



AiF-Forschungsvereinigung
„Energie- und Umwelttechnik“

2017

Innovationsreport

Industrielle Gemeinschaftsforschung

IGF Forschungsvorhabensnummer: 18292 N

Die Effizienz von Luftfiltern bei hohen relativen Feuchten und bei Beaufschlagung mit Wassertröpfchen (Hauptanwendungsbereich Gasturbinen)

Laufzeit: 01.08.2014 – 31.07.2017

Beteiligte Forschungsstelle(n):

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

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

Bereich Industrielle
Gemeinschaftsforschung
www.iuta.de/igf

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 18292 N

Thema

Die Effizienz von Luftfiltern bei hohen relativen Feuchten und Beaufschlagung mit Wassertröpfchen (Anwendungsbereich Gasturbinen)

Berichtszeitraum

01.08.2014 – 31.07.2017

Forschungsvereinigung

Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. - IUTA

Forschungsstelle(n)

Universität Duisburg-Essen, IVG-NPPT (UDE)
Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. - (IUTA)

Duisburg, 30.11.2017

Prof. Dr.-Ing. Frank Schmidt

Duisburg, 30.11.2017

Thomas Engelke

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiter der Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:

Forschungsstellen

- 1 Universität Duisburg-Essen, Institut für Verbrennung und Gasdynamik
Lehrstuhl Nanopartikel-Prozesstechnik,
Lotharstraße 1
47048 Duisburg

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

Inhaltsverzeichnis

Thema	1
Berichtszeitraum.....	1
Forschungsvereinigung	1
Forschungsstelle(n).....	1
1 Forschungsthema	1
2 Zusammenfassung.....	1
3 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	2
3.1 Ausgangssituation.....	2
3.2 Problemstellung	3
4 Forschungsziel / Lösungsweg / Ergebnisse	3
4.1 Druckverlust- und Effizienzmessungen an konfektionierten Filtern im Neuzustand und nach Nutzung in Gasturbinenanlagen	4
4.2 Chemische Analyse der abgeschiedenen Partikel auf Filtern aus dem Realbetrieb und Vergleich mit Immissionsdaten	8
4.3 Bestimmung der Leistungsdaten von Filtermedien und Filterelementen bei Variation der Feuchte und Verwendung unterschiedlicher Beladungs-aerosole ..	10
4.3.1 Filtermedien.....	10
4.3.1.1 Druckverlustmessungen bei Variation der Feuchte.....	14
4.3.1.2 Polydisperse Bestimmung des DEHS-Fraktionsabscheidegrades bei Variation der Feuchte	23
4.3.1.3 Behandlung mit Isopropanol.....	31
4.3.1.4 Umbau des Prüfaufbaus.....	31
4.3.1.5 Fehlerquellen	33
4.3.1.6 Literaturrecherche zur Deliqueszenzfeuchte	38
4.3.1.7 Monodisperse Bestimmung des DEHS-Fraktionsabscheidegrades bei Variation der Feuchte	42
4.3.2 Filterelemente	45
4.3.2.1 Konfektionierte Filterelemente im Neuzustand bei Variation der Feuchte	45
4.3.2.2 Mit Außenluft beladene Filterelemente bei Variation der Feuchte	47
4.3.2.3 Salzbeladene Filterelemente bei Variation der Feuchte.....	50
4.4 Experimentelle Untersuchungen zur Vermeidung von Tropfenschlag durch Einsatz von vorgeschalteten Tropfenabscheidern	56
4.5 Experimente zum Tropfenschlag auf Medien und Filter	65

4.5.1 Einfluss von Luftfeuchte und Wassertropfen auf Filtermedien und konfektionierte Filter	65
4.5.2 Zusätzliche Beaufschlagung mit trockenem Salz.....	69
4.6 Vergleich mit dem Prüfprozedere eines europäischen Prüfinstituts	74
4.7 REM-Bilder und EDX-Analyse	79
4.7.1 Neue, unbeladene Filtermedien.....	79
4.7.2 Beladene Filtermedien.....	80
4.7.3 Filtermedien nach Isopropanol-Behandlung	83
4.7.4 Filter aus dem Realbetrieb.....	83
4.8 Modellierung des Druckverlustes und des Fraktionsabscheidegrades an Filtermedien in Abhängigkeit von Beladungszustand und Luftfeuchte	86
4.9 Modellierung der Beladung an plissierten Filterstrukturen	91
4.10 Prüfprozedere nach Wilcox und Poerner	94
4.10.1 Testverfahren und Messungen	95
4.10.2 Künftige Weiterentwicklungen.....	96
4.11 Festlegung der Prüfmethode.....	97
5 Fazit	100
6 Gegenüberstellung von Projektziel und erreichten Ergebnissen	101
7 Erzielter wirtschaftlicher und wissenschaftlich-technischer Nutzen	104
8 Darstellung der Verwendung der Zuwendung unter besonderer Berücksichtigung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	104
8.1 Verwendung der Zuwendung	104
8.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	105
9 Fortgeschriebener, aktualisierter Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	105
10 Literaturverzeichnis	109
11 Abbildungsverzeichnis.....	111
12 Anhang.....	115

1 Forschungsthema

Die Effizienz von Luftfiltern bei hohen relativen Feuchten und Beaufschlagung mit Wassertröpfchen (Anwendungsbereich: Gasturbinen).

2 Zusammenfassung

Hauptziel des Projektes war es, Vorschläge für eine Prüfprozedur zu entwickeln, die reale Bedingungen von Gasturbinenfiltern besser beschreibt als die bisherigen Normen und Regelwerke. Ziel der begleitenden modellierenden Untersuchungen war es darüber hinaus, ein verbessertes Verständnis für die einzelnen Abscheidebeiträge zu gewinnen.

Zu diesem Zweck wurden Effizienz und Druckverlust unterschiedlicher Kassettenfilter im Neuzustand und nach Nutzung in Gasturbinenanlagen bestimmt. An den Filtern aus Betriebsanlagen erfolgte eine Bestimmung der Elementzusammensetzung der abgeschiedenen Partikel mittels Massenspektrometrie und energiedispersiver Röntgenanalytik (EDX-Analysen). An neuen und beladenen konfektionierten Filtern wurde an einem Prüfstand nach EN 779 der Einfluss einer Feuchtevariation auf die Leistungsdaten untersucht. Weiterhin wurde die Vermeidung von Wassertropfenschlag durch vorgeschaltete Tropfenabscheider experimentell untersucht. Hierzu wurde die Abscheidecharakteristik von Koaleszern bei unterschiedlichen Beaufschlagungsmengen untersucht.

Im Rahmen des Projektes wurde ein Prüfstand aufgebaut und in Betrieb genommen, der schnelle Wechsel der Bedingungen, wie beispielsweise hohe oder niedrige Feuchten, und den Einsatz unterschiedlicher Beladungs-aerosole erlaubt. Untersucht wurden hauptsächlich Druckverluste und Abscheideeffizienzen von Filtermedien in verschiedenen Beladungs- oder Konditionierungszuständen. Die Medien entsprachen der Filterklasse E12, wobei sich auf Glasfaser-, funktionalisierte Glasfaser- und Membranmedien beschränkt wurde. Sowohl bei zwei als auch bei acht cm/s Anströmgeschwindigkeit wurden mit unterschiedlichen Beladungs-aerosolen und bei Variation der Feuchte Druckverluste aufgenommen und Retentionen poly- und monodisperser Aerosolbeaufschlagung bestimmt. Des Weiteren wurden mögliche Fehlerquellen diskutiert und eine Literaturrecherche zur Deliqueszenzfeuchte von NaCl durchgeführt. Nach Erweiterungen des Prüfstandes wurde die Beeinflussung der Medien in Folge von Tropfenschlag untersucht und ein Vergleich mit einem zertifizierten Prüfinstitut vorgenommen. REM-Bilder lieferten gute Einblicke in die Umstrukturierung von NaCl durch Feuchtevariation oder Tropfenbeaufschlagung. Basierend auf den Ergebnissen und Erfahrungen, die im Laufe der Projektlaufzeit gesammelt wurden, wurde der Prüfvorschlag von Wilcox und Poerner [1] kritisch hinterfragt und Vorschläge für eine geeignete Prüfprozedur erarbeitet.

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse können durch den Projektleiter der FS 1 unmittelbar in das entsprechende Normungsgremium eingebracht werden. Vorgeschlagen wird, dass für eine Filterprüfung standortabhängig jeweils relevante Basis-Tests ausgewählt werden.

Eine Filterprüfung, die sich näher am Realeinsatz der Filter orientiert, wird es den Medien- und Filterherstellern ermöglichen, ihre Produkte gezielt auf den Anwendungsfall hin zu optimieren. Darüber hinaus profitieren Unternehmen, die Produkte für den Bereich der Filterprüfung anbieten, von den Erkenntnissen des IGF-Projektes.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

3 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

3.1 Ausgangssituation

Gasturbinenfilter haben die Aufgabe die Zuluft von Partikeln zu befreien, da durch unzureichendes Abscheideverhalten langfristige Beschädigungen und Ausfallzeiten drohen. Neben der Zurückhaltung von Partikeln ist das zweite Gütekriterium der durch die Filter sowohl im Neu- als auch im beladenen Zustand verursachte Druckverlust. Je geringer dieser ist, umso größer ist der energetische Wirkungsgrad der Gasturbine. Bisher werden Gasturbinenfilter anhand von gängigen Industrie-Richtlinien und Normen (ASHRAE 52.2: 2007 [2], EN 779: 2012 [3], EN 1822: 2011 [4] oder EUROVENT [5]) klassifiziert, von denen jedoch keine den Einfluss von hoher Luftfeuchtigkeit oder Wassertröpfchen in der Zuluft erfasst. Auch wasserlösliche Verunreinigungen, wie beispielsweise Salzpartikel bei offshore Anlagen, werden bei den aktuellen Prüfungen nicht berücksichtigt. So sind unter anderem die Vorgaben für die Durchführung von Tests in der DIN EN 779 [3] hinsichtlich der klimatischen Randbedingungen recht unspezifisch. Für den Luftvolumenstrom bei der Prüfung kann Außen- oder Raumluft verwendet werden, es liegen keine Vorgaben bzgl. der Temperatur vor und die relative Feuchte soll kleiner als 75 % sein, ein Wert, den die Außenluft an vielen Standorten an bis zu 70 % der Tage eines Jahres überschreitet.

Ein erster Vorschlag für eine Prüfprozedur, die auch flüssige und wasserlösliche Verunreinigungen erfasst, wurde von Wilcox und Poerner [1] erarbeitet. Die Prozedur beinhaltet dabei Tests bei unterschiedlichen Feuchten, sowie die Zugabe von Salz in trockener und gelöster Form. Untersuchungen zum Betriebsverhalten von Luftfiltern für Gasturbinen und raumlufftechnischen Anlagen bei realitätsnaher Variation der Luftfeuchte oder bei Anwesenheit von Wassertröpfchen sind bislang nicht bekannt. Praxisrelevante Prüfverfahren zur Ermittlung von Wirkungsgraden oder zur Bestimmung der Staubspeicherkapazität sind ebenfalls nicht vorhanden. Es existieren bisher weder nationale noch internationale Normen, die es ermöglichen, den Einfluss der Luftfeuchte und etwaiger Tröpfchen auf die Filtration in der Bandbreite der Einsatzbedingungen von Gasturbinenfiltern adäquat abzubilden.

3.2 Problemstellung

Die Hersteller von Filtern bieten nach gültigen Normen zertifizierte und qualitätsgeprüfte Produkte an. Die Auswahl von Gasturbinenfiltern allein anhand der gängigen Industrie-Richtlinien und Normen ist allerdings problematisch, da keiner dieser Regelwerke den Einfluss von Wasser oder wasserlöslichen Verunreinigungen berücksichtigt und so das Verhalten im Realbetrieb durch die Normen nicht angemessen abgebildet wird.

Eine unzureichende Filtration der Zuluft hat jedoch gravierende Folgen für die Turbine, wie Erosion, Fouling oder Korrosion, wie u.a. die Autoren Brumbaugh [6], Sennett [7] und Sutherland [8] beschreiben. In zahlreichen Veröffentlichungen (u.a. Loud und Slaterpryce [9], Sutherland [8], Wilcox und Poerner [1], Kurz und Brun [10]) sind die negativen Einflüsse von Luftverunreinigungen auf Gasturbinen dokumentiert. Im Hinblick auf partikuläre Bestandteile wird dabei eine maximale Partikelgröße von $3,5 \mu\text{m}$ und eine maximale Massenkonzentration der Partikel in der Zuluft mit $3,5 \text{ mg/m}^3$ i. N. gefordert (Förster und Neumann [11]). Insbesondere das große Schädigungspotential von Salzaerosolen wird von Loud und Slaterpryce [9] und Wilcox und Poerner [1] hervorgehoben.

4 Forschungsziel / Lösungsweg / Ergebnisse

Ziel des Vorhabens war es, aufbauend auf vorhandenen Normen und Richtlinien eine neue Prüfmethode zu entwickeln, die die Leistungsparameter von Gasturbinenfiltern und anderen Filtersystemen mit ähnlichen Randbedingungen möglichst praxisnah beschreibt.

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde eine Beaufschlagung mit Beladungs-aerosolen und Wassertröpfchen bei sich ändernden Umgebungsbedingungen im Labor simuliert. Hierzu wurden an der Forschungsstelle 1 Versuche an Medien und an Forschungsstelle 2 Versuche an unterschiedlichen Filterelementen durchgeführt. Die Beladung der Filtermedien erfolgte mit Salzen und Prüfstaub, die der Filterelemente einerseits mit Prüfstäuben, andererseits aber auch vor Ort unter realen Bedingungen.

Ziel der begleitenden modellierenden Untersuchungen war es, ein verbessertes Verständnis für die Prozesse während einer Beladung mit Stäuben und Salzen bei sich ändernden Randbedingungen zu erzielen. Die Abscheidung wurde zunächst mit einzelfaserbasierten Modellen berechnet, dabei ist aufgrund der überwiegend zur Anwendung kommenden Glasfasermedien die Elektrophorese für diesen Anwendungsbereich nicht der dominierende Mechanismus. Über die Berechnung der Leistungsparameter von Medien hinaus, wurde auch die numerische Berechnung für Filterpatronen durchgeführt.

4.1 Druckverlust- und Effizienzmessungen an konfektionierten Filtern im Neuzustand und nach Nutzung in Gasturbinenanlagen

Die Druckverlust- und Effizienzmessungen an konfektionierten Filterelementen werden am Normprüfstand nach DIN EN 779 (Abbildung 4.1-1) durchgeführt. Der Prüfstand ist mit Klimakomponenten ausgestattet, so dass Temperatur und Feuchte über einen weiten Bereich variiert werden können. Es besteht die Möglichkeit, eine Temperatur zwischen 15 °C und 40 °C einzustellen und eine relative Feuchte von 15 % bis 95 % vorzugeben. Als Test- bzw. Beladungs-aerosole können mittels Flüssigkeitszerstäuber oder Feststoffdispersierender DEHS-Partikel (Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat), Salzpartikel aus Lösungen (z. B. NaCl, KCl) und andere Feststoffpartikel (z. B. A2-Staub) in den Prüfkanal eingebracht werden



Abbildung 4.1-1: Prüfkanal nach DIN EN 779 an der Forschungsstelle 2.

Am Prüfkanal nach DIN EN 779 wurden Druckverlust und Fraktionsabscheidegrad mit DEHS-Partikeln an Filterelementen, welche eine Beladungshistorie und wechselnde Klimabedingungen im Realeinsatz in Zuluftanlagen von Gasturbinen erfahren haben, ermittelt. Zu Vergleichszwecken wurden baugleiche Filterelemente im Neuzustand vermessen. Diese Elemente stammen allerdings nicht aus der gleichen Produktionscharge wie die beladenen Filter.

Die mit Außenluft beladenen Filterelemente aus dem Realeinsatz stammen aus Anlagen von drei unterschiedlichen Standorten (**Tabelle 4.1**). Bei den Filterelementen handelt es sich um Kassettenfilter der Filterklassen F8, E10 und E11. Von den Anlagenbetreibern wurde die Einsatzdauer der einzelnen Filter angegeben, ansonsten ist die Beladungshistorie weitgehend unbekannt.

Tabelle 4.1: Übersicht der Anlagenstandorte.

1	Südostasien	küstennaher Standort	tropisches Klima
2	Mitteleuropa	Binnenland	gemäßigt feuchtes Kontinentalklima
3	Westeuropa	küstennaher Standort	gemäßigt feuchtes Kontinentalklima

Zur Beurteilung der klimatischen Bedingungen während der Betriebszeit der Filter werden in Abbildung 4.1-2, Abbildung 4.1-4 und Abbildung 4.1-6 die langjährigen Temperatur- und Niederschlagsverläufe an den einzelnen Standorten dargestellt. Aus der Anlage am Standort 1, an dem von Mai bis Dezember ein feuchtes tropisches Klima herrscht (Abbildung 4.1-2), wurden Filter der Klasse F8 und E11 untersucht. Die Kassettenfilter der Klasse F8 haben eine Filterfläche von ca. 25 m² und wiesen eine Betriebsdauer von ca. 16.000 h auf. Die Filter der Klasse E11 haben eine Filterfläche von ca. 34 m² und eine Betriebsdauer von 12.000 h.

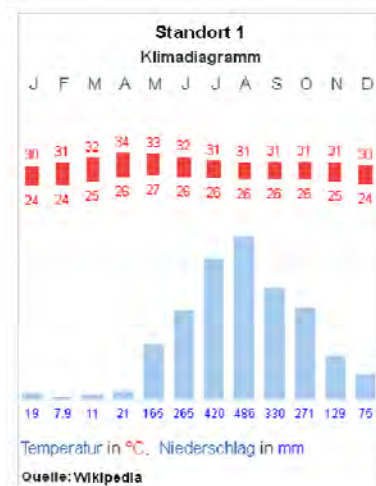


Abbildung 4.1-2: Langjährige Temperatur- und Niederschlagsverläufe am Standort 1

Für den F8-Filter sind in Abbildung 4.1-3 im linken Diagramm der Druckverlust des gebrauchten Filters aus der Anlage und der eines baugleichen neuen Filters dargestellt. Der gebrauchte Filter hat bei 3.400 m³/h einen Druckverlustanstieg von 30 Pa gegenüber dem neuen Filter. Die DEHS-Effizienzen eines neuen und des gebrauchten Filterelements weisen keinen Unterschied auf (Abbildung 4.1-3, rechtes Diagramm).

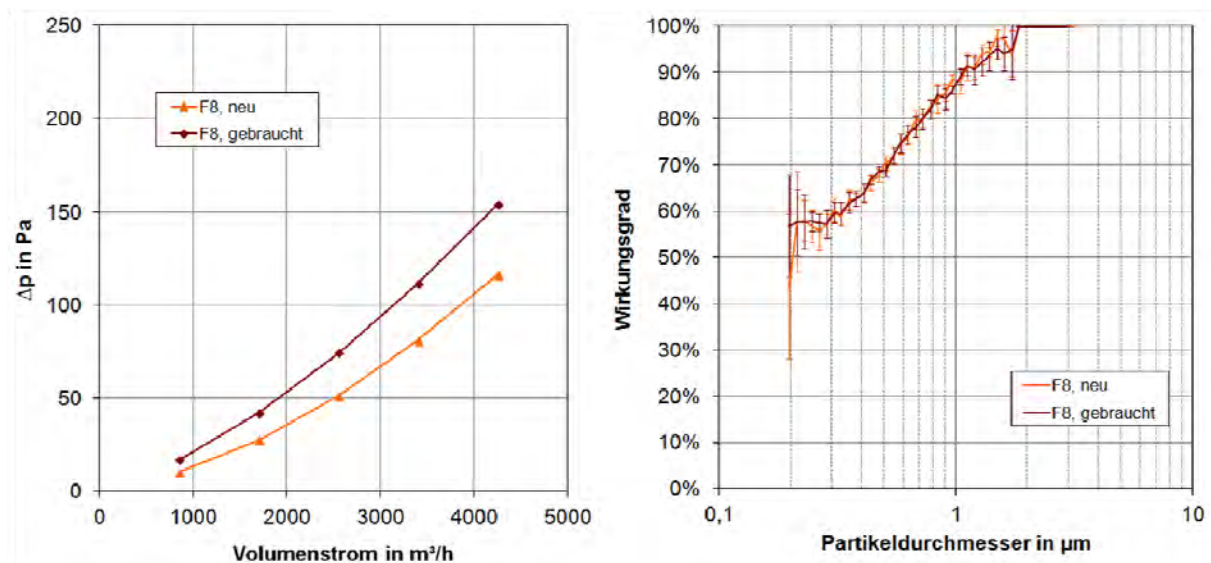


Abbildung 4.1-3: F8-Kassettenfilter: Druckverlust und Wirkungsgrad, neu und gebraucht Standort 1

Der Standort 2 liegt in Mitteleuropa mit einem gemäßigt feuchten Kontinentalklima, der meiste Niederschlag fällt im Sommerhalbjahr, während das Winterhalbjahr verhältnismäßig trocken ist.

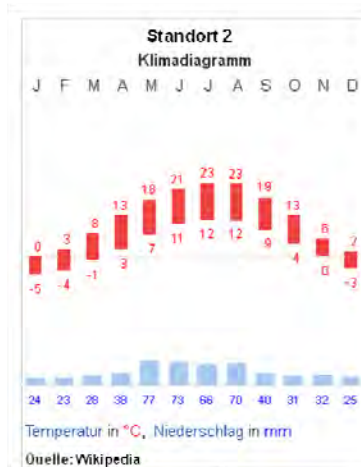


Abbildung 4.1-4: Langjährige Temperatur- und Niederschlagsverläufe am Standort 2

Die in der Anlage eingesetzten F8-Kassettenfilter haben eine Filterfläche von ca. 18 m² und wiesen eine Betriebsdauer von ca. 8.300 h auf.

