworfen sind, mit konstanten Temperatur- und Feuchtebedingungen beaufschlagt, da die Klimakomponenten vor der zweiten Stufe angeordnet sind.

Der F8-Filter zeigt trotz der anderen Betriebsparameter das gleiche Verhalten wie der zuvor betrachtete F7-Filter. Die Effizienzen liegen dabei der Filterklasse entsprechend auf einem höheren Niveau. Nach einer dreimonatigen Beaufschlagung mit der vorkonditionierten Außenluft liegt die Effizienz für $0,4 \mu\text{m}$ DEHS-Partikel bei ca. 55 % und damit 15 Prozentpunkte unterhalb der Anfangseffizienz.

Zu Vergleichszwecken ist auch hier die $0,4 \mu\text{m}$ DEHS Effizienzbereich, der als mittlerer Wirkungsgrad bei Beladung mit ASHRAE-Staub nach Norm zur Klassierung eines F8-Filters herangezogen wird, eingetragen, ebenso der vorgesehene Wert für die Minimaleffizienz.

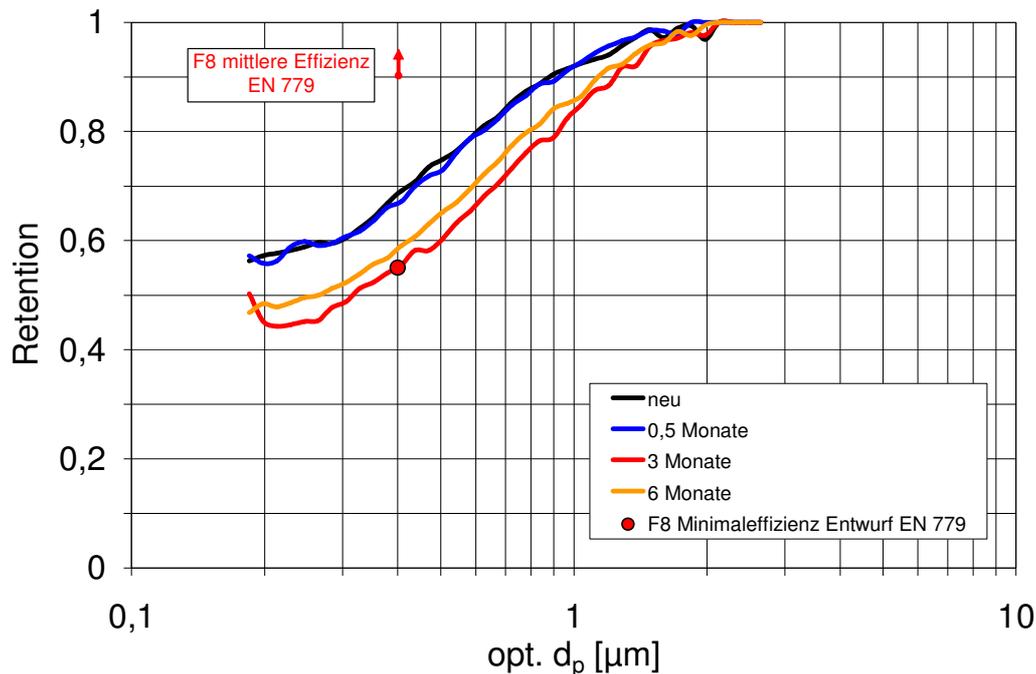


Abb. 6.29: Entwicklung des Fraktionsabscheidegrads eines F8-Filters

Wie sich eine gezielte Beaufschlagung eines F7-Filters mit Dieselruß auf die DEHS-Effizienz auswirkt, zeigt Abb. 6.30. Der untersuchte Taschenfilter wurde in Zeitschritten zwischen zehn Minuten und acht Stunden mit Dieselruß beaufschlagt. Ausgehend von der Anfangseffizienz des Filters im Neuzustand ergibt sich durch die Beladung eine kontinuierliche Verschlechterung der Effizienz. Zum Vergleich ist die Effizienz nach einer Isopropanolbehandlung des kompletten Filters im Diagramm eingetragen. Ab einer vierstündigen Beaufschlagung mit Ruß liegt die anschließende DEHS-Effizienz unterhalb des Vorgabewertes der Minimaleffizienz des Neuentwurfs der EN 779. Wenn dem Filter seine Elektretwirkung nicht im Rahmen der Beaufschlagung mit Partikeln genommen wird, sondern durch die Isopropanolbehandlung, liegt die Effizienz nochmals entsprechend tiefer. Um zu klären, wie nahe man mit einer Beaufschlagung mit Dieselruß der Minimaleffizienz nach Isopropanolbehandlung kommen kann, müsste in diesem Fallbeispiel die Beaufschlagung über die Dauer von acht Stunden hinaus weiter fortgesetzt werden.

Es ist anzumerken, dass der hier betrachtete Filter auch schon bei normkonformer Prüfung unter Zugrundelegung des mittleren Wirkungsgrades bei ASHRAE-Beladung trotz seiner Auszeichnung als F7-Filter seine Filterklasse nicht erfüllt hat.

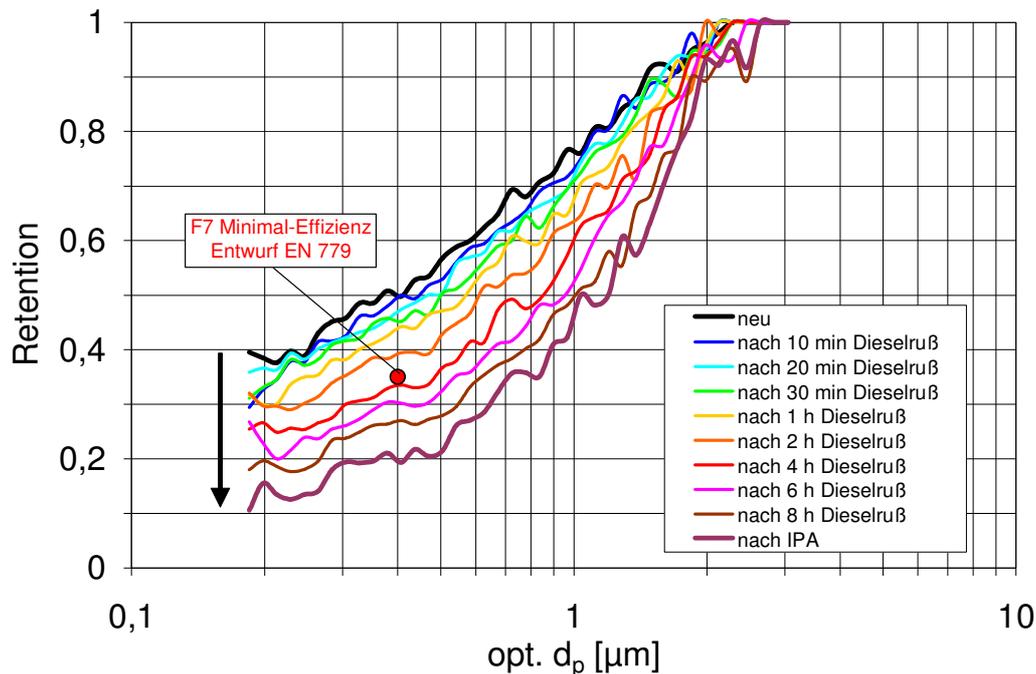


Abb. 6.30: Änderung des DEHS-Fraktionsabscheidegrads bei Dieselrußbeladung

Die im Folgenden dargestellten Messergebnisse beziehen sich zwar auf F7-Filter zweier unterschiedlicher Hersteller, dieses ist jedoch für die angestellten qualitativen Überlegungen irrelevant.

Betrachtet man die $0,4 \mu\text{m}$ DEHS-Effizienz bei der Beladung mit ASHRAE-Staub nach EN 779 als Funktion des Druckverlustanstieges ergibt sich der in Abb. 6.31 gezeigte Verlauf (rote Kurve). Schon der erste Beladungsschritt mit 30 g ASHRAE-Staub führt bei einer nur geringen Druckverlustzunahme zu einer Verbesserung der Effizienz. Eine Isopropanolbehandlung führt ohne eine Änderung des Druckverlustes aufgrund der genommenen Elektretwirkung zu einem signifikanten Einbruch der Effizienz gegenüber der Anfangseffizienz. Eine Dieselrußbeladung von acht Stunden bewirkt ohne nennenswerten Druckverlustanstieg ebenfalls eine deutliche Verschlechterung der Effizienz. Die Effizienz nach einer sechsmonatigen Verwendung des Filters im Realbetrieb liegt in einer vergleichbaren Größenordnung wie nach der Rußbeladung. Hierbei ist allerdings ein angestiegener Druckverlust zu verzeichnen.