Wie man dem linken Diagramm in Abbildung 4.1-5 entnehmen kann, führte der Einsatz in der Realanlage zu einem Druckverlustanstieg von 38 Pa bei 3.400 m³/h. Die Wirkungsgradkurven eines neuen baugleichen Filters und des gebrauchten Filters unterscheiden sich nicht signifikant (rechtes Diagramm).

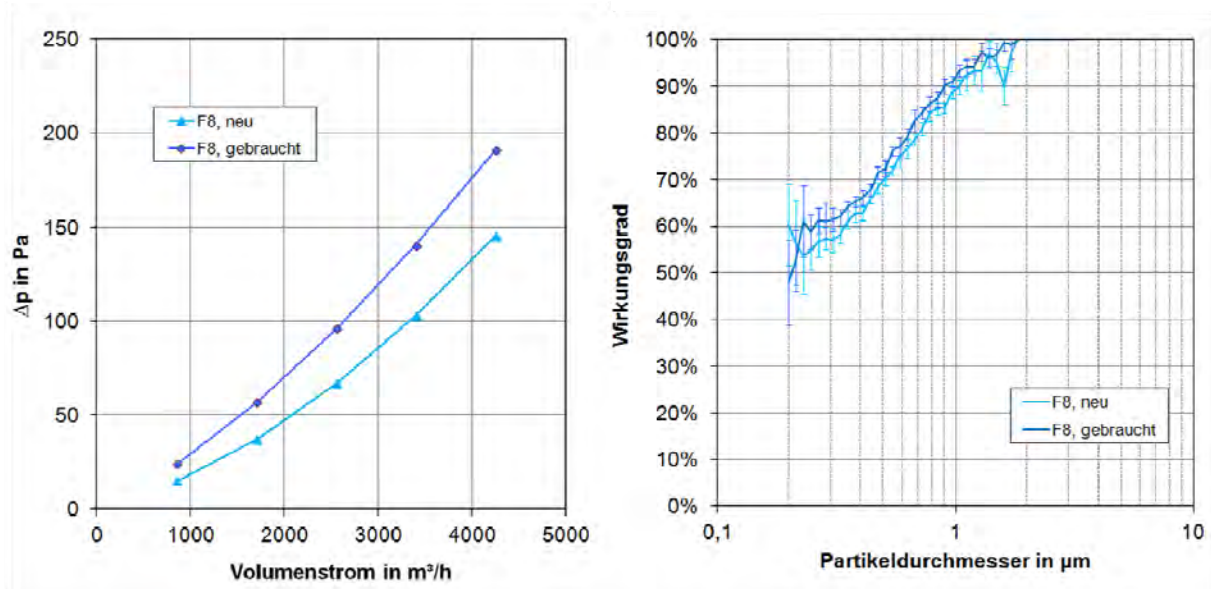


Abbildung 4.1-5: F8-Kassettenfilter: Druckverlust und Wirkungsgrad, neu und gebraucht Standort 2

Am küstennahen Standort 3 in Mitteleuropa herrscht gemäßigt feuchtes Kontinentalklima. Die Niederschläge in den Wintermonaten sind hier höher als in den Sommermonaten (Abbildung 4.1-6).

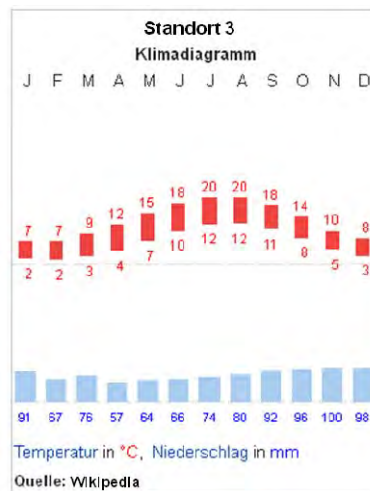


Abbildung 4.1-6: Langjährige Temperatur- und Niederschlagsverläufe am Standort 3

Die in der Anlage eingesetzten Kassettenfilter der Klasse E10 mit einer Filterfläche von ca. 31 m² haben nach einer Betriebsdauer von ca. 13.000 h einen Druckverlustanstieg von 17 Pa bei 3.400 m³/h gegenüber baugleichen neuen Filtern erfahren (Abbildung 4.1-7). Die Fraktionsabscheidegradkurve des Filters aus der Realanlage (Abbildung 4.1-7, rechtes Diagramm, rote Kurve) liegt unterhalb der eines neuen baugleichen Filters.

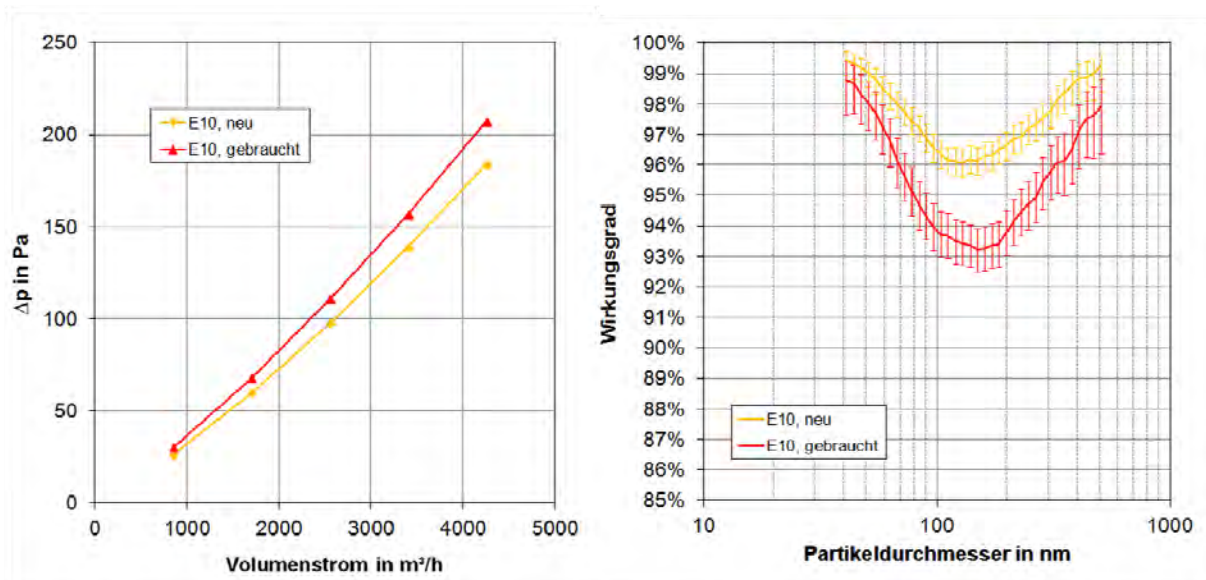


Abbildung 4.1-7: E10-Kassettenfilter: Druckverlust und Wirkungsgrad, neu und gebraucht Standort 3

Die mit Außenluft beladenen Filterelemente aus dem Realeinsatz haben an allen betrachteten Standorten einen Anstieg des Druckverlusts erfahren. Der Fraktionsabscheidegrad

verschlechtert sich jedoch nur an Standort 3 signifikant nach dem Realeinsatz, wohingegen bei den anderen beiden Standorten kaum ein Unterschied zu sehen ist.

4.2 Chemische Analyse der abgeschiedenen Partikel auf Filtern aus dem Realbetrieb und Vergleich mit Immissionsdaten

An ausgewählten Filtern aus den Zuluftanlagen von Gasturbinen erfolgte eine Bestimmung der Elementzusammensetzung der abgeschiedenen Partikel mittels induktiv gekoppelten Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS), induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES) und Flüssigkeits-Ionenchromatographie.

Analysiert wurden die Proben nach folgenden Normen:

- DIN EN ISO 17294 (ICP-MS) [12]: Schwermetalle;
- DIN EN ISO 11885 (ICP-OES) [13]: Alkali-, Erdalkalimetalle, Al;
- DIN EN ISO 10304 (Ionenchromatographie) [14]: Anionen.

Für die chemische Analyse wurden Filter der Standorte 2 und 3 präpariert, da von diesen jeweils zwei Filterelemente vorhanden waren. Von Standort 1 wurde nur ein Element geliefert, welches für die Untersuchungen des Verhaltens bei Feuchtevariation benötigt wurde. Aus den gebrauchten F8-Kassettenfiltern vom Standort 2 und den E10-Kassettenfiltern vom Standort 3 wurden aus den Filterpaketen der Filter je drei Proben ausgeschnitten. Diese Proben wurden in 500-ml-Glasflaschen (eine Probe je Flasche) gegeben und mit VE-Wasser aufgefüllt. Die Flaschen wurden dann mehrere Tage stehen gelassen und täglich mindestens einmal geschüttelt. Um die Zahl der zu analysierenden Proben zu reduzieren, wurden jeweils die Eluate der drei Proben eines Filters vereinigt. Die Eluate wurden filtriert und jeweils ca. 50 ml des Filtrats analysiert. Mit der Blindprobe (nur VE-Wasser) wurde in gleicher Weise verfahren.

Die Eluate wurden auf die Inhaltsstoffe Chlorid, Nitrat, Sulfat, Natrium, Magnesium, Aluminium, Kalium, Calcium, Eisen und Kupfer analysiert. Um zu beurteilen, welcher Anteil der Inhaltsstoffe von den abgeschiedenen Partikeln herrührt, wurden von baugleichen Filtern im Neuzustand ebenso Eluate hergestellt (Abbildung 4.2-1).

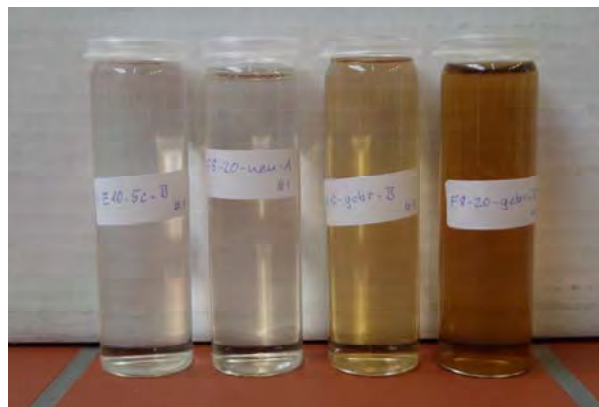


Abbildung 4.2-1: Eluate: neue E10- und F8-Filter / E10- und F8-Filter aus dem Realeinsatz (Standort 3 und 2)

Die in den Eluaten gelösten Inhaltsstoffe werden als Konzentrationswerte in mg/L angegeben. In den Abbildung 4.2-2 und Abbildung 4.2-3 sind die durch Differenzbildung von beladenem und unbeladenem Filter berechneten Inhaltsstoffe der abgeschiedenen Partikel dargestellt.

In den F8-Filtern aus der Anlage am Standort 2 (Mitteleuropa, Binnenland) wurden Partikel abgeschiedenen, die überwiegend aus Nitraten (NO₃) und Sulfaten (SO₄) bestehen (Abbildung 4.2-2). Nitrate und Sulfate sind Sekundäraerosole, die aus den Vorläufersubstanzen Stickstoffoxid und Schwefeldioxid gebildet werden [15], [16]. Der größte Anteil der Schwefelverbindungen in der Atmosphäre stammt aus Kraftwerken, Industrie und Haushalten. Die höchsten Konzentrationen an Schwefeldioxid findet man über den Kontinenten der nördlichen Hemisphäre [15].

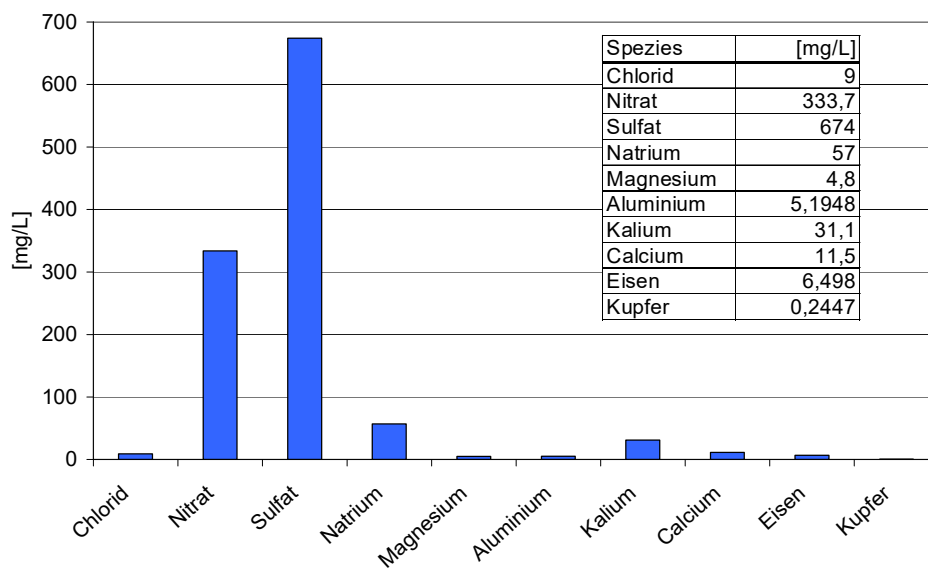


Abbildung 4.2-2: Inhaltsstoffe abgeschiedener Partikel im Eluat der F8-Filter (Standort 2)

In den im E10-Filter abgeschiedenen Partikeln am Standort 3 (Westeuropa, küstennaher Standort) sind ebenfalls hohe Anteile an Nitraten und Sulfaten enthalten (Abbildung 4.2-3). Das am küstennahen Standort vorhandene Seesalz führt zu höheren Chlorid- und Natriumgehalten in den abgeschiedenen Partikeln.

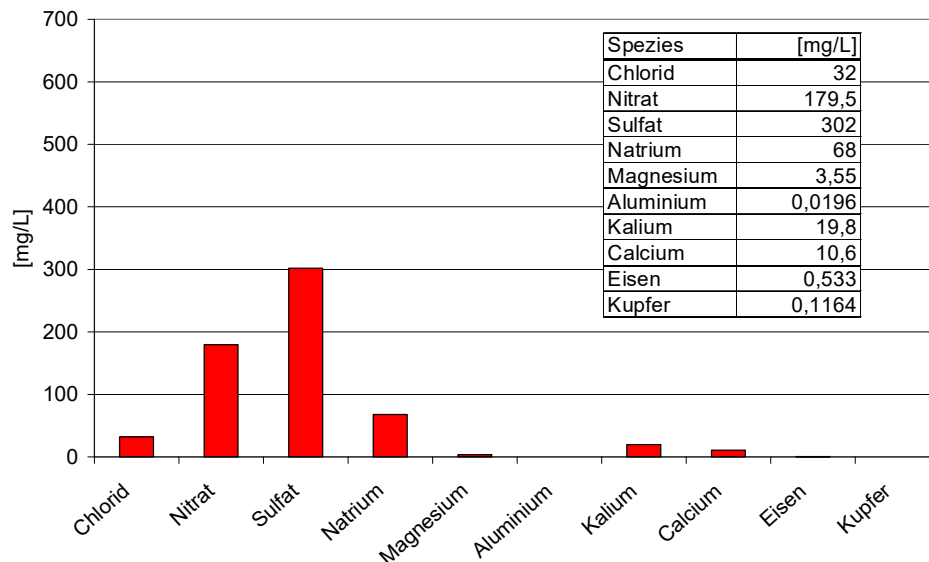


Abbildung 4.2-3: Inhaltsstoffe abgeschiedener Partikel im Eluat der E10-Filter (Standort 3)

Die Analysen zeigen, dass auch Filter, die an küstenfernen Anlagenstandorten eingesetzt werden, mit einer hohen Salzfracht beaufschlagt werden. Daher ist es sinnvoll, bei einer Prüfmethode für Gasturbinenfilter immer auch ein Beladungs-aerosol zu verwenden, welches aus Salzpartikeln besteht.

4.3 Bestimmung der Leistungsdaten von Filtermedien und Filterelementen bei Variation der Feuchte und Verwendung unterschiedlicher Beladungs-aerosole

4.3.1 Filtermedien

Prüfaufbau, Geräte und Stoffe

Um die Auswirkung einer Beladung durch Außenluft vergleichen zu können, wurden Versuche mit unterschiedlichen Beladungs-aerosolen durchgeführt. Dazu wurde für eine schnellere Abfolge der Messreihen an der Forschungsstelle 1 ein mobiler Prüfaufbau errichtet. Dieser orientiert sich an der DIN EN 1822:3-2011 [4] (Anordnung zur Prüfung mit monodispersen Prüfaerosol). Abbildung 4.3-1 zeigt den schematischen Aufbau.

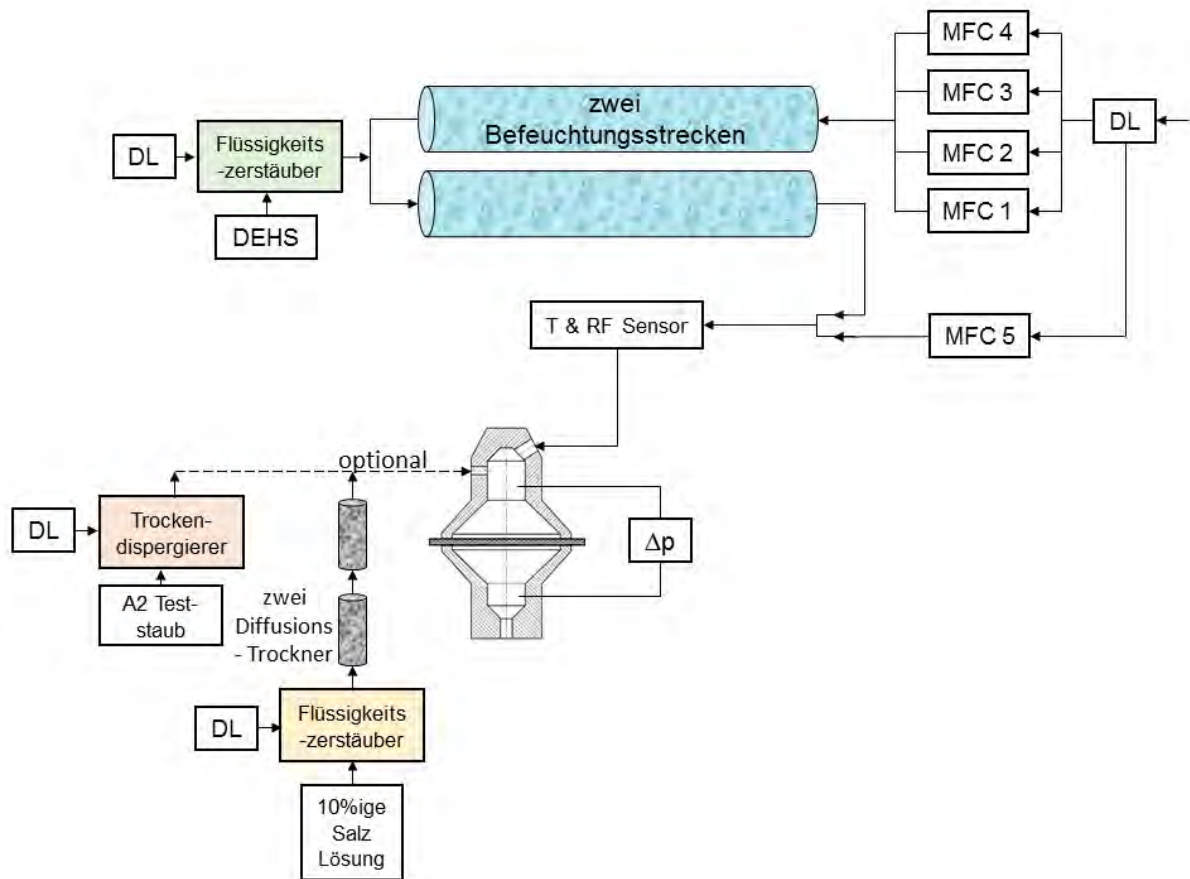


Abbildung 4.3-1: Schematischer Versuchsaufbau an der Forschungsstelle 1.

Der Prüfaufbau erlaubt einen schnellen Wechsel der Bedingungen verknüpft mit unterschiedlichen Beladungen ohne größere Umbaumaßnahmen. Das Filtermedium kann dabei durch die Anordnung wahlweise mit Teststaub und/oder Salz beladen und anschließend mit feuchter Luft konditioniert werden. Die Retention wird mittels roh- und reingasseitigen Messungen berechnet und der Druckverlust über dem Medium durchgehend angezeigt.

Als Beladungs aerosole wurde sich auf NaCl und MgCl_2 konzentriert. Diese Stoffe wurden ausgesucht, weil sie Hauptbestandteile von Seesalz sind und sich ihre Deliqueszenzfeuchten stark unterscheiden ($\text{DRH}_{\text{NaCl}} \approx 75 \% \text{ r.F.}$ und $\text{DRH}_{\text{MgCl}_2} \approx 33 \% \text{ r.F.}$).

Als Test aerosol wurde Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (im Folgenden mit DEHS abgekürzt) verwendet. Dieses wurde aus einem Zerstäubungsprozess mittels einem Aerosolgenerator (AGF) der Fa. Palas bereitgestellt. Die Beladung mit NaCl und MgCl_2 wurde aus der flüssigen Phase ebenfalls durch einen Zerstäuber (AGK) der Fa. Palas zur Verfügung gestellt. Beide Generatoren funktionieren nach dem gleichen Funktionsprinzip, allerdings unterscheiden sie sich durch den Werkstoff der Düse. Die des AGF ist aus Edelstahl gefertigt, die des AGK aus Kunststoff, damit auch Salzlösung ohne Korrosion verwendet werden können.