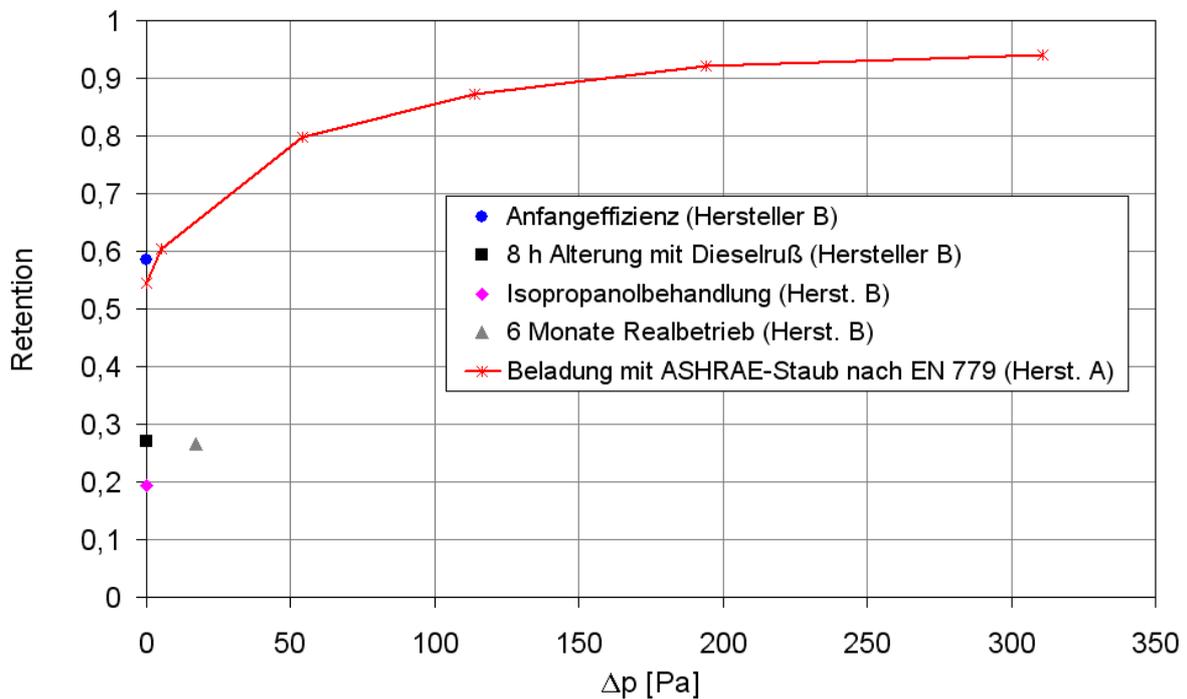


Abb. 6.31: 0,4 µm DEHS-Effizienz als Funktion des Druckverlustanstieges an F7-Filtern

In Abb. 6.32 sind die Ergebnisse der Effizienz als Funktion der Massenzunahme dargestellt. Die Rußbeladung, die praktisch keinen Druckverlustanstieg bewirkt hatte, führte zu einem Massenanstieg von ca. 30 g. Vergleicht man diese Massenzunahme an Ruß mit der korrespondierenden Zunahme an ASHRAE-Staub, zeigen sich jedoch aufgrund der differierenden Partikeleigenschaften deutliche Unterschiede.

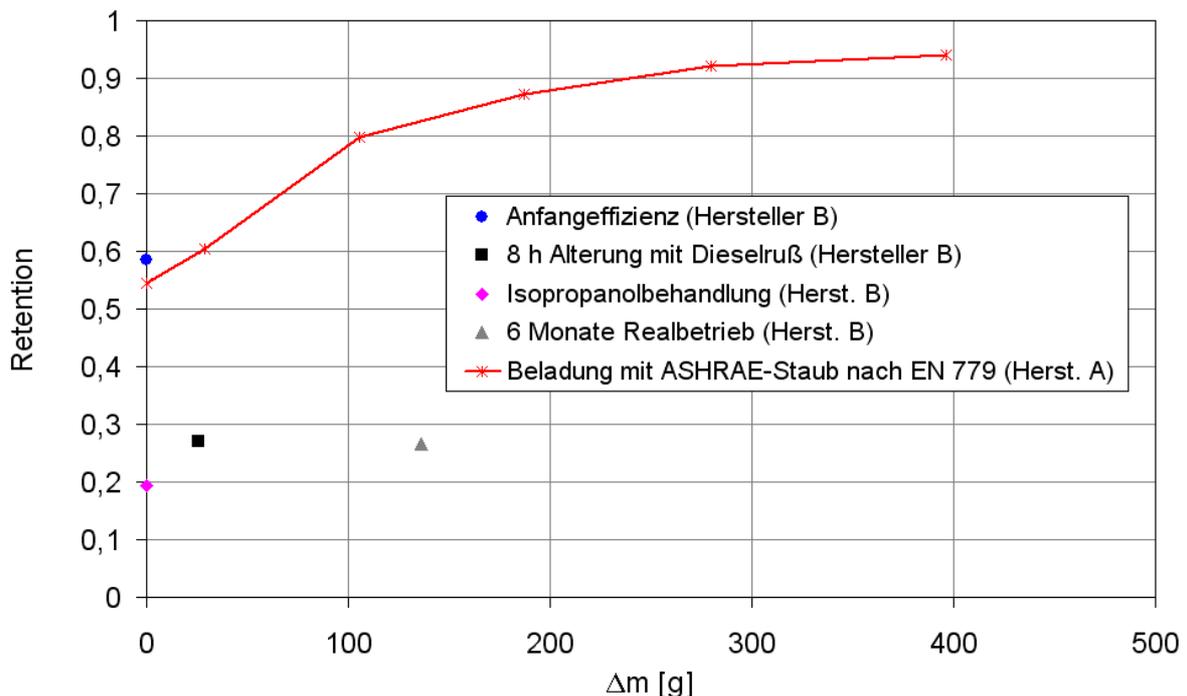


Abb. 6.32: 0,4 µm DEHS-Effizienz als Funktion der Massenzunahme an F7-Filtern

6.3.3 Zwischenfazit

Im Falle von Elektretfiltern kann es im Realeinsatz wie auch unter Prüfbedingungen im Labor zu einer deutlichen Verschlechterung der Effizienz kommen, weil die allmählich nachlassende Elektretwirkung noch nicht durch die Verbesserung bei zunehmender Beladung mit Partikeln kompensiert wird. In Abschnitt 6.2.2 wurden im Sinne einer Grenzbetrachtung ermittelte Minimaleffizienzen vorgestellt, die sich nach einer Behandlung von Elektretfiltern bzw. –medien mit Isopropanol ergeben.

Ist ein Elektretmedium höheren Temperaturen und relativen Feuchten ausgesetzt (Klimabehandlung Abschnitt 6.3.1), verringert sich das vom Filter ausgehende elektrische Feld. Die Filtereffizienzen verringern sich demzufolge ebenfalls. Eine vollständige elektrische Neutralisierung im Sinne der Abbildung einer Minimaleffizienz konnte aber mit keiner der untersuchten Varianten einer Klimabehandlung erzielt werden. Die Klimabehandlung stellt also keine unter Prüfbedingungen praktikable Alternative zur Isopropanolbehandlung dar.

In Abschnitt 6.3.2 wird anhand von Beispielen für Kfz-Innenraum- und RLT-Filter aufgezeigt, wie sich eine Durchströmung mit Außenluft effizienzmindernd auswirkt. Unter Prüfbedingungen im Labor wird eine Beladung unter Verwendung von A2- bzw. ASHRAE-Staub simuliert. Die Beladungskurven und die Veränderung der Effizienz mit zunehmender Beladung sind zwangsläufig anders als bei der Beaufschlagung mit Außenluft im Realbetrieb. Bei längerer Außenluftdurchströmung kommt es nicht notwendigerweise zu einem relevanten Druckanstieg und einer Massenzunahme. Damit einhergehend wird die Effizienzminderung durch die nachlassende Elektretwirkung unter Umständen nicht durch eine verbesserte mechanische Abscheidung mit zunehmender Beladung kompensiert.

Unter normkonformen Prüfbedingungen ermittelte Fraktionsabscheidegrade in verschiedenen Beladungsstadien weisen je nach Diskretisierung der Beladung keinen erkennbaren Einbruch der Effizienz auf, weil die Verwendung von A2- bzw. ASHRAE-Staub dergestalt zu einer Verbesserung der mechanischen Abscheidemechanismen führt, dass die nachlassende Elektretwirkung nicht detektierbar ist.

Eine Beladung mit Dieselruß führt wie die Beladung mit Außenluft zu einem deutlichen Einbruch der Elektretwirkung, ohne dass dieser effizienzmindernde Effekt durch eine verbesserte mechanische Abscheidung mit zunehmender Beladung kompensiert wird.