Die folgende Abbildung 4.3-2 zeigt die schematische Funktionsweise der Zerstäuber.

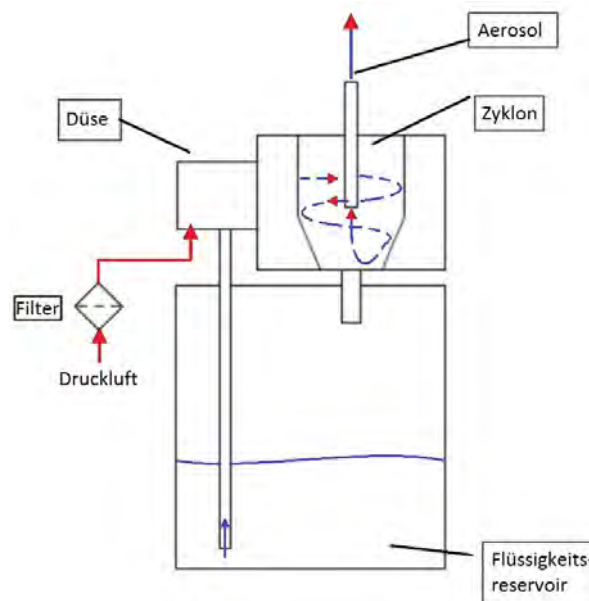


Abbildung 4.3-2: Schema der Aerosolgeneratoren (AGF und AGK) der Fa. Palas.

Die zu vernebelnde Flüssigkeit wird bei diesen Generatoren in einen Vorratsbehälter gefüllt. Über die angeschlossene Druckluft entsteht ein Unterdruck in der Düse, wodurch die Flüssigkeit angesaugt wird. Das vernebelte Aerosol strömt in einen Zyklon, in dem größere Partikel abgeschieden werden und ins Reservoir zurücklaufen. Über ein Tauchrohr verlässt das Aerosol dann den Zyklon. Die Partikelgröße ist dabei abhängig von eingestellten Düsenvordruck und somit vom Massenstrom.

Auch die Beladung mit Teststaub in Anlehnung an DIN EN 779 [3] wurde teilweise im Rahmen dieses Projektes untersucht. Der dazu verwendete Teststaub A2 fine nach ISO 12103-1 [17] wurde mittels eines rotierenden Bürstengenerators bereitgestellt. Die Funktionsweise des RBG ist in Abbildung 4.3-3 graphisch dargestellt.

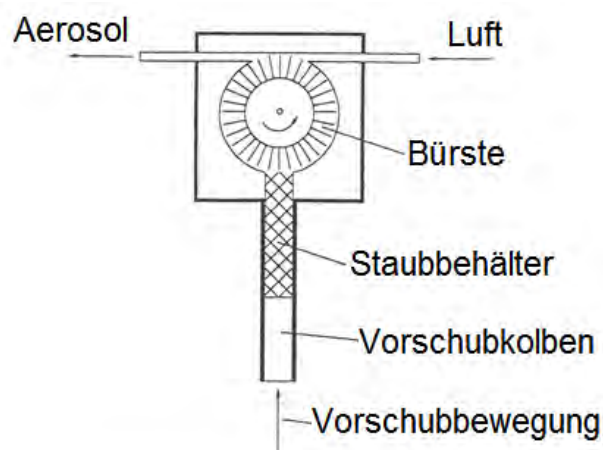


Abb. 2.1: Funktionsprinzip des RBG-1000

Abbildung 4.3-3: Funktionsprinzip des RBG (Fa. Palas).

Der Hohlzylinder (Staubbehälter) wird mit Teststaub befüllt, mittels eines Stopfers verdichtet und nach gravimetrischer Bestimmung der Masse in den RBG eingebaut. Durch einen Vorschubkolben wird eine definierte Menge Staub gegen die rotierende Bürste geleitet, die den Staub aus dem Vorratsbehälter abtrennt und in den partikelfreien Luftstrom dispergiert. Der für die Beladung verwendete Teststaub A2 fine besteht hauptsächlich aus Siliziumdioxidpartikeln. Die folgende Tabelle 4.2 zeigt die kumulierte Volumenverteilung der A2-Partikel nach ISO 12103-1 [17].

Tabelle 4.2: Größenverteilung von A2-Prüfstaub (Auszug aus DIN EN 779 [3]).

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

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

Die Verteilung aller verwendeten Aerosole zeigt die folgende Abbildung 4.3-4.

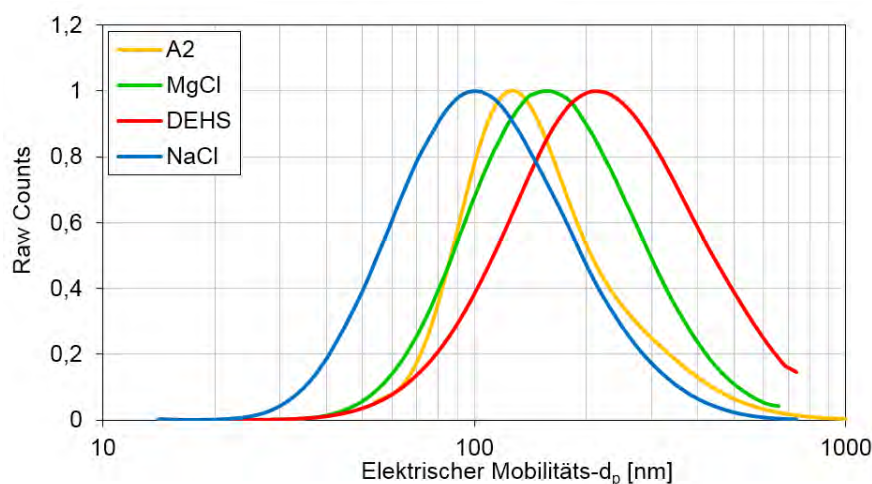
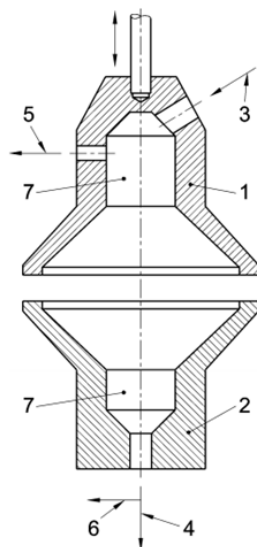


Abbildung 4.3-4: Größenverteilung der verwendeten Aerosole.

Dabei wurde das DEHS durch einen Zerstäuber (AGF), das A2 mittels des Bürstengenerators (RBG) und NaCl und MgCl₂ jeweils aus einer 10 % Lösung mit einem anderen Zerstäuber (AGK) bereitgestellt. Das Aerosol, unabhängig von der Art, wird nach der Bereitstellung und evtl. Konditionierung mit Feuchte in den Filterhalter (Abbildung 4.3-5) geleitet.



- 1 Oberteil (beweglich)
- 2 Unterteil (feststehend)
- 3 Eintrittsöffnung
- 4 Austrittsöffnung
- 5 Rohgas-Entnahmestelle
- 6 Reingas-Entnahmestelle
- 7 Druckdifferenzmessstellen



Abbildung 4.3-5: Schema nach DIN EN 1822-3 (links) und Foto der Prüffilteraufnahme (rechts).

Dieser wurde in Anlehnung an DIN EN 1822-3 entworfen und hat eine durchströmbare Fläche von $A = 100 \text{ cm}^2$. Zur Überprüfung des Differenzdrucks über dem Filtermedium ist eine Druckmessdose angeschlossen.

4.3.1.1 Druckverlustmessungen bei Variation der Feuchte

Druckverlustvergleich mit normkonformen FMP

Zur Verifikation des Prüfaufbaus wurden zunächst Druckverlustmessungen mit einem normkonformen Filterprüfstand verglichen. Dazu wurde eine Druckmessblende aus Holz entworfen, die in beide Filterhalter eingebaut und wiederholbar zerstörungsfrei auf ihren Druckverlust überprüft werden kann. Die folgende Abbildung 4.3-6 zeigt die Druckmessblende.



Abbildung 4.3-6: Messblende zur Überprüfung des Druckverlustes.

In Abbildung 4.3-7 ist der Vergleich zwischen dem für dieses Projekt genutzten Prüfaufbau und einem normkonformen Filtermedienprüfstand gezeigt. Es ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Verläufen beider Messreihen für alle Anströmgeschwindigkeiten erkennbar.

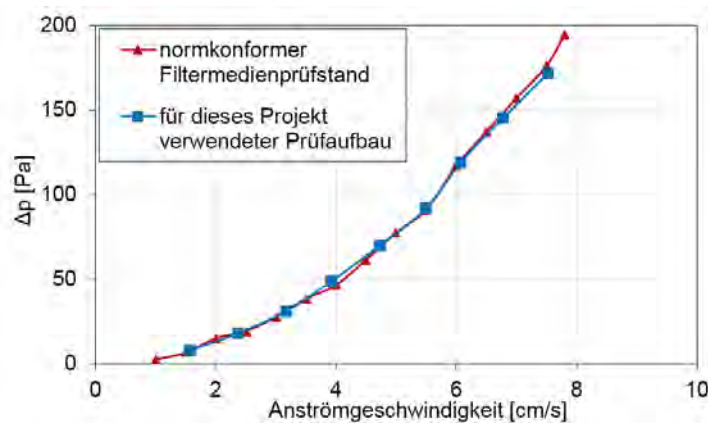


Abbildung 4.3-7: Druckverlustvergleich der Medienprüfstände.

Aufgrund der Gleichförmigkeit der Kurven kann der Prüfaufbau, der im Rahmen dieses Projektes verwendet wurde, als verifiziert angesehen werden.

Druckverlust unbelasteter Medien

An drei neuen, unterschiedlichen Filtermedien-Typen wurden Druckverlust und DEHS-Fraktionsabscheidegrad ermittelt. Hierbei wurden als Versuchsparameter die Anströmgeschwindigkeit und die Feuchte variiert. Für die folgenden Druckverlustkurven wurden die Filtermedien im unbelasteten Zustand einer Feuchtevariation ausgesetzt. Währenddessen wurde der Druckverlust jede Minute abgelesen und die Feuchte erst verändert, wenn der Wert über mehrere Minuten stabil war.

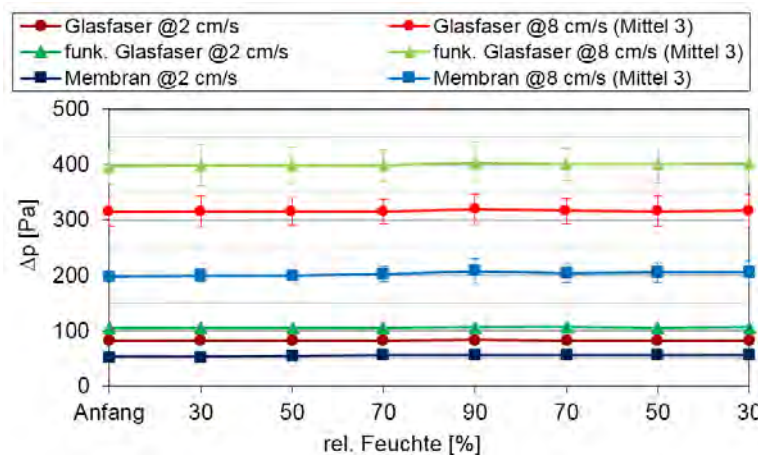


Abbildung 4.3-8: Druckverlust an neuen, unterschiedlichen Filtermedien bei verschiedenen Anström-geschwindigkeiten.

Abbildung 4.3-8 zeigt, dass eine Feuchtevariation an unbelasteten Filtermedien bei einer Anströmgeschwindigkeit von zwei cm/s kaum Einfluss auf den Druckverlust hat, während bei

einer höheren Anströmgeschwindigkeit ein leichter Anstieg bei einer relativen Feuchte von 90 % zu erkennen ist.

Druckverlust NaCl-beladener Medien

Für die folgenden Druckverlustkurven wurden die Filtermedien zunächst mit NaCl beladen und anschließend einer Feuchtevariation ausgesetzt.

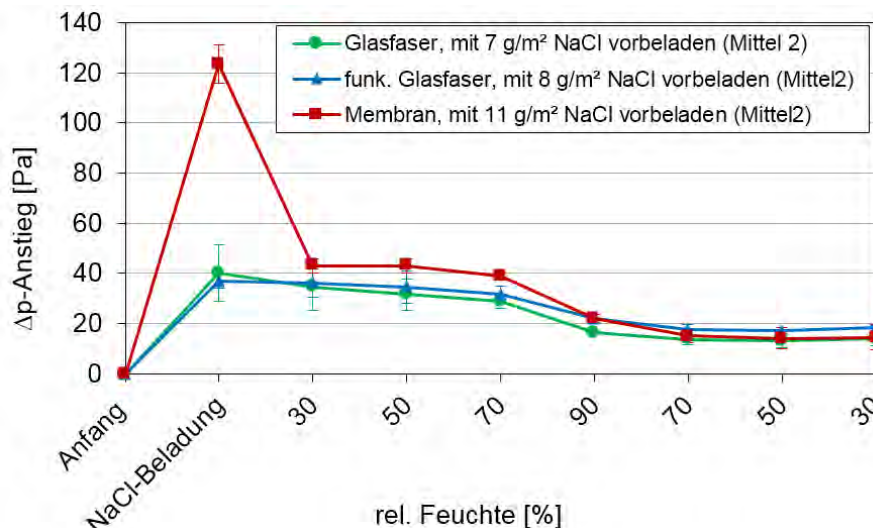


Abbildung 4.3-9: Druckverlust-Anstieg bei zwei cm/s Anströmgeschwindigkeit an NaCl-beladenen Filtermedien bei Variation der Feuchte.

In Abbildung 4.3-9 ist der Druckverlustanstieg unterschiedlicher Filtermedien bei Variation der Feuchte zu sehen. Bei einer Anströmgeschwindigkeit von 2 cm/s fällt der Druckverlust nach Beladung unabhängig von dem Feuchtigkeitswert bis fast auf den Anfangswert ab, wobei der größte Abfall bei der Variation von 70 auf 90 % vorliegt – vermutlich durch das Überschreiten der Deliqueszenzfeuchte (DRH) von $\approx 75\%$.

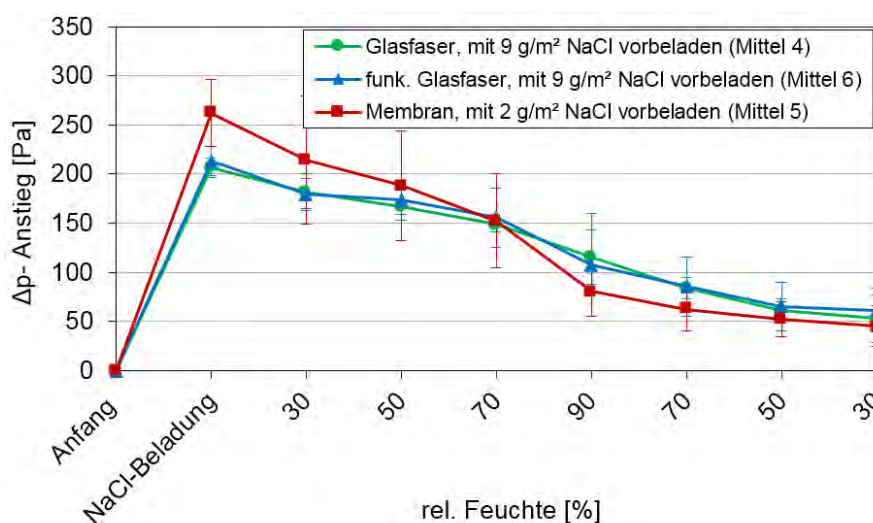


Abbildung 4.3-10: Druckverlust-Anstieg bei acht cm/s Anströmgeschwindigkeit an NaCl-beladenen Filtermedien bei Variation der Feuchte.

Abbildung 4.3-10 zeigt die gleichen Versuche bei einer erhöhten Anströmgeschwindigkeit von acht cm/s. Bei diesen Messreihen wurde versucht durch NaCl-Beladung bei allen Medien den gleichen Druckverlustanstieg zu realisieren, um die Kurven besser vergleichen zu können. Es zeigt sich das gleiche Bild wie bei zwei cm/s, allerdings ist der Abfall für beide Glasfasermedien am Anfang ausgeprägter. Im Laufe der Feuchtevariation weisen die Glasfasermedien einen konstanteren Druckverlustabstieg auf, wohingegen die Variation von 70 auf 90 % relative Feuchte bei dem Membranmedium einen Sprung von ca. 70 Pa hervorruft.

In Abbildung 4.3-11 ist der Druckverlustanstieg der verschiedenen Medien bei einer Anströmgeschwindigkeit von 20 cm/s dargestellt. Diese Ergebnisse resultieren aus Vorversuchen zu diesem Projekt und wurden an einem anderen Prüfstand erarbeitet. Der Prüfstand ist für Messungen nach DIN 71460 [18] für Kfz-Innenraumfilter konzipiert und kann im Gegensatz zu dem mobilen Prüfaufbau auch bei höheren Anströmgeschwindigkeiten betrieben werden.

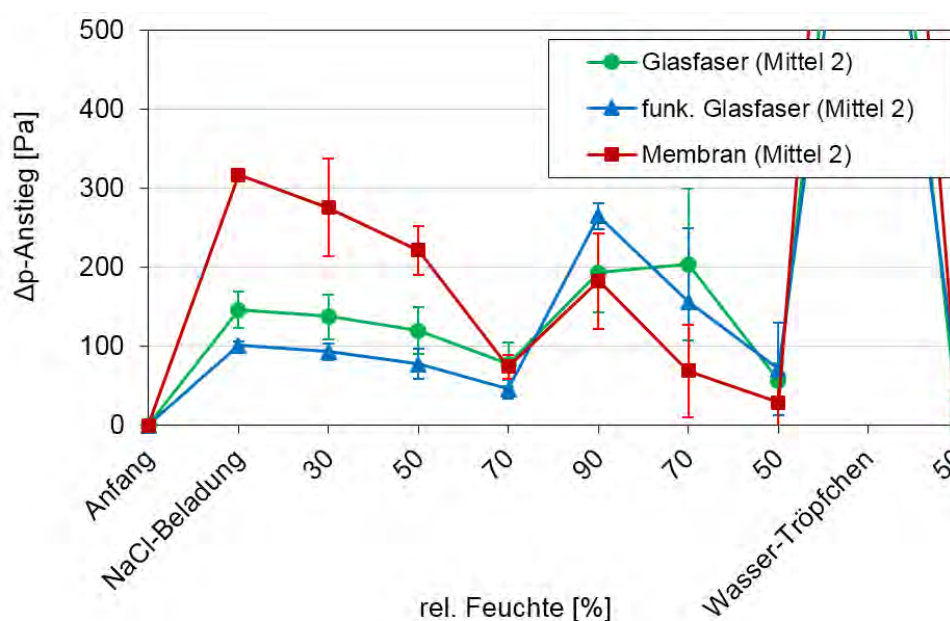


Abbildung 4.3-11: Druckverlust-Anstieg bei 20 cm/s Anströmgeschwindigkeit an NaCl-beladenen Filtermedien bei Variation der Feuchte.

Zu erkennen ist, dass hohe Anströmgeschwindigkeiten zu einem Anstieg des Druckverlustes bei einer relativen Feuchte von 90 % führen. Besonders bei den beiden Glasfasermedien ist ein sprunghafter Anstieg um bis zu 200 Pa (Vgl. funktionalisierte Glasfaser) ersichtlich. Niedrigere Anströmgeschwindigkeiten ergaben bei allen drei Medien einen starken Abfall. Bei anschließender Reduzierung der Feuchte fällt der Druckverlust bei 20 cm/s Anströmgeschwindigkeit wieder auf den Anfangswert. Allein das Glasfasermedium zeigt einen weiteren Anstieg bei Reduzierung der Feuchte von 90 auf 70 %.

Um die Ergebnisse besser interpretieren zu können, wurden weitere Versuche mit verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten durchgeführt. Abbildung 4.3-12 zeigt die Ergebnisse von Messreihen eines Glasfasermediums in dem Prüfkanal für KFZ-Innenraumfilter bei Anströmgeschwindigkeiten von zwei, sechs und 20 cm/s.

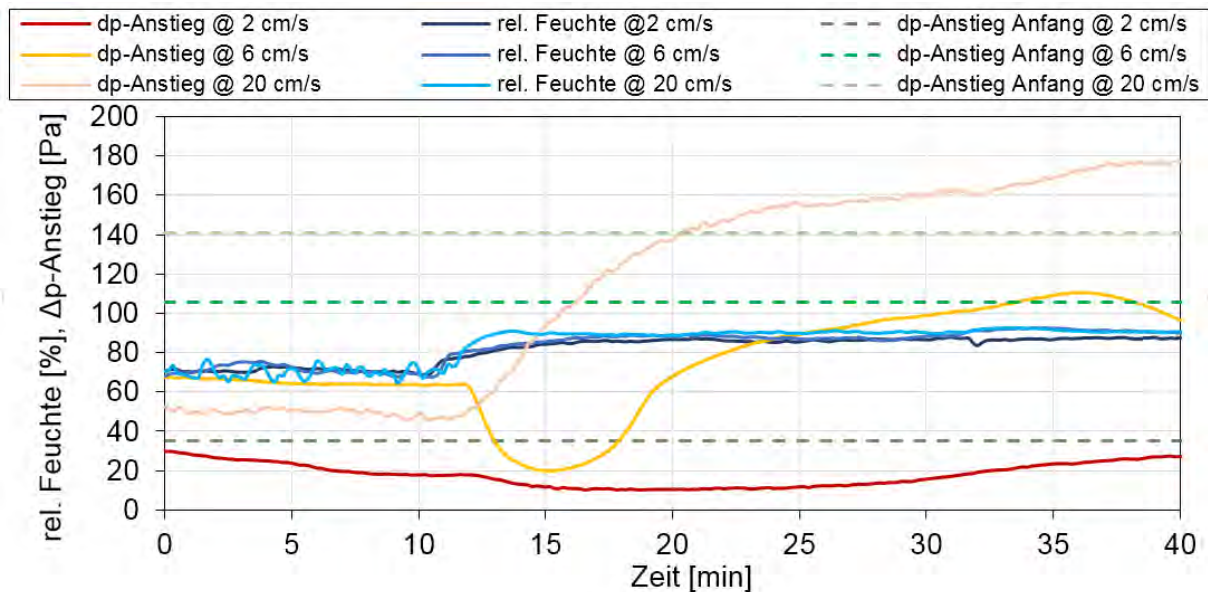


Abbildung 4.3-12: Druckverlust-Anstieg an einem E12-Glasfasermedium bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten.