7 Gesamtfazit

Mit Hilfe des im Projekt entwickelten Elektroabscheiders, der als Funktionsmuster vorliegt, ist es möglich, den unbekanntem Ladungszustand nach der Aerosolbereit-

stellung in einen definierten Ladungszustand zu überführen. Die elektrische Mobilität der Partikel wird nach unten begrenzt. Die Abscheidecharakteristik des Elektroabscheiders unterscheidet sich hierbei für die verwendeten Aerosole (A2, NaCl, DEHS), primär aufgrund ihrer unterschiedlichen generierungsbedingten Ladungszustände, qualitativ wie quantitativ. Die Zeitintervalle bis zur notwendigen Reinigung des Elektroabscheiders sind ausreichend groß, um einen stabilen Betrieb für Filtereffizienzmessungen zu ermöglichen. Der Elektroabscheider kann als modularer Bestandteil der Anlagenperipherie an unterschiedlichen Filterprüfständen eingesetzt werden.

Im Rahmen der Filterprüfung zeigt sich, dass ermittelte Fraktionsabscheidegrade für die Aerosole DEHS, NaCl und A2 sehr unterschiedlich sein können, wenn diese im jeweiligen undefinierten generierungsbedingten Ladungszustand verwendet werden. Im Falle des hoch aufgeladenen A2 ist der elektrophoretische Abscheidebeitrag überproportional groß. Erst bei Verwendung des Elektroabscheiders und dem daraus resultierenden definierten Ladungszustand stimmen die Ergebnisse in guter Näherung überein.

Im Falle von Elektretfiltern kann es im Realeinsatz wie auch unter Prüfbedingungen im Labor zu einer deutlichen Verschlechterung der Effizienz kommen, weil die allmählich nachlassende Elektretwirkung noch nicht durch die Verbesserung bei zunehmender Beladung mit Partikeln kompensiert wird.

Eine Isopropanolbehandlung des Filters stellt im Bezug dazu eine Grenzbetrachtung dar. Das Filter wird elektrisch komplett neutralisiert. Die Partikelabscheidung nach der Isopropanolbehandlung erfolgt nur noch aufgrund der mechanischen Abscheidemechanismen, außer im Falle des hochaufgeladenen A2, bei dem eine Abscheidung aufgrund des Spiegelladungseffektes erfolgen kann.

Alle im Projekt untersuchten Varianten einer Klimabehandlung führen nur zu einer teilweisen Neutralisierung. Damit ist die vom Filter ausgehende Elektretwirkung nicht gänzlich aufgehoben. Die Klimabehandlung stellt also keine Alternative zur Isopropanolbehandlung dar.

Bei einer Beaufschlagung des Filters mit einem Aerosol stellt sich die Frage, ob die Elektretwirkung ausreichend lange aufrecht erhalten bleibt, bis sich die mechanischen Abscheidemechanismen bei der Beladung verstärkt haben.

Unter normkonformen Prüfbedingungen ermittelte Fraktionsabscheidegrade in verschiedenen Beladungsstadien weisen je nach Diskretisierung bei der Beladung keinen erkennbaren Einbruch der Effizienz auf, weil die Verwendung von A2- bzw. ASHRAE-Staub dergestalt zu einer Verbesserung der mechanischen Abscheidemechanismen führt, dass die nachlassende Elektretwirkung nicht detektierbar ist. Eine Beladung mit Dieselruß führt jedoch ebenso wie eine Beladung mit Außenluft zu

einem deutlichen Einbruch der Elektretwirkung, ohne dass dieser effizienzmindernde Effekt durch eine verbesserte mechanische Abscheidung mit zunehmender Beladung kompensiert wird.

In wie weit die Auswirkungen einer Beladung mit Dieselruß und Außenluft miteinander korreliert werden können, ist Teil der Untersuchungen des IGF-Projektes „Entwicklung von Filtertests zur Abbildung der Effizienz von Luftfiltern bei zunehmender Beladung mit Außenluft“ (16793 N), welches sich thematisch an dieses Projekt angliedert.

8 Gegenüberstellung von Projektziel und erreichten Ergebnissen

Hauptziel des Forschungsprojektes war die Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung der Effizienz von Luftfiltern, welches definierte Bedingungen im Hinblick auf elektrophoretische Abscheidebeiträge schafft und sich dabei eng an die Bedingungen der Praxis anlehnt.