Hier wird deutlich, dass verschiedene Geschwindigkeiten den Druckverlustanstieg unterschiedlich beeinflussen. Bei niedrigen, realitätsnahen Geschwindigkeiten hat die Feuchtevariation kaum Einfluss auf den Druckverlust, es gibt zwar einen gleichmäßigen Abfall von ca. 20 Pa, allerdings steigt der Wert anschließend genauso gleichmäßig wieder auf den Anfangswert. Im Gegensatz dazu fällt der Druckverlustanstieg bei einer mittleren Geschwindigkeit schnell um mehr als 40 Pa ab, steigt jedoch auch hier anschließend wieder. Im Laufe der Messung wird ein Wert von 20 Pa höher als der Anfangswert erreicht. Bei einer hohen Anströmgeschwindigkeit von 20 cm/s steigt der Druckverlust-Anstieg immer weiter an, ein Grenzwert lässt sich nach über 20 Minuten nicht erkennen.

Obwohl eine Filtrationsgeschwindigkeit von wenigen cm/s in der Praxis der Normalfall ist, sind die Ergebnisse bei hohen Geschwindigkeiten dennoch von Bedeutung, da scheinbar die Kinetik der Partikel beim Überschreiten der DRH für den Druckverlust eine wichtige Rolle spielt und abhängig von der Anströmgeschwindigkeit ist.

Druckverlust $MgCl_2$ -beladener Medien

Bei der Messung des Druckverlustes bei einer Geschwindigkeit von 2 cm/s und einer vorigen Beladung mit $MgCl_2$ zeigten sich die folgenden Verläufe (Abbildung 4.3-13).

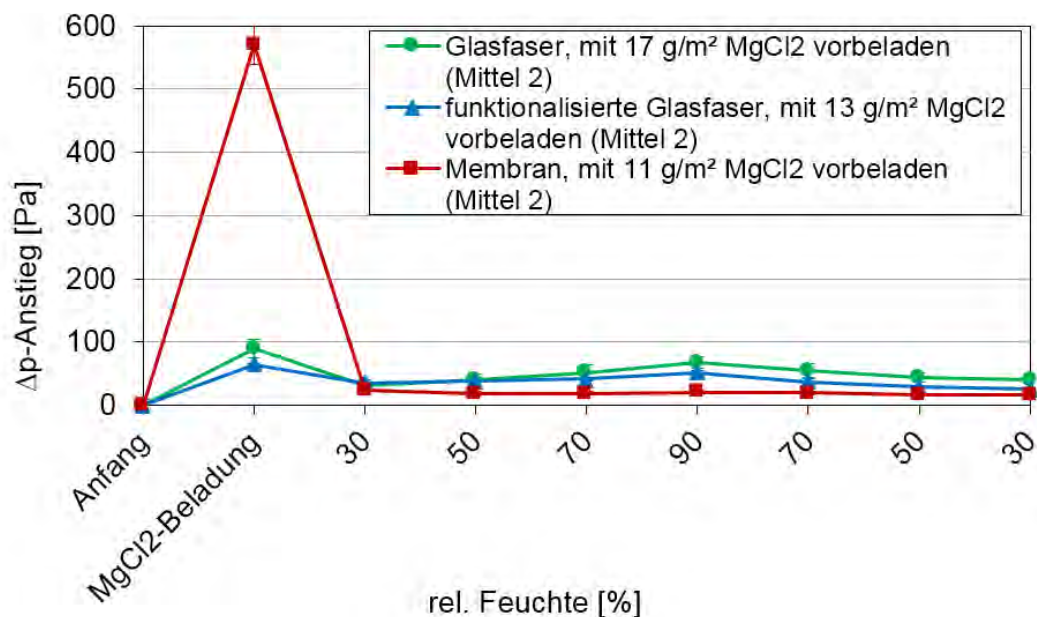


Abbildung 4.3-13: Druckverlust-Anstieg bei zwei cm/s Anströmgeschwindigkeit an MgCl₂-beladenen Filtermedien bei Variation der Feuchte.

Es ist erkennbar, dass vor allem das Membran-Medium durch die Beladung einen deutlichen Anstieg des Druckverlustes erfährt. Sobald die relative Luftfeuchte jedoch auf einen Wert von 30 % eingestellt wird, fällt der Druckverlust wieder deutlich ab und liegt im Bereich der anderen Filtermaterialien. Im Gegensatz zu diesen erfährt das Membran-Medium allerdings keinen Anstieg bei Steigerung bis zu 90 % r.F. und auch keinen erneuten Abfall bei Reduzierung der Feuchte.

Druckverlust A2-beladener Medien

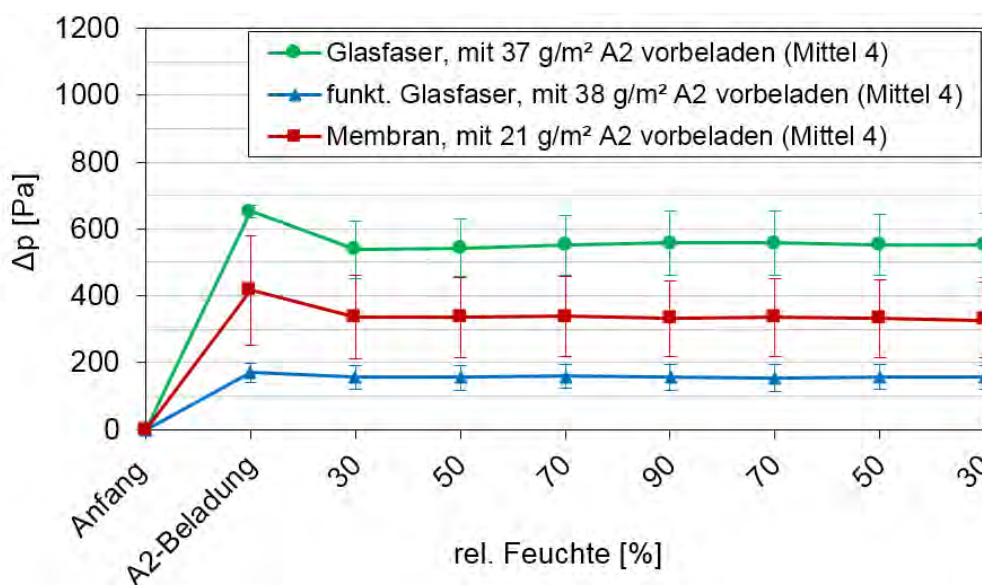


Abbildung 4.3-14: Druckverlust-Anstieg bei acht cm/s Anströmgeschwindigkeit an A₂-beladenen Filtermedien bei Variation der Feuchte.

In Abbildung 4.3-14 sind die Druckverlustkurven für A2-beladene Filtermedien bei einer Anströmgeschwindigkeit von acht cm/s dargestellt. Trotz unterschiedlich hoher Werte im beladenen Zustand ist erkennbar, dass sowohl das Glasfaser- als auch das Membranmedium einen Abfall nach A2-Beladung erfahren und danach einen relativ konstanten Verlauf aufweisen. Das funktionalisierte Glasfasermedium zeigt diesen ersten Abfall nur minimal ausgeprägt. Außerdem zeigt der Verlauf des standardmäßigen Glasfasermediums einen leichten Anstieg zwischen 30 und 90 % relativer Feuchte. Des Weiteren sind die Fehlerindikatoren des Glasfaser- und des Membranmediums deutlich stärker ausgeprägt als die des funktionalisierten Glasfasermediums.

4.3.1.1.1 Vergleich der Druckverluste

Bei zwei cm/s

Im folgenden Diagramm sind die Verläufe des Druckverlustes des Glasfaser-Mediums dargestellt.

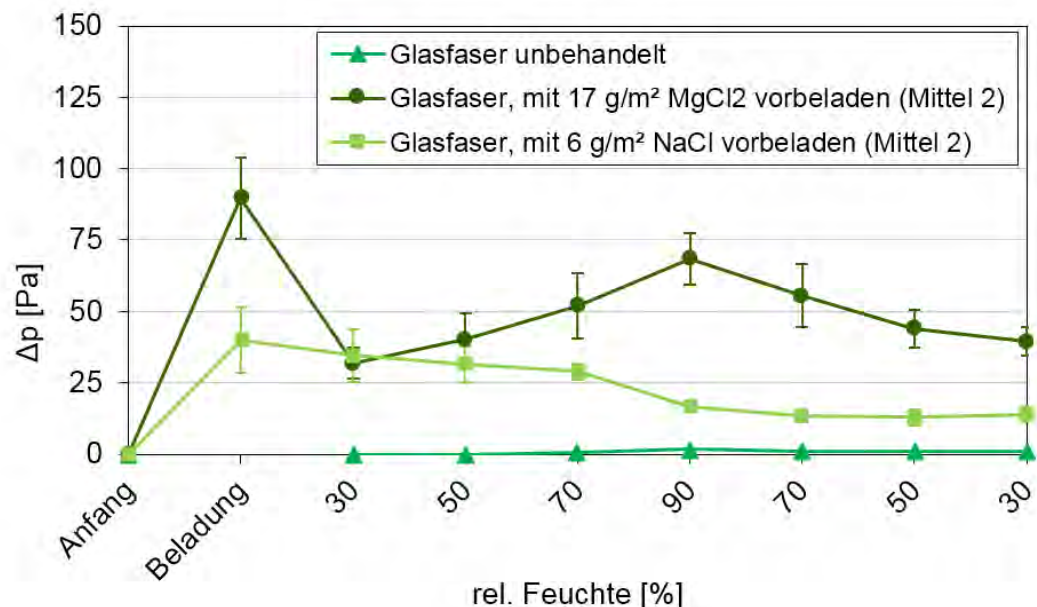


Abbildung 4.3-15: Druckverlustverlauf des Glasfaser-Mediums bei zwei cm/s.

Erkennbar ist, dass das unbehandelte Medium nur einen minimalen Anstieg bei einer relativen Luftfeuchte von 90 % aufweist, beide beladenen Medien hingegen werden von der Feuchtevariation deutlicher beeinflusst. Das Medium mit NaCl-Fracht zeigt einen konstanten Abfall über den gesamten Feuchtigkeitsbereich mit einem leichten Sprung beim Übergang von 70 zu 90 %, wohingegen der Druckverlust des MgCl₂-beladenen Mediums bis zu dem maximalen Feuchtwert von 90 % immer weiter ansteigt und danach wieder fast auf den Anfangswert abfällt. Im folgenden Diagramm sind die Verläufe des funktionalisierten Glasfasermediums abgebildet.

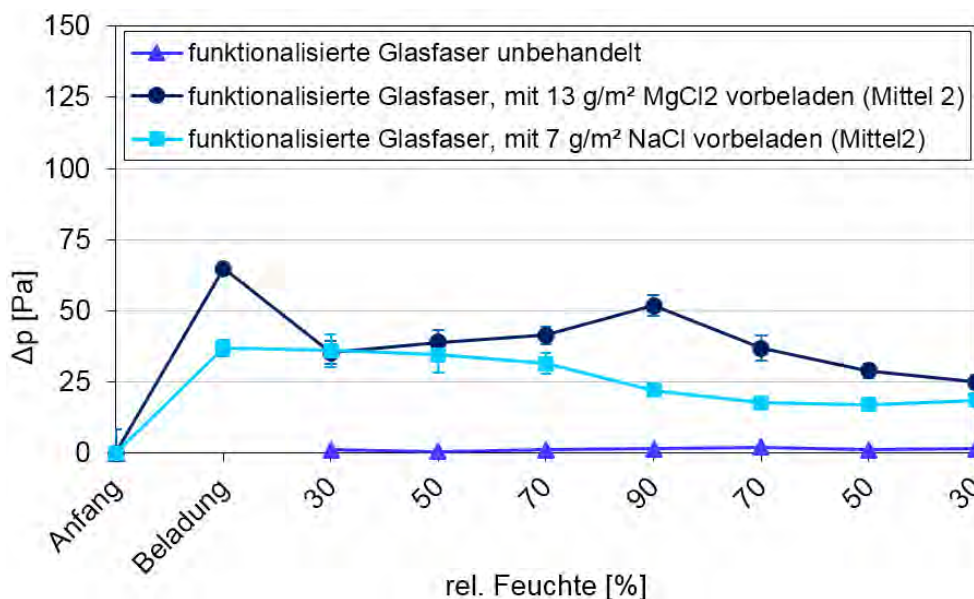


Abbildung 4.3-16: Druckverlustverlauf des funktionalisierten Glasfaser-Mediums bei zwei cm/s.

Auch hier zeigt sich die gleiche Tendenz wie bei dem vorigen Medium. Im unbeladenen Zustand zeigt das Medium lediglich einen Druckverlust-Anstieg von einigen wenigen Pascal. Wird das Medium vorher mit MgCl₂ beladen, steigt der Druckverlust bis zu einem Feuchtigkeitswert von 90 % r.F. an und fällt anschließend wieder. Bei einer Beladung mit NaCl hingegen fällt der Druckverlust stetig ab. Auch bei diesem Medium ist der sprunghafte Abfall beim Übergang von 70 auf 90 % r.F. erkennbar.

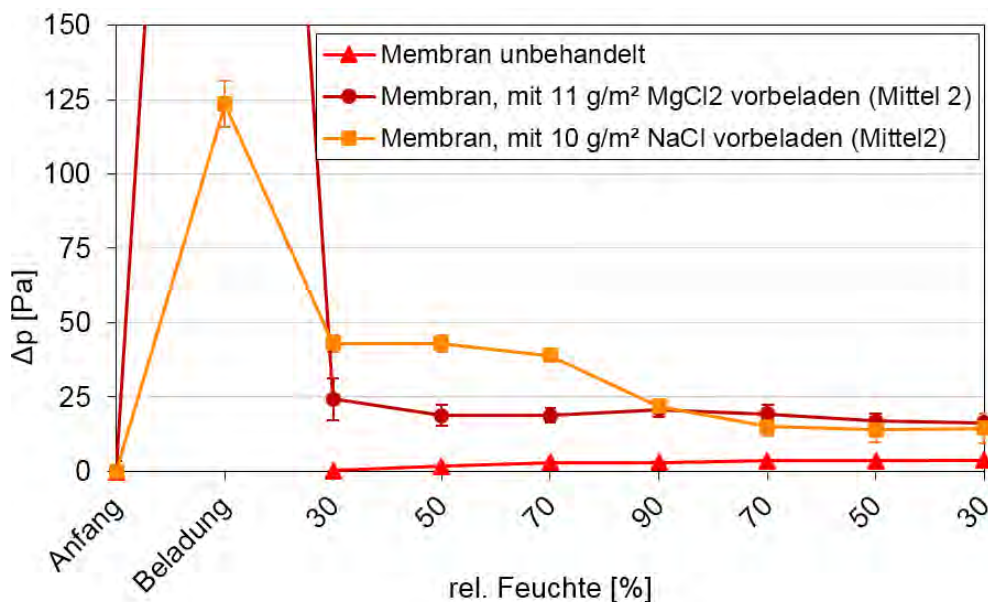


Abbildung 4.3-17: Druckverlustverlauf des Membran-Mediums bei zwei cm/s.

Die Verläufe des Membran-Mediums zeigt Abbildung 4.3-17. Ersichtlich wird, dass sich auch hier ein ähnliches Bild abzeichnet, wie bei den beiden Glasfaser-Medien. Lediglich ist bei diesem Medium der deutliche Abfall nach NaCl-Beladung etwas ausgeprägter, dafür aber der Anstieg des MgCl₂-beladenen Mediums bis zu 90 % r.F. moderater als bei den anderen Medien.

Im nächsten Abschnitt sind die Verläufe der drei Medien bei einer Anströmgeschwindigkeit von acht cm/s gegenüber gestellt.

Bei acht cm/s

Im folgenden Diagramm sind die Druckverluste des Glasfasermediums abgebildet.

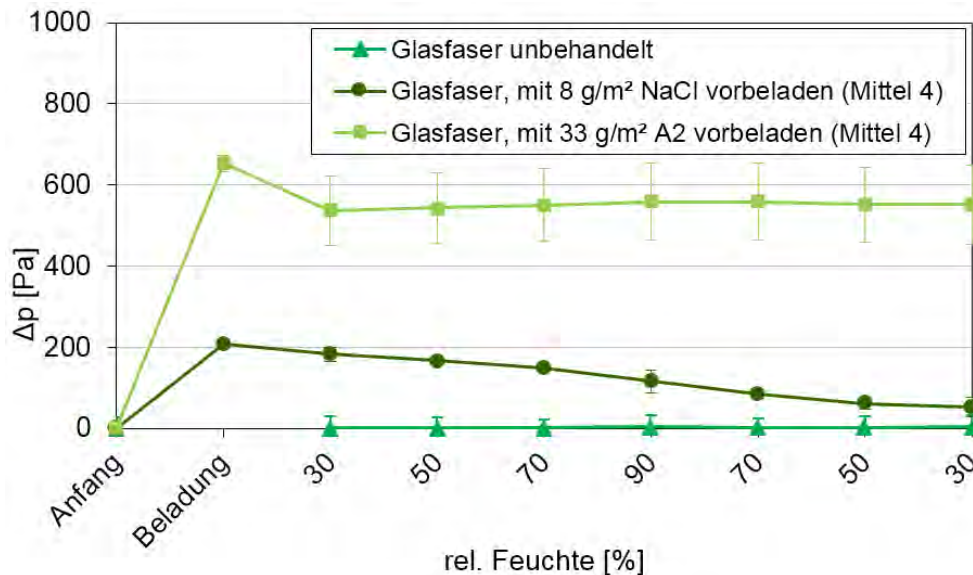


Abbildung 4.3-18: Druckverlustverlauf des Glasfaser-Mediums bei acht cm/s.

Es wird deutlich, dass sowohl das unbeladene, als auch das mit A2-Teststaub beladende Medium keinen signifikanten Einfluss der Feuchtevariation zeigen. Lediglich das mit NaCl-beladene Medium zeigt, wie auch bei einer Geschwindigkeit von 2 cm/s einen konstanten Abfall des Druckverlustes. Die nächsten beiden Abbildungen zeigen die Verläufe des funktionalisierten Glasfasermediums (Abbildung 4.3-19) und des Membran-Mediums (Abbildung 4.3-20).

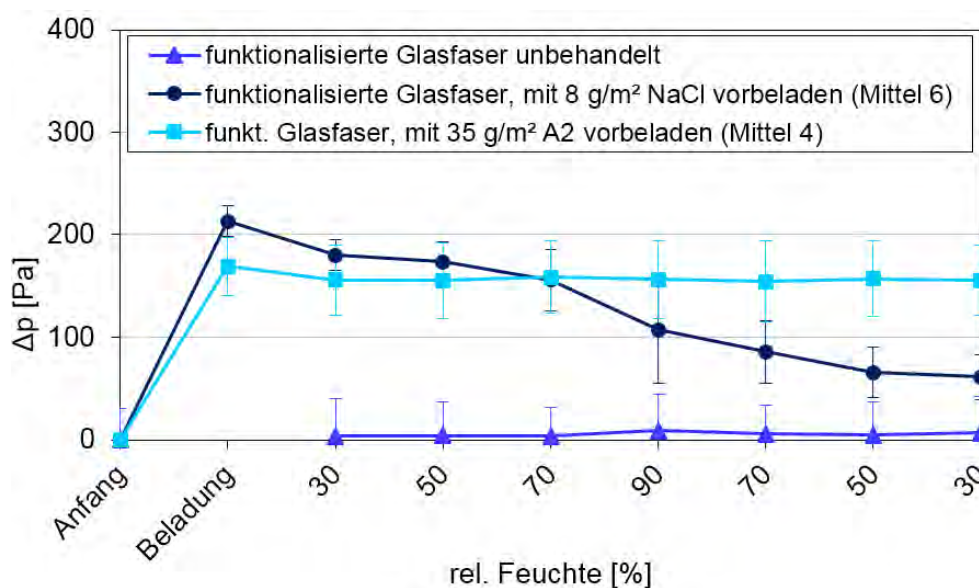


Abbildung 4.3-19: Druckverlustverlauf des funktionalisierten Glasfaser-Mediums bei acht cm/s.

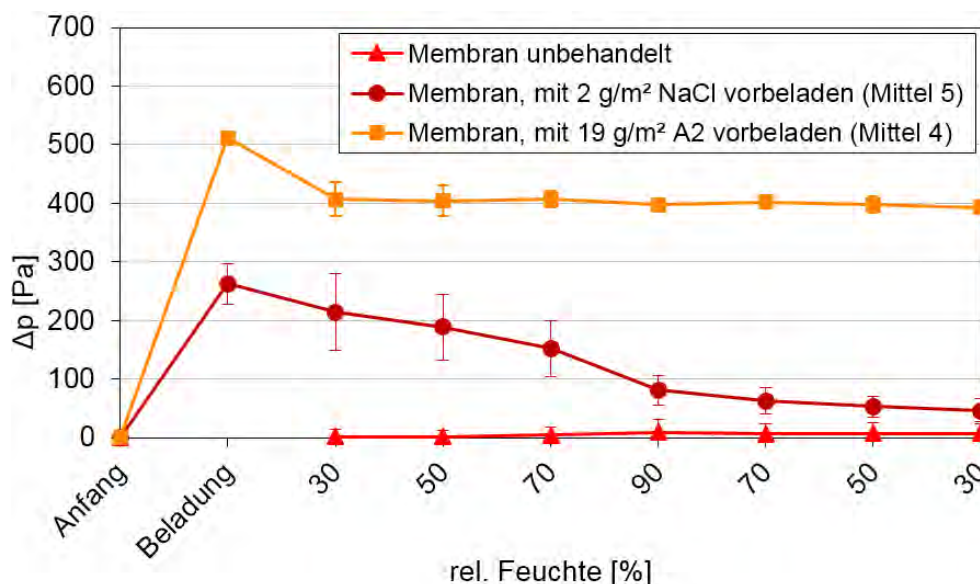


Abbildung 4.3-20: Druckverlustverlauf des Membran-Mediums bei acht cm/s.

Beide Medien zeigen ein ähnliches Verhalten wie das Glasfasermedium. Im unbehandelten Zustand oder nach A2-Beladung lässt sich keine Abhängigkeit des Druckverlustes von der relativen Feuchte erkennen, bei einer Beladung mit NaCl hingegen fällt der Druckverlust ab der Beladung immer weiter ab. Bei diesen beiden Medien lässt sich auch wieder der etwas steilere Abfall beim Übergang von 70 auf 90 % erkennen, ähnlich wie bei einer Anströmgeschwindigkeit von 2 cm/s (Vergleich Abbildung 4.3-16 und Abbildung 4.3-17).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die drei untersuchten Medientypen der Filterklasse E12 im unbeladenen Zustand alle keinen Einfluss der relativen Feuchte auf den Druckverlust zeigen, sowohl bei einer Anströmgeschwindigkeit von zwei als auch von acht cm/s. Medien, die vor der Druckverlust-Messung mit dem Teststaub A2 beladen wurden, zeigten ebenfalls keine Änderung bei Feuchtevariation. Bei einer Beladung mit NaCl fällt jedoch auf, dass der Druckverlust bei allen Medien nach der Beladung stetig abfällt, mit einem sprunghaften Abfall beim Übergang von 70 auf 90 % r.F., bei einer Geschwindigkeit von 20 cm/s jedoch zeigt sich ein erneuter Anstieg des Druckverlustes bei genau dieser Feuchtevariation. Wurden die Medien vor der Messung mit $MgCl_2$ beladen, zeigten die Druckverlust-Verläufe einen Anstieg bis zu dem maximalen Feuchtigkeitswert von 90 % und fielen danach konstant mit abnehmender Feuchte.

4.3.1.2 Polydisperse Bestimmung des DEHS-Fraktionsabscheidegrades bei Variation der Feuchte

4.3.1.2.1 Anströmgeschwindigkeit von zwei cm/s

Als Anströmgeschwindigkeit wurde zunächst zwei cm/s gewählt. Die Ergebnisse sind in dem folgenden Abschnitt gezeigt.

Vergleich der Fraktionsabscheidegrade mit normkonformen FMP

Im Folgenden ist der Vergleich zwischen den Retentionsverläufen eines E12-Mediums bei 2 cm/s zu sehen, zum einen aufgenommen an einem normkonformen Filtermedienprüfstand nach DIN EN 779 [3] und zum anderen an dem Prüfaufbau, der für dieses Projekt genutzt wurde.

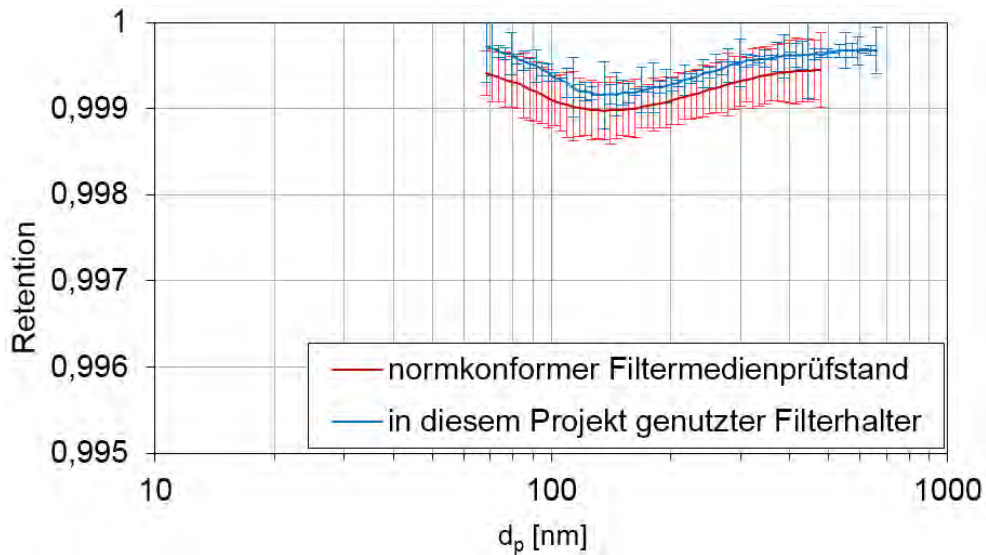


Abbildung 4.3-21: FAG-Vergleich eines E12-Mediums bei einer Anströmgeschwindigkeit von zwei cm/s.

Deutlich zu erkennen ist, dass die Effizienzkurven sich leicht unterscheiden, allerdings immer noch in der Streuung der Messungen der jeweils anderen Kurve liegen. Dieser geringe Unterschied ist durch die leicht variierte Geschwindigkeit begründet, die sich wiederum durch die Unterschiede der Filterfläche bei gleichem Volumenstrom ergibt, siehe Formel (1).

$$\bar{v}_{Medium} = \frac{\dot{V}}{A_{durchströmt}} \quad (1)$$

Abbildung 4.3-22 verdeutlicht den Einfluss der Geschwindigkeit auf den Fraktionsabscheidegrad.

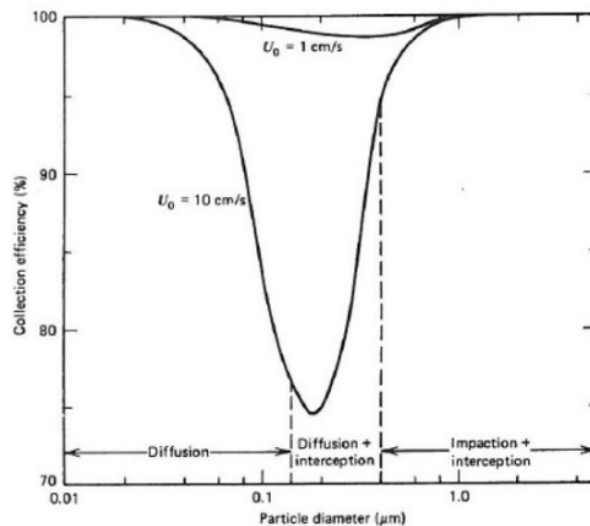


Abbildung 4.3-22: Fraktionsabscheidegrad über der Partikelgröße in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit (Hinds [19]).

Bei allen hier vorgestellten Ergebnissen wurde die durchströmbare Filterfläche bei der Berechnung des notwendigen Volumenstromes oder der gewünschten Geschwindigkeit berücksichtigt. Somit kann der Prüfaufbau dieses Projektes sowohl durch Überprüfung des Druckverlustes als auch der Retention mit einem normkonformen Prüfstand als validiert angesehen werden.

Retentionen unbelasteter Medien

Die im Folgenden gezeigten Fraktionsabscheidegrade wurden unter Verwendung eines SMPS (Scanning-Mobility-Particle-Sizers Modell 3080, TSI) ermittelt. Beim Partikeldurchmesser handelt es sich um einen aus der Anzahlverteilung und der elektrischen Mobilitätsklasse berechneten Wert.

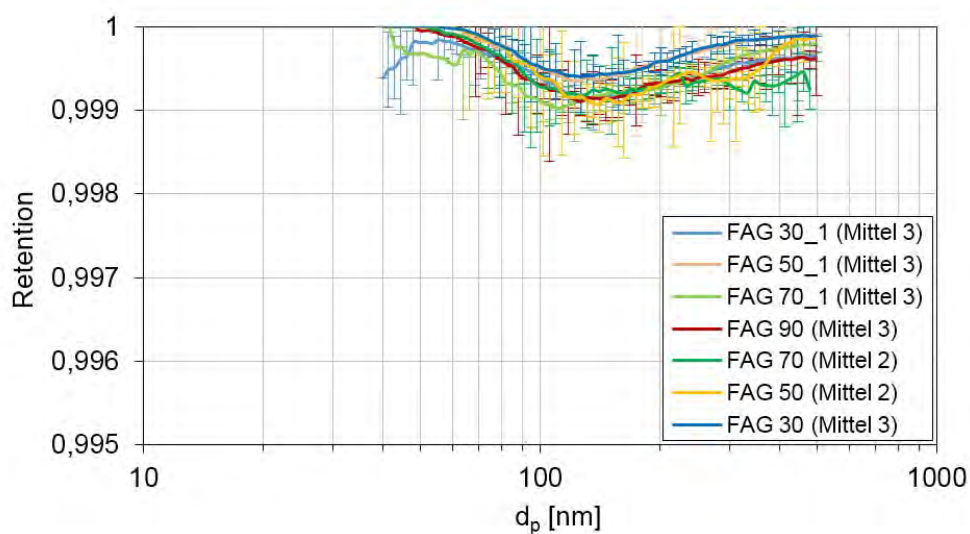


Abbildung 4.3-23: Fraktionsabscheidegrade eines Glasfasermittels bei unterschiedlichen relativen Feuchten und einer Anströmgeschwindigkeit von zwei cm/s.

Für die Fraktionsabscheidegrade in Abbildung 4.3-23 und Abbildung 4.3-25 wurde pro Feuchtwert ein neuer Medienzuschnitt genommen und mit Feuchte konditioniert, bevor die Partikelgrößenverteilung anschließend mit DEHS roh- und reingasseitig gemessen wurde. Die Bezeichnung „FAG 50_1“ steht dabei beispielsweise für eine Konditionierung bei 30 % relativer Feuchte über 10 Minuten und einer anschließenden Messung bei 50 % relativer Feuchte. „FAG 50“ hingegen bedeutet, dass das Medium je 10 Minuten lang einer Feuchte von 30, 50, 70, 90 und wieder 70 % ausgesetzt war, bevor die Messungen bei 50 % durchgeführt wurden.

Da bei dem unbeladenen Medium kein Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die Retention erkennbar war, wurden die gleichen Messungen an einem zuvor mit $MgCl_2$ beladenen Medium durchgeführt. Die Ergebnisse sind im folgenden Abschnitt dargestellt.

Retentionen $MgCl_2$ -beladener Medien

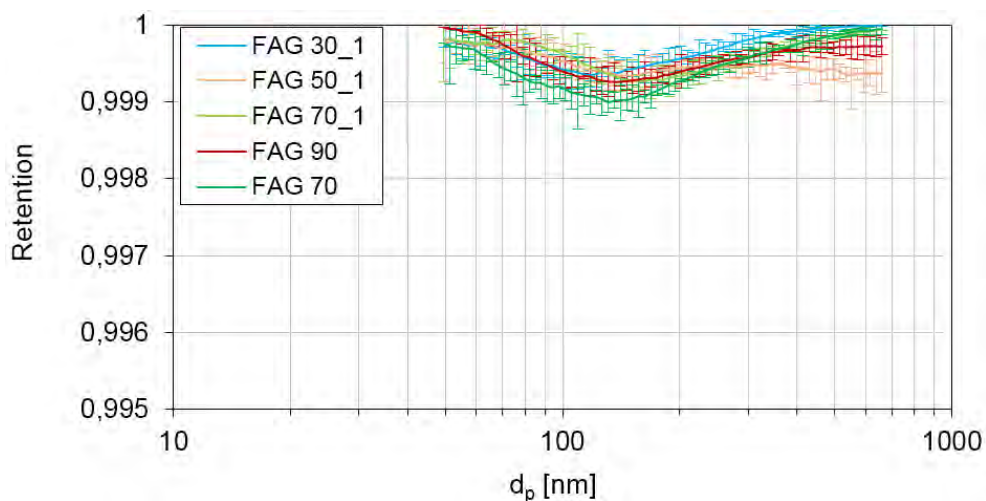


Abbildung 4.3-24: Fraktionsabscheidegrade eines Glasfasermediums bei unterschiedlichen relativen Feuchten und einer Anströmgeschwindigkeit von zwei cm/s nach anfänglicher Beladung mit $MgCl_2$.

Wie auch hier im Vergleich mit Abbildung 4.3-23 zu sehen ist, liegen alle Fraktionsabscheidegrade innerhalb des Rauschens der anderen Verläufe. Es ist kein Einfluss auf die Filtrationsleistung ersichtlich.

Da bei einer Anströmgeschwindigkeit von zwei cm/s ist keine eindeutige Tendenz der Retention in Abhängigkeit der Feuchte erkennbar ist, wurden die Messreihen mit einer erhöhten Anströmgeschwindigkeit von acht cm/s wiederholt.

4.3.1.2.2 Anströmgeschwindigkeit von acht cm/s

Die Ergebnisse der polydispersen Messungen an einem unbeladenen Glasfaserfilter sind in Abbildung 4.3-25 dargestellt.

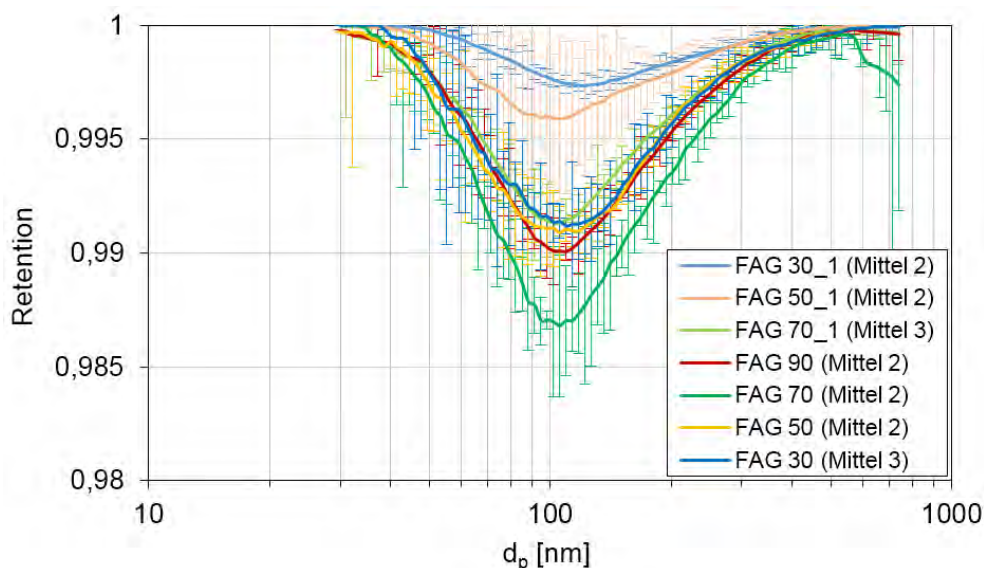


Abbildung 4.3-25: Fraktionsabscheidegrade eines Glasfasermediums bei unterschiedlichen relativen Feuchten und einer Anströmgeschwindigkeit von acht cm/s.

Wie sich in Abbildung 4.3-25 zeigt, ist die MPPS-Lage (Lage der Most Penetrating Particle Size) bei einer Anströmgeschwindigkeit von acht cm/s deutlich ausgeprägter und die Unterschiede zwischen den einzelnen Messreihen besser erkennbar als bei zwei cm/s. Auch trotz der teilweise starken Streuung der einzelnen Messergebnisse wird deutlich, dass die ersten beiden Messreihen (30_1 und 50_1) hier die besten Fraktionsabscheidegrade ergeben. Alle anderen Retentionen liegen sehr nah zusammen, wodurch aufgrund des Rauschens keine eindeutige Reihenfolge festgelegt werden kann. Allein die Messreihe bei 70 % relativer Feuchte weist einen etwas schlechteren Fraktionsabscheidegrad auf.

Wie aus Abbildung 4.3-23 und Abbildung 4.3-25 hervorgeht, sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Messreihen bei einer Anströmgeschwindigkeit von acht cm/s besser zu erkennen. Daher wurde für die Messreihen zur Berechnung der Retention diese Geschwindigkeit gewählt.

Retentionen NaCl-beladener Medien

Um die Ergebnisse der DEHS-Messungen bei Feuchteconditionierung besser einordnen zu können, wurden die Messungen an den beladenen Filtermedien zunächst bei trockener Luft durchgeführt (Bezeichnung „unb.“). Die Bezeichnung „NaCl + RH“ bedeutet, dass der Medienzuschnitt zunächst mit NaCl beladen wurde, anschließend einer Feuchteconditionierung ausgesetzt war und danach bei trockener Luft mit DEHS vermessen wurde. „NaCl + WT“ verweist auf eine Beaufschlagung mit Wassertröpfchen anstelle der Conditionierung mit Feuchte.

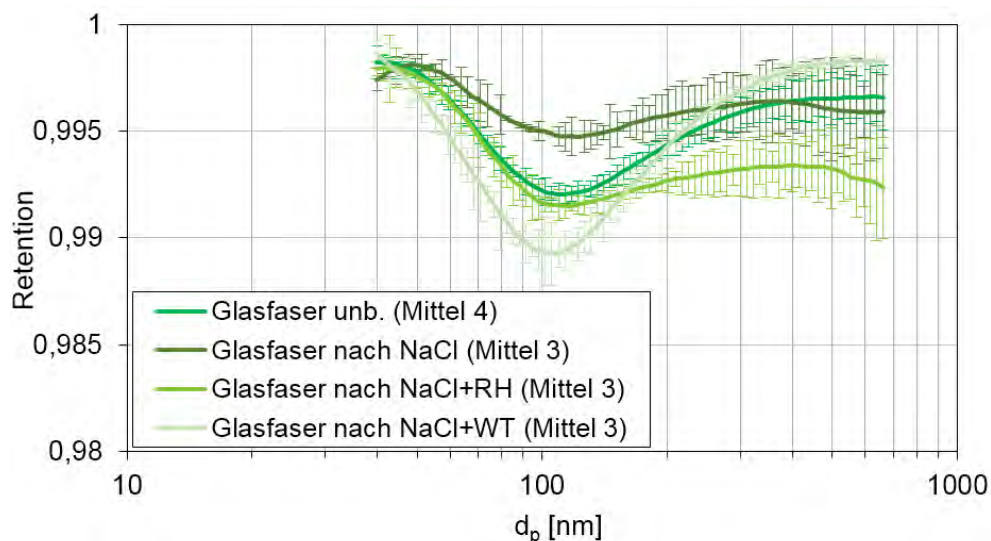


Abbildung 4.3-26: Fraktionsabscheidegrade eines Glasfasermediums bei verschiedenen NaCl-Beladungszuständen.

In Abbildung 4.3-26 ist zu erkennen, dass der Fraktionsabscheidegrad durch NaCl-Beladung des Glasfasermediums bis zu einer Partikelgröße von 200 nm etwas besser wird, hin zu größeren Partikeldurchmessern verschlechtert er sich gegenüber einem unbeladenen Medium. Nach einer an die Beladung anschließenden Feuchtevariation bleibt die Retention auf einem ähnlichen Niveau wie im unbeladenen Zustand, wird aber für größere Partikel als im Abscheidegradminimum schlechter. Die deutlichste Verschlechterung im MPPS erfährt die Retention bei Beladung mit NaCl und anschließender Beaufschlagung mit Wassertröpfchen, jedoch ist der Fraktionsabscheidegrad ab 250 nm besser als im unbeladenen Zustand.

In Abbildung 4.3-27 sind die Fraktionsabscheidegrade eines funktionalisierten Glasfasermediums zu sehen.

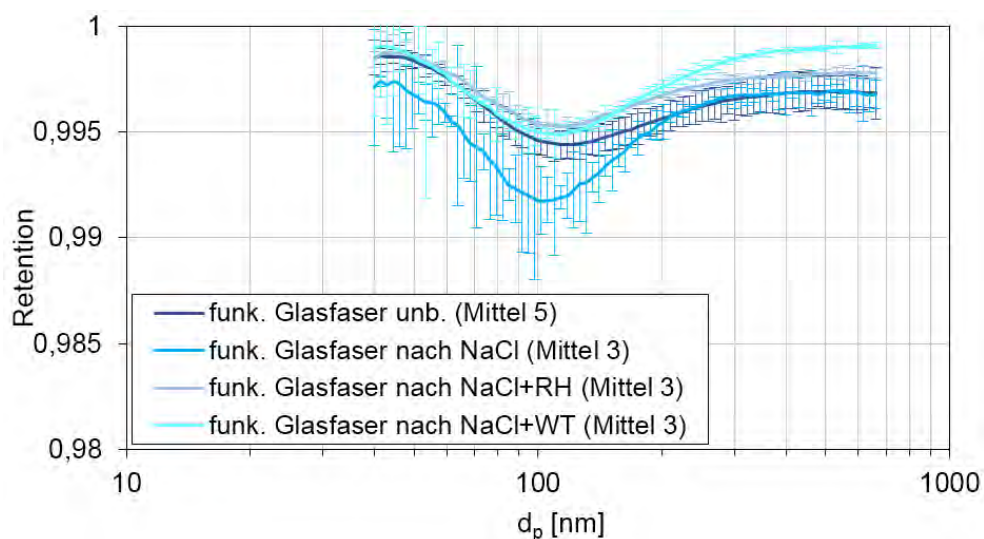


Abbildung 4.3-27: Fraktionsabscheidegrade eines funktionalisierten Glasfasermediums bei verschiedenen NaCl-Beladungszuständen.