Um eine belastbare Prüfprozedur zu entwickeln, erfolgte eine systematische Untersuchung für unterschiedliche Partikelmaterialien und Anwendungsfälle. Zugleich sollten unterschiedliche Verfahren zur künstlichen Filteralterung im Sinne der Neutralisierung der Filtermedien gezielt analysiert werden.

Zur Erreichung des Projektziels wurden im Einzelnen bearbeitet:

- Auslegung und Konstruktion eines E-Abscheiders
- Funktionstests am E-Abscheider
- Variation des Aerosolladungszustandes bei Effizienzmessungen
- Variation des Filterladungszustandes bei Effizienzmessungen
 - ohne Partikelbeaufschlagung
 - Minimaleffizienz nach Isopropanolbehandlung
 - Effizienz nach Klimabehandlung
 - mit Partikelbeaufschlagung
 - Effizienz nach Außenluft-Vorbeladung
 - Effizienz nach Dieselruß-Vorbeladung

Durchgeführte Arbeitsschritte	Ergebnisse
Auslegung und Konstruktion eines E-Abscheiders	Es wurde ein E-Abscheider ausgelegt und konstruiert, mit dem es möglich ist, den unbekanntem Ladungszustand nach der Aerosolbereitstellung in einen definierten Ladungszustand zu überführen.
Funktionstests am E-Abscheider	Standzeituntersuchungen für die unterschiedlichen Prüfaerosole zeigten für DEHS, NaCl und A2 einen ausreichend langen stabilen Betrieb für Effizienzmessungen. Für

	Beladungsprüfungen mit A2 waren die Reinigungsintervalle jedoch unpraktikabel kurz. Der E-Abscheider konnte am Kfz-Innenraumfilterprüfstand (DIN 71460-1), am Prüfstand für RLT-Filter (DIN EN 779) sowie am Medienprüfstand (MFP 1000) implementiert werden.
Variation des Aerosolladungszustandes	Der Vergleich der Fraktionsabscheidegrade für DEHS, NaCl und A2 im jeweiligen undefinierten generierungsbedingten Ladungszustand und im definierten bei Verwendung des E-Abscheiders zeigte, dass die Ergebnisse für die drei Aerosole erst dann in guter Näherung übereinstimmen, wenn der E-Abscheider eingesetzt wurde.
Variation des Filterladungszustandes <ul style="list-style-type: none"> ○ ohne Partikelbeaufschlagung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Minimaleffizienz nach Isopropanolbehandlung ▪ Effizienz nach Klimabehandlung ○ mit Partikelbeaufschlagung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Effizienz nach Außenluft-Vorbeladung ▪ Effizienz nach Dieselruß-Vorbeladung 	Während eine Isopropanolbehandlung das Filter komplett elektrisch entlädt, führten alle Varianten einer Klimabehandlung nur zu einer teilweisen Neutralisierung. Demzufolge erfolgt die Partikelabscheidung nach der Isopropanolbehandlung nur noch aufgrund der mechanischen Abscheidemechanismen (außer im Falle des hochaufgeladenen A2 bei dem eine Abscheidung aufgrund des Spiegelladungseffektes erfolgen kann). Im Falle der Klimabehandlung treten durch die verbleibenden elektrischen Ladungen auf den Fasern auch elektrophoretische Abscheidebeiträge aufgrund des Polarisierungseffektes und aufgrund der Coulombkraft auf. Die Partikelbeaufschlagung mit Außenluft sowie mit Dieselruß führt zu einer allmählichen elektrischen Neutralisierung des Filters. Die daraus resultierende Effizienz-minderung ist überlagert durch eine allmähliche Effizienzverbesserung aufgrund der strukturellen Änderung des Filters mit zunehmend eingelagerter Partikelmenge. Die Isopropanolbehandlung ist eine konservative Abbildung einer Minimaleffizienz, die sich auch während einer Partikelbeaufschlagung darstellen kann.

Das Ziel des Forschungsprojektes wurde erreicht.

9 Erzielter wirtschaftlicher und wissenschaftlich-technischer Nutzen

Die erarbeiteten Projektergebnisse können in wissenschaftlich-technischer Hinsicht genutzt werden, um Prüfprozeduren im Rahmen der Filterprüfung zu verbessern und diesbezüglich bestehende Normen weiterzuentwickeln.

Eine Filterprüfnorm sollte hinreichend definierte Bedingungen vorgeben, so dass eine Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse unterschiedlicher Labore gewährleistet ist. Ringversuche aus dem Bereich der Kfz-Innenraumfilter haben aber gezeigt, dass beim aktuellen Stand der Normung die Ergebnisse oft erheblich voneinander abweichen. Diese Abweichungen sind maßgeblich auf unterschiedliche Ladungszustände

der Prüfaerosole zurückzuführen.