Im Gegensatz zu dem Glasfasermedium ohne Funktionalisierung ist hier zu erkennen, dass die Retention durch Beladung mit NaCl deutlich schlechter wird. Bei anschließender Feuchtevariation oder Beaufschlagung mit Wassertröpfchen jedoch ist der Fraktionsabscheidegrad sogar besser als bei dem unbeladenen Medium. Die folgende Abbildung zeigt die Retentionen für ein Membranmedium.

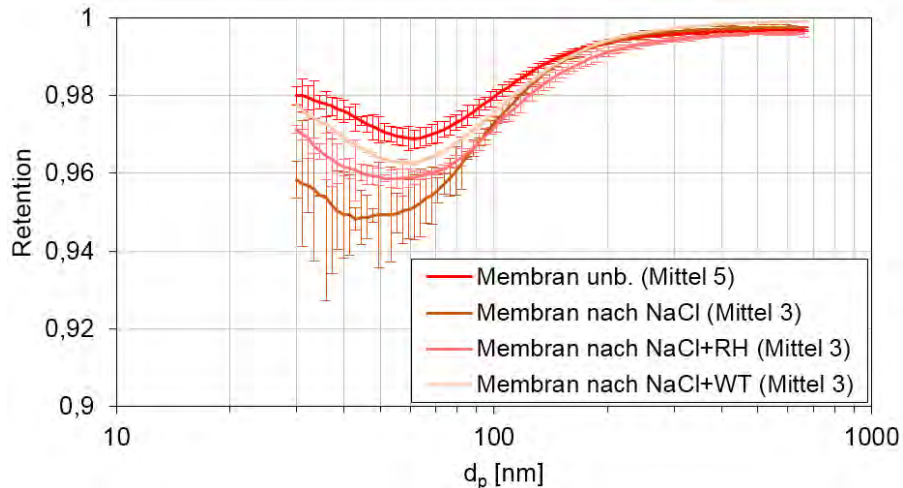


Abbildung 4.3-28: Fraktionsabscheidegrade eines Membranmediums bei verschiedenen NaCl-Beladungszuständen.

In Abbildung 4.3-28 ist zu erkennen, dass sich das Membranmedium mit NaCl-Beladung ähnlich verhält wie das funktionalisierte Glasfasermedium – der Fraktionsabscheidegrad verschlechtert sich. Allerdings ändert sich dieses Verhalten nur leicht, wenn das Medium einer anschließenden Feuchtevariation ausgesetzt wird. Allein bei einer Beaufschlagung mit Wassertröpfchen liegt die Retention fast wieder auf dem Niveau eines unbeladenen Mediums. Auffällig ist bei dem Membranmedium auch die MPPS-Lage, im Gegensatz zu den Glasfasermedien liegt diese nicht bei einer Größe von ca. 100 nm sondern bei etwa 60 nm.

Retentionen A2-beladener Medien

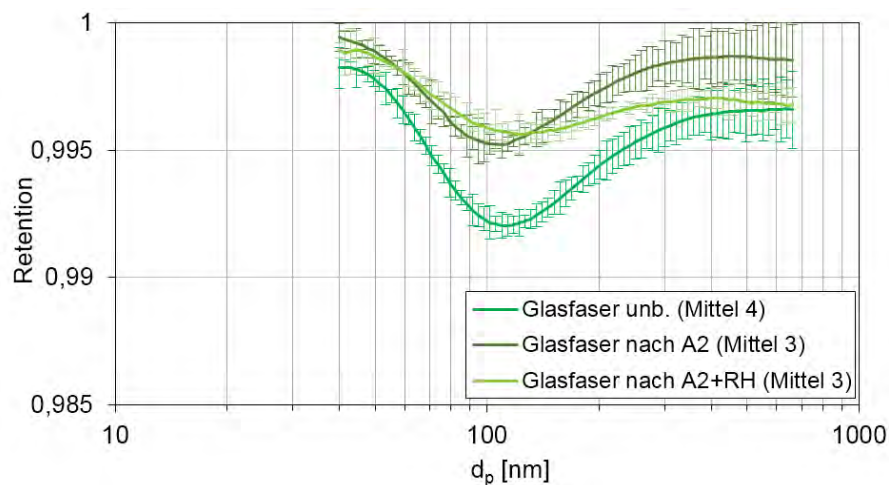


Abbildung 4.3-29: Fraktionsabscheidegrade eines Glasfasermediums bei verschiedenen A2-Beladungszuständen.

Wie in Abbildung 4.3-29 zu sehen ist, wird die Retention des Glasfasermediums mit A2-Beladung deutlich besser, auch bei einer an die Beladung anschließenden Feuchtevariation. Lediglich bei größeren Partikeln als die MPPS wird der Fraktionsabscheidegrad etwas schlechter als ohne Feuchtevariation, bleibt aber dennoch besser als im unbeladenen Zustand. Das gleiche Verhalten zeigt ein funktionalisiertes Glasfasermedium, in Abbildung 4.3-30 dargestellt. Auch hier verbessert sich die Retention durch A2-Beladung und wird durch anschließende Feuchtevariation für kleine Partikel noch besser, bevor sie nach der MPPS etwas abnimmt, aber dennoch oberhalb der Retentionskurve eines unbehandelten Mediums liegt.

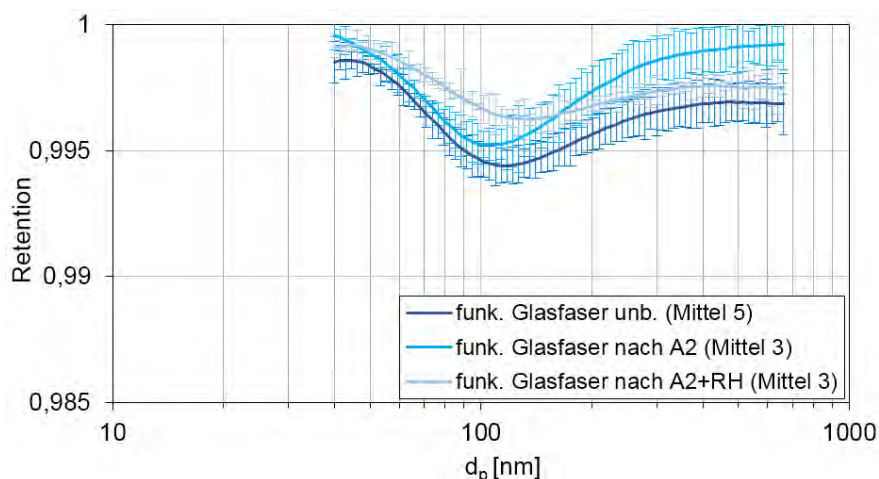


Abbildung 4.3-30: Fraktionsabscheidegrade eines funktionalisierten Glasfasermediums bei verschiedenen A2-Beladungszuständen.

Allein die Retention eines Membranmediums, in Abbildung 4.3-31 zu sehen, verschlechtert sich für kleine Partikel durch Beladung mit dem Teststaub. Ab einer Partikelgröße von ca. 60 nm, der MPPS-Lage, entspricht sie der Retention im unbeladenen Zustand und wird ab ca. 100 nm sogar besser. Durch an die Beladung anschließende Feuchtevariation verbessert sich der Fraktionsabscheidegrad genauso wie bei den Glasfasermedien.

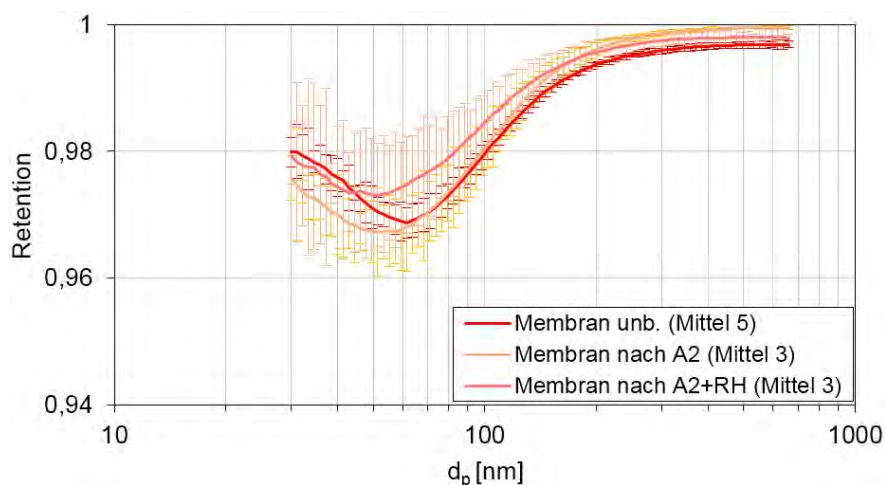


Abbildung 4.3-31: Fraktionsabscheidegrade eines Membranmediums bei verschiedenen A2-Beladungszuständen.

4.3.1.3 Behandlung mit Isopropanol

Um eventuelle Elektretwirkungen der einzelnen Medien auszuschließen, wurden Messreihen nach einer Isopropanol-Behandlung durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.3-32 zu sehen.

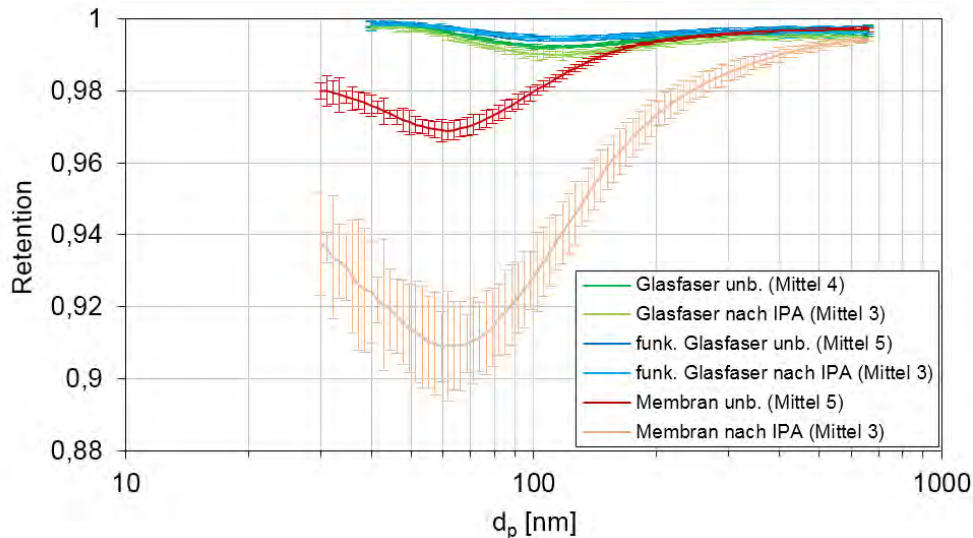


Abbildung 4.3-32: Fraktionsabscheidegrade verschiedener Medien unbehandelt und nach Isopropanol-Behandlung.

Zu erkennen ist, dass die Retention des Glasfasermediums durch eine Behandlung mit Isopropanol von 0,992 auf 0,99 geringfügig abfällt. Das funktionalisierte Glasfaser-medium zeigt keine Änderung, wohingegen das Membranmedium ein deutlich schlechteres Abscheideverhalten aufweist. Hier verschlechtert sich die Retention von ca. 0,97 auf ca. 0,91. Das lässt entweder auf eine Elektretwirkung des Mediums oder auf eine Veränderung der Membranschicht durch Einwirkung von Isopropanol schließen. Aufschluss darüber geben die im Anschluss aufgenommenen REM-Bilder (Vgl. Kapitel 4.7.3).

4.3.1.4 Umbau des Prüfaufbaus

Da bei den polydispersen Retentionsmessungen mit einer Anströmgeschwindigkeit von 2 cm/s der Einfluss der relativen Feuchte nicht ersichtlich ist, wurden im vorigen Kapitel Ergebnisse bei 8 cm/s vorgestellt. Aufgrund des enormen Anstieges des Druckverlustes bei dieser Anströmgeschwindigkeit (teilweise mehrere hundert Pascal) muss allerdings davon ausgegangen werden, dass der Prüfling durch das abgeschiedene DEHS verändert wird und nicht mehr der Neuzustand vermessen werden kann. Das folgende Diagramm Abbildung 4.3-33 zeigt exemplarisch mittels Scanning Mobility Particle Sizers (SMPS) polydispers aufgenommen Fraktionsabscheidegrade, bei denen ersichtlich wird, wie sich die ungewollte Medienbeladung auf Druckverlust und Effizienz auswirken.

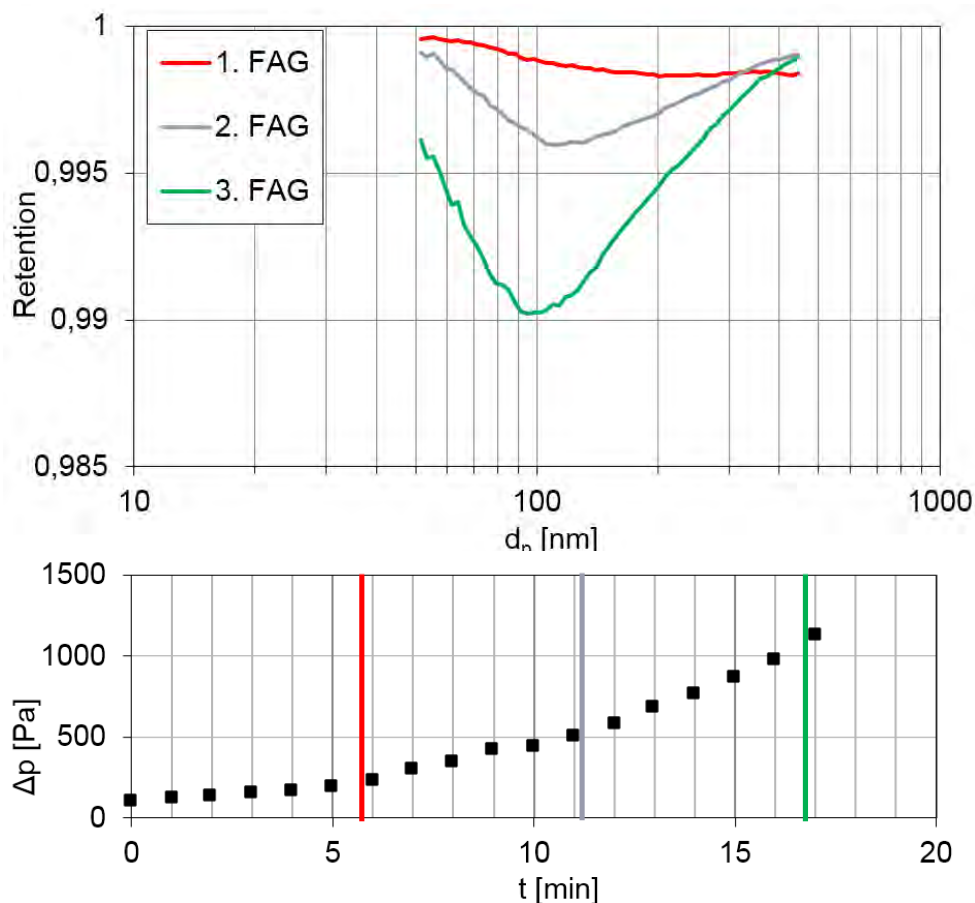


Abbildung 4.3-33: Druckverlustanstieg während polydisperser Retentionsmessung bei einer Anströmgeschwindigkeit von 8 cm/s.

Während der polydispersen Beaufschlagung mit DEHS wurden drei Reingasmessungen durchgeführt und der zeitliche Verlauf der Druckverluste aufgezeichnet. Es ist deutlich erkennbar, dass sich die Retentionsverläufe mit der Zeit deutlich verschlechtern und der Druckverlust über dem Medium sukzessive ansteigt.

Die DIN EN 1822:1:2011-1 [4] weist im Abschnitt 7.4.5 darauf hin, dass bei Filtertests sowohl mono- als auch polydisperse Prüfaerosole zulässig sind. Der Vorteil der polydispersen Beaufschlagung liegt in der geringen Messzeit, während der alle Größenklassen abgescannt werden können. Bei einer monodispersen Beaufschlagung dagegen werden um Größenordnungen geringere Partikelkonzentrationen auf das zu prüfende Filtermedium geführt, so dass keine Beladung des Mediums durch das Prüfaerosol erfolgt. Daher wurde der Prüfaufbau so umgestaltet, dass monodisperse Messungen möglich waren.

Zunächst wurde dazu eine Mischkammer integriert, in der die mit Feuchte konditionierte Luft mit dem durch einen DMA (Differential Mobility Analyzer) klassierten Aerosolvolumenstrom zusammengeführt wird. An dieser Stelle wird auch die Feuchtemessung mithilfe eines Feuchtesensors vorgenommen, der für Hochfeuchteanwendungen geeignet ist. Optional kann auch bei dem monodispersen Prüfaufbau das Filtermedium vor der Retentionsmessung mit Salz beaufschlagt werden.

Des Weiteren wurde das SMPS-System hinter dem Filterhalter durch einen roh- und einen reingasseitigen CPC ersetzt. So ist eine zeitgleiche Messung der Konzentrationen und daraus resultierend eine genauere Berechnung des Fraktionsabscheidegrades möglich.

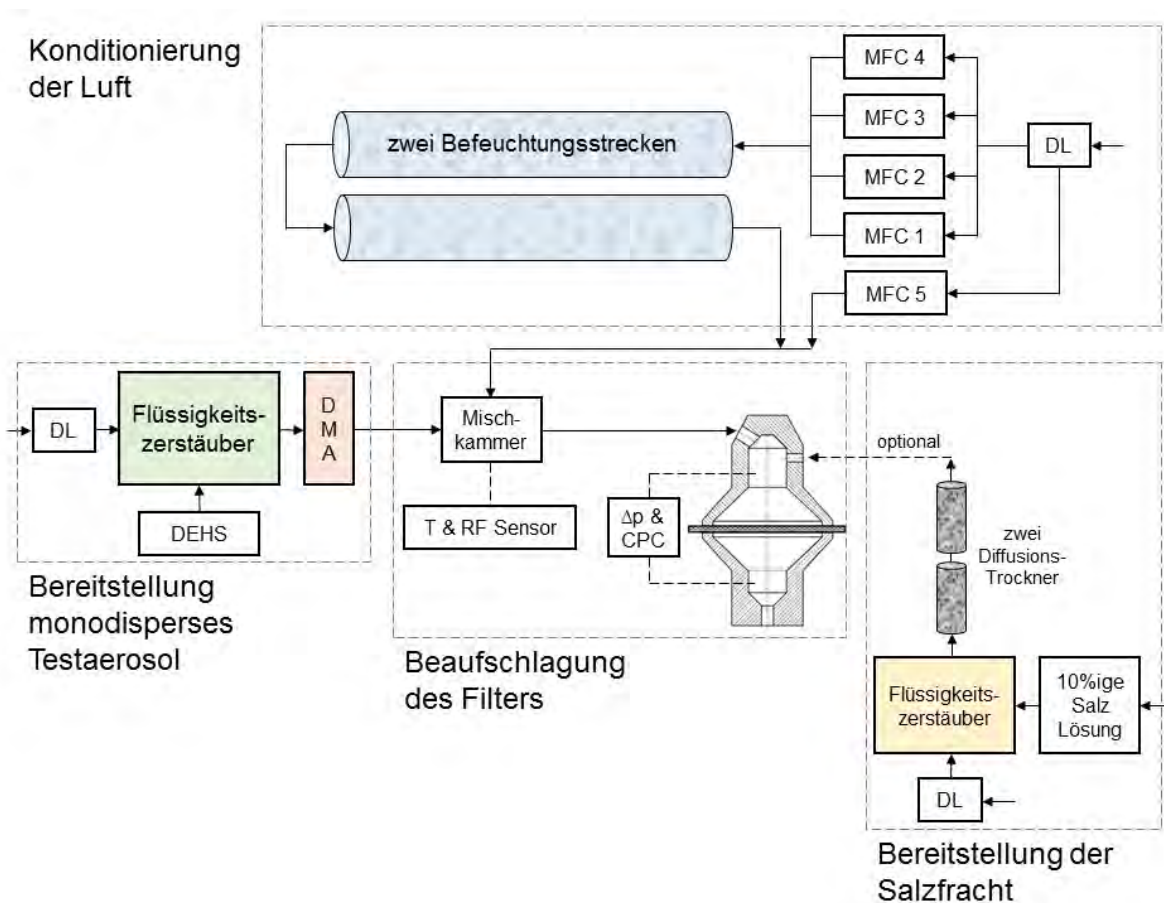


Abbildung 4.3-34: schematischer 1 nach Umbau für monodisperse Messungen. Versuchsaufbau an der Forschungsstelle.

4.3.1.5 Fehlerquellen

Um sicher zu stellen, dass eine monodisperse Beaufschlagung und zeitgleiche Konzentrationmessung roh- und reingasseitig verlässliche Ergebnisse liefert, werden in diesem Abschnitt mögliche Fehlerquellen und Unsicherheiten diskutiert.

Diffusionsverluste

Unter anderem könnten in der Prüffilteraufnahme Diffusionsverluste auftreten, die reingasseitig eine verringerte Konzentration verursachen. Abbildung 4.3-35 veranschaulicht die unterschiedlichen Wegstrecken innerhalb des Filterhalters.