Das konstruierte und erprobte Funktionsmuster des Elektroabscheiders ermöglicht es, hinsichtlich des Aerosolladungszustandes ausreichend definierte Bedingungen zu schaffen, um die Vergleichbarkeit von Prüfergebnissen deutlich zu verbessern.

Idealerweise würden sich Filterprüfungen möglichst so nah an realen Einsatzbedingungen des Filters orientieren, dass sie zur quantitativen Vorhersage für den Einsatz des Filters im realen Betrieb genutzt werden können. Filterprüfungen nach Normen sind aber zwangsläufig nur vergleichende Messungen, deren Ergebnisse je nach Vorgabe mehr oder minder gut mit dem Leistungsvermögen der Filter unter Realeinsatzbedingungen korrespondieren.

Die erzielten Projektergebnisse tragen zu einem tieferen Verständnis der Filtereffizienz von Luftfiltern unter Prüf- wie unter Realanwendungsbedingungen bei.

Kleine und mittelständische Unternehmen, die im Bereich der Filtermedienherstellung, der Filterkonfektionierung und der Filterprüfung tätig sind, können selber aufgrund fehlender personeller Kapazitäten typischerweise keine Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchführen. Für die Entwicklung von innovativen Filterprodukten ist es aber notwendig, dass eine Filterprüfung dem Hersteller belastbare und realitätsnahe Ergebnisse liefert. Denn nur so ist es möglich, eine hohe Produktqualität aufrecht zu erhalten bzw. die Produktqualität fortlaufend zu verbessern. Eine fundierte Basis zur Beurteilung seines Produktes hilft dem Hersteller nicht nur bei der Entwicklung, sondern kann auch unmittelbar genutzt werden, um die Produktqualität gegenüber Kunden und Anwendern zu dokumentieren.

Die im Rahmen dieses Projektes erarbeiteten Ergebnisse liefern eine solide Datenbasis für die Planung und Durchführung von präzisen Filterprüfungen. Somit erhalten Hersteller, Prüflabore und Anwender eine verlässliche und vergleichbare Aussage zur Produktqualität. Durch die Nutzung der Projektergebnisse erlangen sie somit in wirtschaftlicher Hinsicht einen Wettbewerbsvorteil.

Die Ergebnisse des Projektes werden durch die Mitarbeit des Projektleiters der FS 2 den folgenden Norm- bzw. Richtlinienausschüsse zur Verfügung gestellt: dem Arbeitskreis Kfz-Luftfilter des Normenausschuss Automobiltechnik (bisher FAKRA) einer Institution des Verbandes der Automobilindustrie (VDA) und des DIN, dem Gremium Luftfilter des Normenausschusses Maschinenbau (NAM) des VDMA / DIN und dem Richtlinienausschuss VDI 6032 Blatt 2 „Raumluftechnik, Raumlufqualität – Lufthygiene in Fahrzeugen zur Personenbeförderung“.

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

Für das Projekt wurde eine kostenneutrale Verlängerung um fünf Monate beantragt. Das Projektende hat sich damit vom 30.04.2011 auf den 30.09.2011 verschoben. Die kostenneutrale Verlängerung war zum einen aus personellen Gründen notwendig, da an der FS1 Mitarbeiter nicht, wie im Projekt geplant, zur Verfügung standen. Zum anderen kam es an der FS2 zu nicht vorhersehbaren Verzögerungen bei der Anfertigung und konstruktiven Umgestaltungsmaßnahmen des Elektroabscheiders, die eine Verlängerung notwendig machten.

Die durchgeführten Arbeiten und der Personaleinsatz waren zur Erreichung des Projektzieles notwendig. Die wissenschaftlichen Mitarbeiter an den beiden Forschungsstellen mussten die Messungen, die jeweils von den technischen Mitarbeitern ausgeführt wurden, intensiv begleiten. Der Einsatz des Personals war bei der inhaltlichen Komplexität und dem zeitlichen Aufwand notwendig und angemessen.