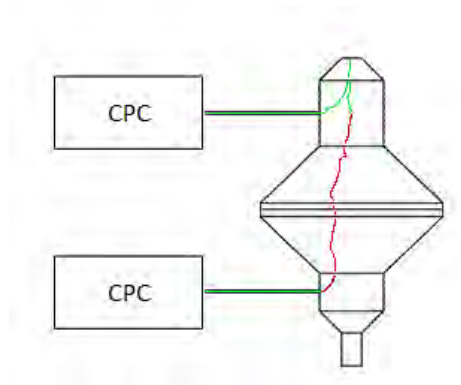


Abbildung 4.3-35: verschiedene Wegstrecken in dem Filterhalter.

Der grün-gezeichnete Weg muss für Diffusionsverluste nicht berücksichtigt werden, da er sowohl für die roh- als auch reingasseitige Probenahme zurückgelegt werden muss. Die rote Trajektorie hingegen stellt die zusätzliche Weglänge dar, die Partikel zurücklegen, die im Reingaszähler detektiert werden. Für diese Strecke müssen eventuelle Diffusionsverluste gegebenenfalls berücksichtigt werden. Dafür wurden Partikelmessungen an Roh- und Reingassonde ohne eingebautes Filtermedium durchgeführt. Diese werden über einen Korrektur-faktor berücksichtigt, wie im folgenden Abschnitt „CPCs“ erläutert wird.

Einfluss des zweiten Neutralisators

Um monodisperse Partikel für die Messung nach DIN EN 1822-3 [4] zu erhalten, muss das Aerosol durch einen ersten Neutralisator ins Ladungsgleichgewicht überführt werden, um im DMA klassiert zu werden. Da im DMA nur die Partikel den Austrittsspalt und anschließend den Filterhalter erreichen, die eine bestimmte elektrische Mobilität haben, trägt somit jeder Partikel nach der Klassierung mindestens eine Elementarladung. Bereits geringfügig geladene Filterfasern können dann das Effizienzergebnis fälschlicherweise verbessern, da Partikel aufgrund der coulombschen Wechselwirkung bei gegensätzlicher Polarität abgeschieden werden. Aus diesem Grund ist ein weiterer Neutralisator in der Konditionierungsstecke des Aerosols in DIN EN 1822-3 [4] ausgewiesen. Dieser Neutralisator überführt das Testaerosol erneut in ein definiertes Ladungsgleichgewicht.

Im folgenden Abschnitt wird der Einfluss des zweiten Neutralisators kurz erläutert und eine Fehlerabschätzung vorgenommen. Dazu wird zunächst das Filtermedium normkonform untersucht, d. h. der Neutralisator nach der Aerosolbereitstellung neutralisiert das Testaerosol dahingehend, dass die Ladungswahrscheinlichkeit der Partikel der Boltzmann-Verteilung im Gleichgewicht entspricht. In einer weiteren Messung erfolgt die Effizienzmessung ohne erneute Neutralisation des Testaerosols, so dass alle Partikel geladen sind.

In Abbildung 4.3-36 ist der FAG für beide Fälle als Retention über dem Partikeldurchmesser aufgetragen. Bei dem Filter handelt es sich um einen E10-Glasfasermedium. Es wurden drei Filterrunden zunächst mit neutralisiertem und anschließend mit geladenem Aerosol untersucht. Die Retention im MPPS bei ca. 200 nm ist für beide Fälle identisch. Bei kleineren Partikeln hin zu 50 nm ist jedoch eine Differenz bei allen Runden ersichtlich. Der Filtertest mit neutralisiertem

Aerosol zeigt eine um etwa 0,005 verringerte Retention im Durchmesserbereich von 50 bis 120 nm. Es ist anzunehmen, dass die Differenz zum FAG mit dem geladenen Aerosol in elektro-phoretischen Abscheidebeiträgen begründet liegt.

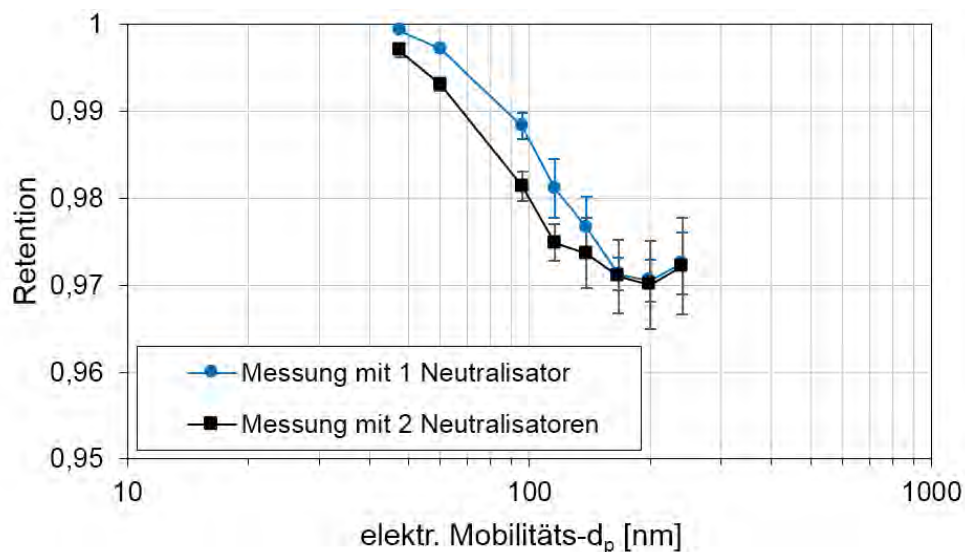


Abbildung 4.3-36: Einfluss des zweiten Neutralisators auf die Effizienzmessung eines E10-Mediums bei 2 cm/s.

Aufgrund der minimalen Abweichung im MPPS-Bereich wird auf die Verwendung eines zweiten Neutralisators weiterhin verzichtet. Allerdings sollte die leicht verbesserte Effizienz im Bereich kleinerer Partikel weiterhin berücksichtigt werden, auch wenn bei höher klassigen Filtern mit einer noch geringeren Abweichung zu rechnen ist.

CPCs

Da eine weitere Fehlerquelle neben Diffusionsverlusten die unteren Nachweisgrenzen der genutzten Kondensationskeimzähler ist, wurde bei Effizienzmessungen ein Korrekturfaktor k eingeführt, der bei jeder Messung wie folgt berechnet wird:

$$k = \frac{C_{rohgas\ ohne\ Medium}}{C_{reingas, ohne\ Medium}} \quad (2)$$

und anschließend bei der Berechnung der Retention berücksichtigt wird:

$$Retention = 1 - \frac{k \cdot C_{rein}}{C_{roh}} \quad (3)$$

In dem folgenden Diagramm sind Vergleichsmessungen der genutzten CPCs zu sehen, in denen für jeden klassierten Partikeldurchmesser die Rohgas- über der korrigierten Reingaskonzentration aufgetragen ist.

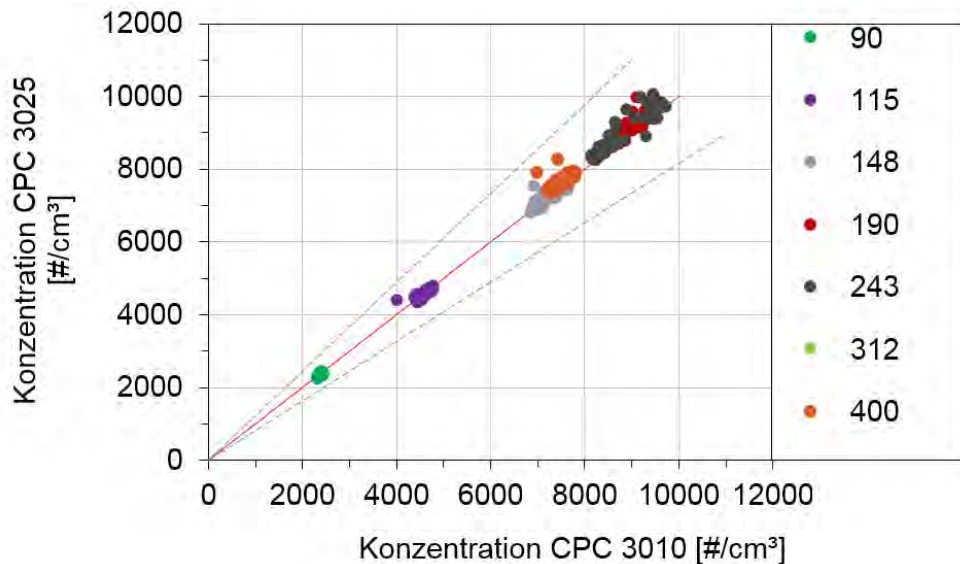


Abbildung 4.3-37: Übereinstimmung der CPCs mit Korrekturfaktor bei trockener Luft.

Erkennbar ist in Abbildung 4.3-37, dass unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors die beiden Kondensationskeimzähler gut übereinstimmen. Die Abweichung liegt deutlich unterhalb von $\pm 10\%$.

Eine zusätzliche Fehlerquelle stellt die Messunsicherheit der Kondensationskeimzähler dar. Diese verwenden zwei unterschiedliche Betriebsmodi, die jeweils Unsicherheiten ergeben. Unterhalb einer systemspezifischen Grenze (3025a ab 10.000), werden die Partikel im Einzelzählmodus per Lichtschranke detektiert. Ist die Konzentration höher, können einige Zähler das gestreute Licht in der Messzelle auswerten und einer Konzentration zuordnen. Dieser Modus hat eine Messunsicherheit von $\pm 10\%$ und der Einzelzählmodus von $\pm 5\%$.

Statistik

Um neben der Fehlerbetrachtung auch der Statistik Rechnung zu tragen, wurde bei der Forschungsstelle 1 ein Mindestmaß von 100 reingasseitigen Zählereignissen pro Messung für ein statistisch sicheres Ergebnis definiert. Dieses Maß orientiert sich an der DIN EN 1822-2 [4], in der festgelegt ist, dass bei einer Partikelanzahl von weniger als 100 Partikeln das 95 %-Vertrauensintervall nach der Poisson-Verteilung errechnet werden muss. Diese ist in der folgenden Abbildung zu sehen.

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

Abbildung 4.3-38: Poisson-Verteilung (Auszug aus DIN EN 1822-2 [4]).

Ab 100 Zählereignissen geht die Berechnung in die symmetrische Normalverteilung über, wobei sich die untere und obere Vertrauensgrenze wie folgt berechnen lassen:

$$N_{95\%} = N \pm 1,96 \times N^{1/2} \quad (4)$$

Unter Berücksichtigung aller systematischen und statistischen Fehler kann eine Abschätzung des kumulierten Fehlers vorgenommen werden. Die folgende Abbildung (Abbildung 4.3-39) zeigt exemplarisch einen Fraktionsabscheidegrad, bei dem reingasseitig mindestens 100 Zählereignisse detektiert wurden. Die Messunsicherheit ist hierbei als blaue Fläche dargestellt, während die Standardabweichungen der einzelnen Messungen der drei vermessenen Filterrunden als Fehlerbalken erkennbar sind.

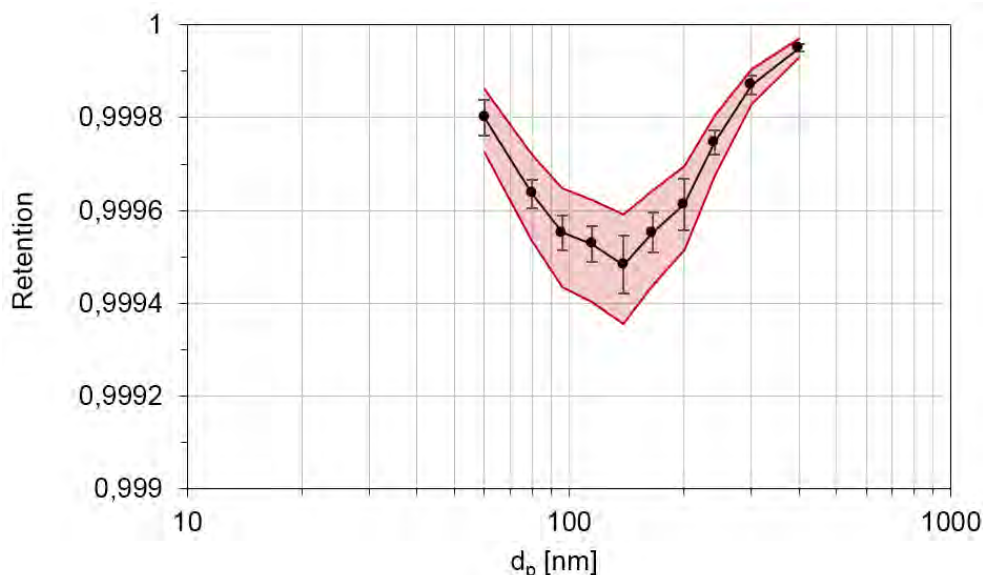


Abbildung 4.3-39: Darstellung der Messunsicherheit und der Standardabweichung.

Erkennbar ist, dass unter Annahme des größtmöglichen Fehlers die maximale Messunsicherheit nur etwas größer ist als die Standardabweichung zwischen den Einzelmessungen. Daher wird im weiteren Verlauf der Projektdokumentation in den Retentionsverläufen aufgrund der Übersichtlichkeit lediglich die Standardabweichung eingezeichnet.

Da das Verhalten der mit Salz beladenen Filtermedien keine einheitlichen Ergebnisse liefert, wurde zusätzlich zum Umbau eine Literaturrecherche zur Deliqueszenzfeuchte von NaCl-Partikeln durchgeführt. Die Ergebnisse werden im folgenden Kapitel kurz zusammengefasst.

4.3.1.6 Literaturrecherche zur Deliqueszenzfeuchte

In der Literatur liegen viele stark variierende Angaben zu der Deliqueszenzfeuchte von NaCl-Partikeln vor, daher wird exemplarisch nur auf die Aussage von Biskos et al. [20] eingegangen, die darstellt, dass die Aussagen für die Deliqueszenzfeuchte eines 10 nm Partikels von verschiedenen Autoren zwischen 60% und 87% schwanken.

Allgemein kann der Deliqueszenzvorgang bei steigender relativer Feuchte schematisch unterteilt werden in die Adsorption von Wasserdampf auf dem Partikel, den Lösungsvorgang des Salzes in diesen Wasserfilm und das Vorliegen eines Lösungströpfchens im Gleichgewicht mit der umgebenden Feuchte. Rechnerisch wird dieser Vorgang durch die Köhler-Theorie beschrieben, die sowohl den Kelvin-Effekt berücksichtigt, der den Dampfdruck über einem Tropfen beschreibt, als auch das Gesetz von Raoult, welches den Anteil des gelösten Stoffes betrachtet. Als Formel ergibt sich daraus:

$$\frac{p_{\text{Lösungstropfen}}}{p_{\text{Wasser}}} = \exp\left(\frac{A}{d_T} - \frac{B}{d_T^3}\right) \quad (5)$$

mit

$$A = \frac{4 \cdot \sigma_W \cdot M_W}{\rho_W \cdot R \cdot T} \quad (6)$$

und

$$B = \frac{6 \cdot M_W}{\rho_W \cdot \pi} \cdot \frac{v_S \cdot \pi \cdot d_S^3 \cdot \rho_S}{6 \cdot M_S} \quad (7)$$

Grafisch stellen sich diese Effekte wie folgt dar:

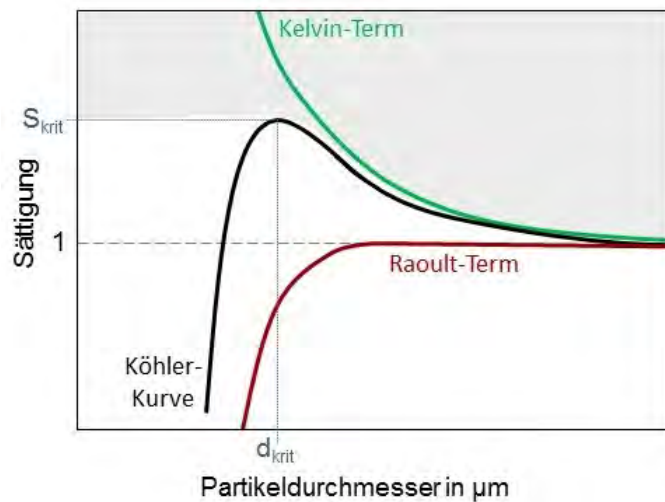


Abbildung 4.3-40: Grafische Darstellung der Köhler-Kurve.

Nur Partikel mit Zuständen innerhalb des grau-hinterlegten Bereichs können einen Lösungstropfen bilden. Alle anderen versuchen ein stabiles Gleichgewicht auf der Köhlerkurve durch Kondensation oder Verdunsten von Wasserdampf zu erreichen. Dieser „aktivierte Bereich“ ist demnach abhängig von der kritischen Sättigung und dem kritischen Durchmesser. Diese ergeben sich unter Beachtung von:

$$\frac{p_{\text{Lösungstropfen}}}{p_{\text{Wasser}}} = \left(\frac{RH_{eq}}{100} \right) = S_{eq} + 1 \quad (8)$$

und

$$\ln \frac{RH}{100} \approx 1 \text{ bzw. } \ln \frac{RH}{100} \approx \frac{RH}{100} - 1 \quad (9)$$

zu

$$S_{krit} = \left(\frac{4A^3}{27B} \right)^{1/2} \quad (10)$$

und

$$d_{krit} = \left(\frac{3B}{A} \right)^{1/2} \quad (11)$$

Die kritische Sättigung und der kritische Durchmesser sind also direkt abhängig von den Konstanten A und B. Dadurch ergibt sich auch eine direkte Bedingtheit zur der Temperatur, der Partikelgröße des Salzpartikels und evtl. Verunreinigungen, die sich auf die molaren Massen, die Dichten und die Oberflächenspannung auswirken können.

Vor allem die Größe des Salzpartikels ist allerdings selber abhängig von einigen Faktoren, wie zum Beispiel dem Zerstäubungsprozess. So fanden Gupta et al. [21] heraus, dass ein trocken aufgebracht MgCl₂-Partikel eine Deliqueszenzfeuchte von ~ 33% aufweist, wohingegen Partikel aus einem Zerstäubungsprozess einen einstufigen Übergang zum Lösungströpfchen bei einer relativen Feuchte von ~ 15,9% zeigen. Des Weiteren muss auch die Vorgeschichte der Salzfracht in Betracht gezogen werden, da unter einigen Bedingungen die Salzkristalle bei einer Feuchtevariation über die Deliqueszenzfeuchte hinaus zusammenlaufen und so bei Verringerung der Umgebungsfeuchte zu größeren Partikeln auskristallisieren (Vgl. REM-Aufnahmen von salzbeladenen Filtern vor und nach Feuchtevariation, Kapitel 4.6). Dennoch kann zunächst festgehalten werden, dass je Größer der Salzpartikel, desto niedriger ist die kritische Übersättigung, die für den Übergang in ein Lösungströpfchen notwendig ist. Allerdings finden sich in der Literatur auch gegensätzliche Aussagen, wie beispielsweise Langlet et al. [22] in der folgenden Abbildung zeigen:

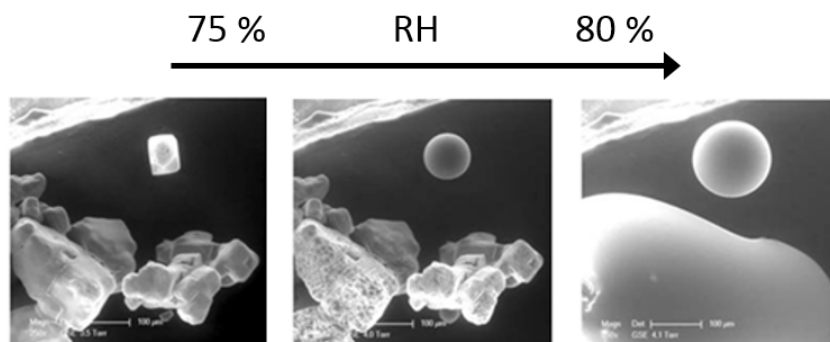


Abbildung 4.3-41: zeitliche Abfolge von ESEM-Aufnahmen des Lösungsvorgangs von NaCl-Partikeln
(Quelle: Langlet et al. [22]).

Anscheinend ist das Verhalten der Partikel abhängig von weiteren Größen, wie Kristallfehler, Morphologie etc. Noziere [23] gehen speziell auf den Einflussfaktor der Verunreinigungen ein und legen dar, dass experimentellen Arbeiten von Ruehl et al. [24] zeigen, dass wenn

oberflächenaktive Stoffe in dem Partikel vorliegen, der Beginn der Tröpfchenbildung um bis zu 50% unterschätzt wird.

Auch die Definition der Deliqueszenzfeuchte trägt zu den stark variierenden Ergebnissen bei. So definieren Djikaev et al. [25] die Deliqueszenz als den Punkt, an dem ein flüssiger Film auf dem Partikel vorliegt, Biskos et al. [20] legen den Zeitpunkt des sprunghaften Anstiegs des Durchmessers als Deliqueszenzpunkt zu Grunde. Des Weiteren zeigen sie auf, dass es mehrere Berechnungsmodelle gibt, deren Auswahl wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Bei dem „uncoated model“ wird angenommen, dass sich der Wasserdampf mit dem Partikel verbindet, wohingegen das „coated model“ davon ausgeht, dass vor dem eigentlichen Lösungsvorgang erst mehrere Schichten Wasser auf dem Kristall adsorbieren. Dadurch erzielen Berechnungen mit dem „coated model“ laut Biskos et al. deutlich höhere Deliqueszenzfeuchten und sind durch die Wasserschichten stärker abhängig von der Berücksichtigung der Oberflächenspannung.