11 Fortgeschriebener, aktualisierter Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Die bisher durchgeführten und in nächster Zeit geplanten Transfermaßnahmen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Maßnahme	Zeitplan
Information der Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA) im Rahmen einer Sitzung	<ul style="list-style-type: none"> geplante Inhalte bereits im Vorfeld des Projektes am 12.11.2008 vorgestellt PA-Sitzung durchgeführt am 05.11.2009 PA-Sitzung durchgeführt am 04.11.2010 PA-Sitzung durchgeführt am 22.09.2011
Austausch von Informationen mit einer Vielzahl von Unternehmen, die über verschiedene Themenstellungen mit der Projektidee verbunden sind	<ul style="list-style-type: none"> fortlaufend
Tätigkeitsbericht des IUTA	<ul style="list-style-type: none"> 2009, 2010, 2011
Publikationen in Fachzeitschriften <ul style="list-style-type: none"> Chemie Ingenieur Technik Welt-Handbuch der Filtrations- und Separationsindustrie 2012-2014 / 	<ul style="list-style-type: none"> „Ergebnisse der RLT-Filterprüfung nach EN779 im Vergleich zu Messungen an Filtern aus dem Betrieb“, Schmidt et al., Artikel angenommen „Vergleichende Prüfung von Kfz-Innenraumfiltern“,

Global Guide of the Filtration and Separation Industry 2012-2014	F. Schmidt, A. Breidenbach, Artikel angenommen, erscheint zum 11th WFC April 2012, Graz
Publikationen der Projektergebnisse im Internet	<ul style="list-style-type: none"> fortlaufend auf den Internet-Seiten der beiden FS und in der Internet-Projektdatebank der AiF-Mitgliedsvereinigung
<p>Vorstellung der Ergebnisse durch Vorträge oder Posterpräsentation</p> <ul style="list-style-type: none"> FILTECH 2011, Wiesbaden 25. Aerosol-Technologie-Seminar, Palas, Karlsruhe 11. Symposium Textile Filter, STFI, Chemnitz 	<ul style="list-style-type: none"> Vortrag 24.03.2011: "Efficiency of electret cabin air filters using different test aerosols", Dipl.-Ing. A. Breidenbach Vortrag 13.09.2011: „Der Wirkungsgrad von RLT-Filtern aus dem realen Betrieb“, PD Dr.-Ing. F. Schmidt Vortrag 07.03.2012: „Einfluss des Aerosolladungszustands bei der Filterprüfung“, Dipl.-Ing. A. Breidenbach
Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre	<ul style="list-style-type: none"> durch die Projektleiter der FS 1 und FS 2 in den Vorlesungen: <ul style="list-style-type: none"> o Air Pollution Control o Aerosol Technology an der Universität Duisburg-Essen
Übernahme der Ergebnisse in Technische Regelwerke	<ul style="list-style-type: none"> fortlaufend durch den Projektleiter der FS 2 (Normenausschüsse FAKRA, NAM, VDI)

12 Literatur

- [1] DIN 71460-1, Straßenfahrzeuge – Luftfilter für Kraftfahrzeuginnenraum – Teil 1: Prüfverfahren für Partikelfiltration, April 2006
- [2] DIN EN 779, Partikel-Luftfilter für die allgemeine Raumlufttechnik; Bestimmung der Filterleistung, Mai 2003
- [3] Ilgen, B. (2002)
Messtechnische Beurteilung von Kabinenluftfiltern; Haus der Technik, Essen 2002
- [4] ISO/TS 11155-1, Road Vehicles – Air filters for passenger compartments – Part 1: Test for particle filtration, Nov 2001
- [5] Hinds, W. C. (1982)
Aerosol technology - Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles; John Wiley & Sons, ISBN: 0-471-08726-2
- [6] Reinhardt, H. Kobori, S. (2006)
The Different Standard Test Methods For Cabin Air Filters in Japan, USA And

- Europe; 5th International Filtration Conference, Osaka, Japan November 2006
- [7] Brown, R. C. (1993)
Air Filtration, An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters, Pergamon Press, Oxford, New Yor, Seoul, Tokyo
- [8] Schmidt, F.; Haep, S. (2008)
Aktuelle Entwicklungen bei der Prüfung von Luftfiltern für den Kraftfahrzeuginnenraum; Filtrieren und Separieren (Welthandbuch der Filtrations- und Separationsindustrie 2008-2010), ISBN: 978-3-00-024080-5, S. 181-185
- [9] Raynor, P.C. and Chae, S.J. (2004)
The long term performance of electrically charged filters in a ventilation system; Journal of Occupationaland Environmental Hygiene, No.1, pp. 463-471
- [10] ISO 12103-1, Road vehicles - Test dust for filter evaluation - Part 1: Arizona test dust, Dez 1997