Die eindeutige Bestimmung der Deliqueszenzfeuchte einzelner Stoffe ist also praktisch kaum möglich und auch der Vergleich einzelner Angaben gestaltet sich im Hinblick auf die Literaturrecherche schwierig. Noch weniger trivial wird die Problematik bei Mischungen verschiedener Salze, wie Gupta et al. [21] zeigen. Zunächst abgebildet sind die Flächenverhältnisse der einzelnen Reinstoffe, darunter der einer Seesalz-ähnlichen Mischung mit $X_{\text{NaCl}}=0,9$.

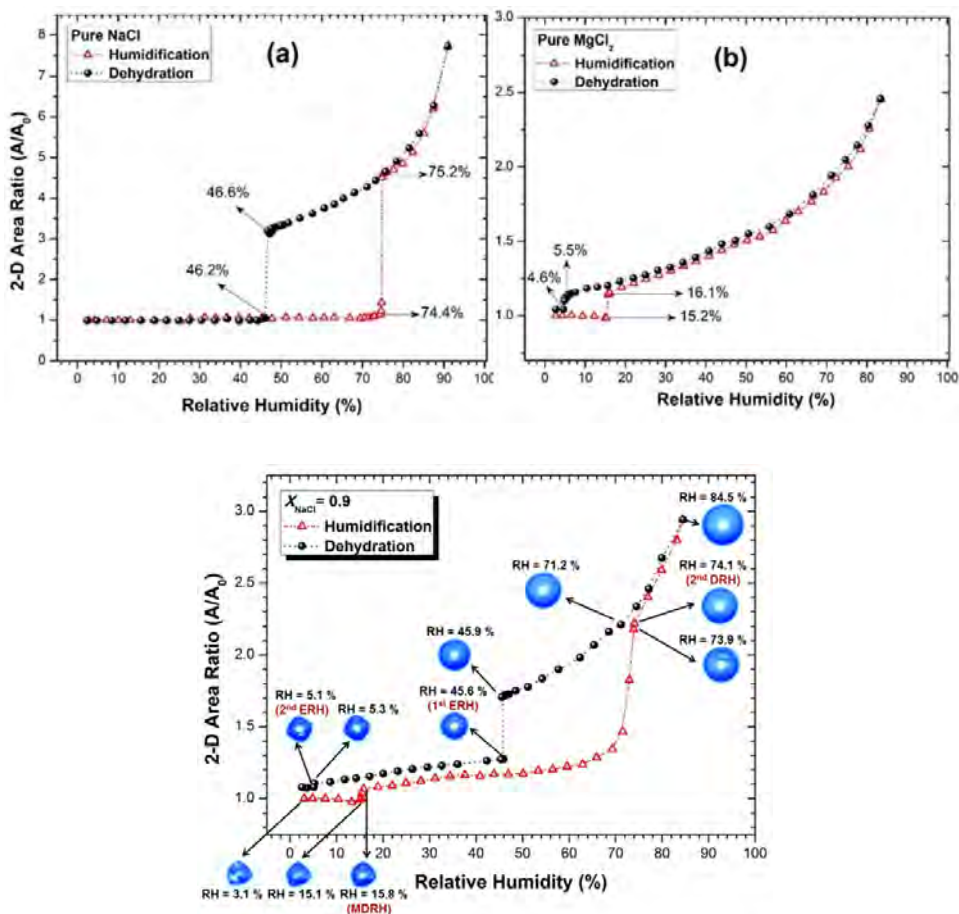


Abbildung 4.3-42: Darstellung des 2D-Flächenverhältnisses zerstäubter NaCl- und MgCl₂-Partikel als Funktion der relativen Feuchte (oben) und einer Mischung aus NaCl und MgCl₂ (unten). (Gupta et al. [21])

Erkennbar ist, dass die Mischung der beiden Salze zwei Deliquescenz-Punkte aufweist, die beide im Gegensatz zu den ursprünglichen um einige Zehntelprozent niedriger sind. Aus diesem Grund wurde bei den folgenden Ergebnissen darauf verzichtet mehrere Zwischenschritte bei der relativen Feuchte einzustellen. Die Medienproben wurden ausschließlich bei trockener Druckluft (relative Feuchte ≈ 5 %) oder aber im feuchten Zustand bei 90 % r.F. (deutlich höhere relative Feuchte der durchströmten Luft als der Deliquescenzpunkt des Beladungsstoffes) vermessen.

4.3.1.7 Monodisperse Bestimmung des DEHS-Fraktionsabscheidegrades bei Variation der Feuchte

Nachdem der Prüfstand umgebaut und durch erneute Vergleichsmessungen mit einem normkonformen Prüfstand validiert wurde (Vgl. Kapitel 4.3.1.1 und 4.3.1.2), wurden erste Messungen an einem Glasfasermedium mit MgCl₂ durchgeführt. MgCl₂ wurde aufgrund seiner relativ geringen Deliquescenzfeuchte von ca. 33,5 % ausgewählt. Bei Messungen im trockenen und feuchten Zustand bei 70 % r.F. kann davon ausgegangen werden, dass die Zustände des MgCl₂ nicht in dem Übergangsbereich der Deliquescenz- bzw. Effloreszenzfeuchte liegen. Folgende Abbildung (Abbildung 4.3-43) zeigt die Ergebnisse.

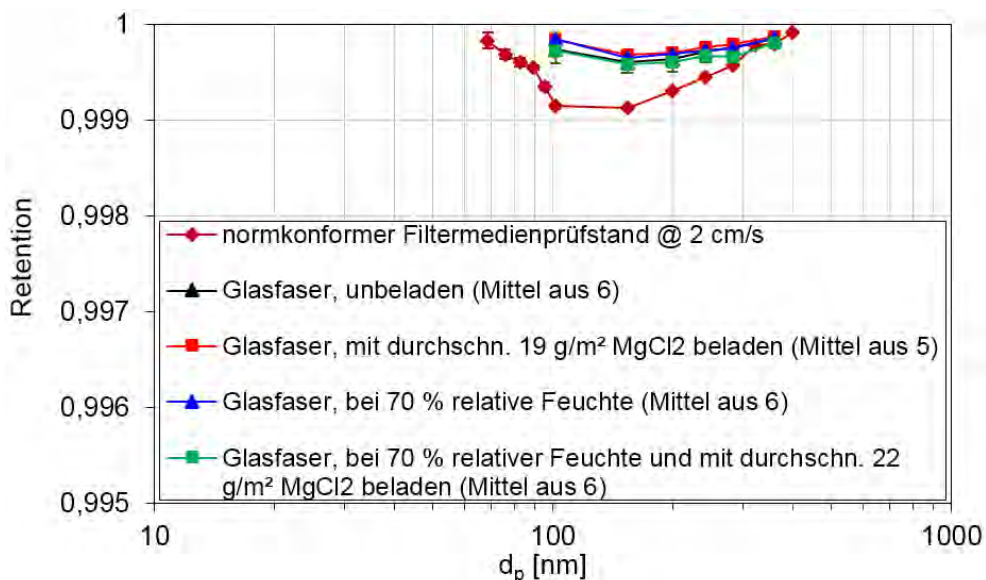


Abbildung 4.3-43: Fraktionsabscheidegrade eines Glasfasermediums in unterschiedlichen Zuständen.

Bei dieser Messreihe wird deutlich, dass bei einer monodispersen Messung die Fraktionsabscheidegrade alle sehr dicht beieinander liegen und eine Unterscheidung zwischen Beeinflussung des Mediums durch die Beladung und dem Rauschen der Messwerte durch z.B. Materialunterschiede kaum möglich ist. Als Tendenz kann lediglich geschlussfolgert werden, dass hin zu kleineren Partikelgrößen eine Beladung nur mit feuchter Luft oder nur mit MgCl₂ scheinbar zu einer leichten Verbesserung der Retention führt. Wohingegen eine Beladung mit anschließender Feuchtevariation vor allem im Bereich kleinerer Partikel zu einer leichten Verschlechterung führt. Die Druckverluste der einzelnen Messreihen sind im Folgenden dargestellt.

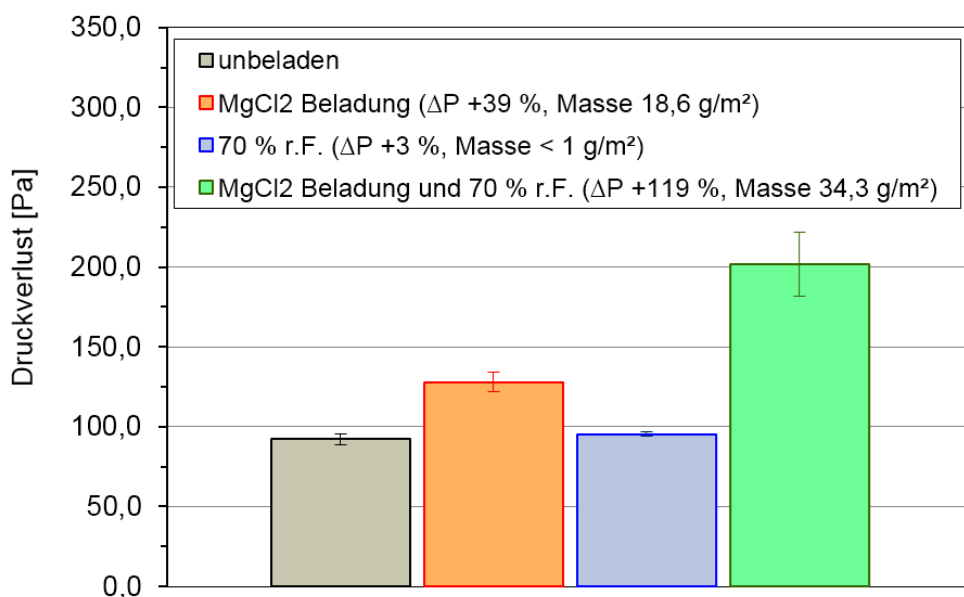


Abbildung 4.3-44: Druckverlust Glasfasermedium in unterschiedlichen Zuständen.

Auffallend ist bei dieser Darstellung, dass separate Beladungen mit feuchter Luft oder $MgCl_2$ zu einem moderaten Anstieg des Druckverlustes führen, wohingegen eine gekoppelte Beladung zu einem Anstieg von 119% führen. Diese Beobachtung widerspricht allerdings der bei gemeinsamer Beladung etwas schlechter werdenden Retention, wie sie in Abbildung 4.3-43 zu erkennen ist.

Dass eine Beladung mit dem Teststaub A2 zu einer Überbewertung der Fraktionsabscheidegrade führt, wurde in einem anderen Projekt der beiden Forschungsstellen (Experimentelle Untersuchung der Effizienz von RLT-Filter als Grundlage für praxisorientierte Prüfmethode sowie für die Weiterentwicklung der Filter durch Modellierung des Filtrationsverhaltens, IGF Forschungsvorhabennummer 17659n; [26]) bereits ausgeführt, daher wird auf die monodisperse Messung mit A2-Staub an dieser Stelle verzichtet.

4.3.2 Filterelemente

4.3.2.1 Konfektionierte Filterelemente im Neuzustand bei Variation der Feuchte

Untersuchungen zur Variation der Feuchte an mit Außenluft beladenen Filtern (Abschnitt 4.3.2.2) wurden an Filtern der Klasse E10 und E11 durchgeführt. Daher wurden für die Betrachtungen im Neuzustand baugleiche Filter derselben Filterklassen verwendet.

Bei den nachfolgenden Versuchen wurde die relative Feuchte im Prüfkanal nach EN 779 vom Anfangszustand kontinuierlich auf 90 % rel. Feuchte erhöht. Dieser Zustand wurde für ca. 20 Minuten beibehalten bis der Druckverlust konstant war, nachfolgend wurde die Feuchte auf 80 % abgesenkt und an diesem Punkt der Fraktionsabscheidegrad bestimmt. Die Effizienzmessung wurde nicht bei 90 % relativer Feuchte, sondern nur bei 80 % durchgeführt, um etwaige Kondensationseffekte zu vermeiden. Es erfolgte dann ein Absenken der relativen Feuchte auf den Anfangszustand und eine anschließende Wiederholung der Variation der rel. Feuchte.

In Abbildung 4.3-45 ist für einen E10-Kassettenfilter der Verlauf der relativen Feuchte und der Druckverlust bei Variation der Feuchte dargestellt. Es wird gezeigt, wie sich der Druckverlust bei einem Volumenstrom von 3400 m³/h und einer Temperatur von ca. 20 °C als Funktion der relativen Luftfeuchte verhält. Man erkennt, dass sich bei einem neuen unbeladenen Filterelement der Druckverlust von ca. 140 Pa bei Variation der rel. Feuchte nicht ändert.

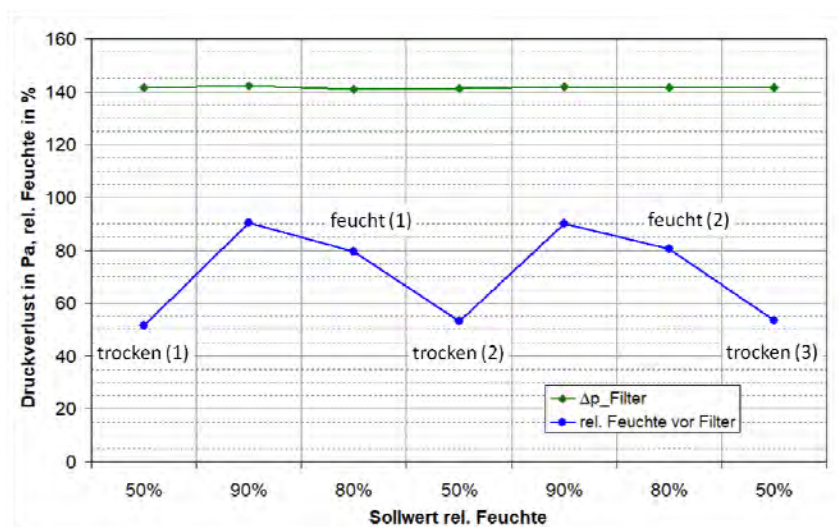


Abbildung 4.3-45: Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte (E10-Filter)

An den Punkten trocken (1), feucht (1), trocken (2), feucht (2) und trocken (3) wurde jeweils der Fraktionsabscheidegrad bestimmt. In Abbildung 4.3-46 werden die entsprechenden Fraktionsabscheidegradkurven gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die Feuchtevariation keinen Einfluss auf den Fraktionsabscheidegrad hat.

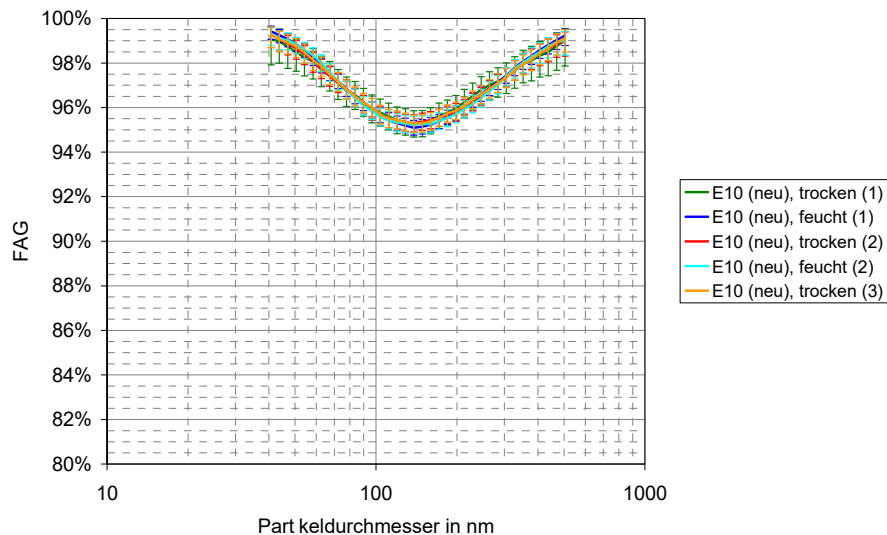


Abbildung 4.3-46: Fraktionsabscheidegrad bei Variation der rel. Feuchte (E10-Filter)

Analog zum Kassettenfilter der Klasse E10 wurde für den Filter der Klasse E11 die Feuchte variiert (Abbildung 4.3-47). Ausgehend vom Anfangszustand wurde die rel. Feuchte kontinuierlich auf 90 % erhöht. Dieser Zustand wurde für ca. 20 Minuten beibehalten, dann auf 80 % abgesenkt und an diesem Punkt der Fraktionsabscheidegrad bestimmt. es erfolgte dann ein Absenken der rel. Feuchte auf den Anfangszustand. Dieser Zyklus wurde wiederholt. Wie zu erwarten war, zeigte sich auch hier kein Einfluss der Feuchtevariation auf den Druckverlustverlauf. Er hat einen konstanten Wert von ca. 160 Pa bei einem Volumenstrom von 3.400 m³/h.

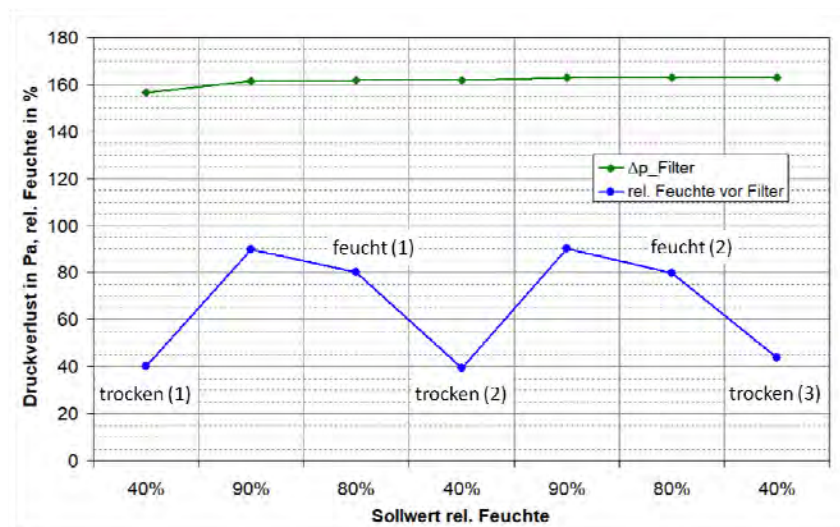


Abbildung 4.3-47: Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte (E11-Filter)

Ebenso ändert sich der Fraktionsabscheidegrad für einen neuen E11-Filter bei Variation der rel. Feuchte nur unwesentlich. In Abbildung 4.3-48 ist zu erkennen, dass sich der Fraktionsabscheidegrad im MPPS bei einem Partikeldurchmesser von ca. 150 nm nur um ca. 0,4 Prozentpunkte ändert.

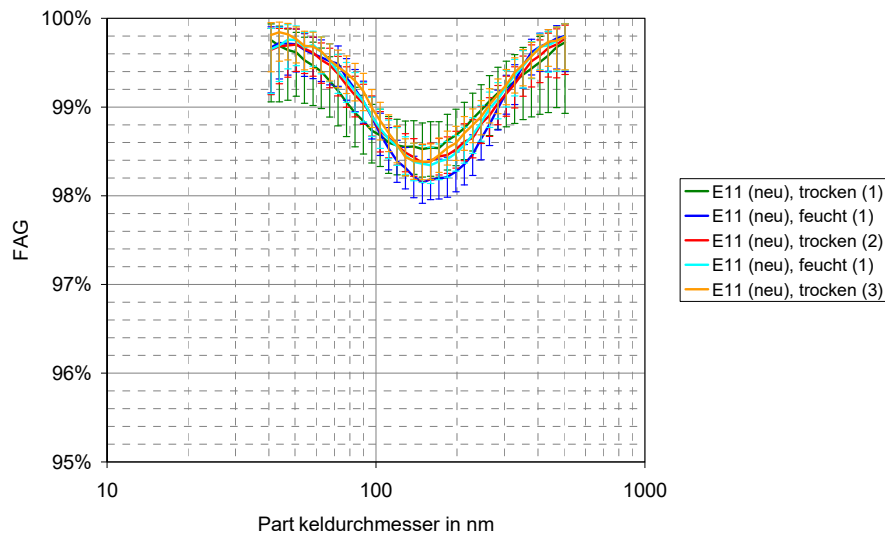


Abbildung 4.3-48: Fraktionsabscheidegrad bei Variation der rel. Feuchte (E11-Filter)

Die Variation der relativen Feuchte hat bei den hier betrachteten neuen Filter keinen Einfluss auf Druckverlust und Fraktionsabscheidegrad.

4.3.2.2 Mit Außenluft beladene Filterelemente bei Variation der Feuchte

Es werden der Einfluss der Luftfeuchte auf den Druckverlust und die Abscheideeffizienz an mit Außenluft beladenen Filtern dargestellt. Die beiden betrachteten Filtertypen stammen aus Anlagen am küstennahen Standort 3 in Westeuropa (E10-Filter) und am küstennahen Standort 1 in Südostasien (E11-Filter).

In Abbildung 4.3-49 ist zu sehen, wie sich der Druckverlust bei einem Volumenstrom von 3.400 m³/h und einer Temperatur von ca. 20°C als Funktion der relativen Luftfeuchte ändert. Bei Versuchsbeginn wurden die Filter im EN 779-Prüfkanal bei einer relativen Feuchte von ca. 40 % durchströmt. Die rel. Feuchte wurde dann auf 90 % erhöht und für ca. 40 Minuten gehalten. Es wurde dann die Feuchte auf 80 % und 50 % reduziert. Anschließend wurde ein zweiter Durchlauf durchgeführt. Wie in der Abbildung zu sehen ist, beträgt der Druckverlust des gebrauchten E10-Filters im Anfangszustand ca. 160 Pa und liegt damit 20 Pa oberhalb des Druckverlustes des neuen Filters. Bei der relativen Feuchte von 90 % steigt der Druckverlust auf ca. 220 Pa an. Wird die Feuchte dann auf 50 % reduziert, sinkt der Druckverlust wieder ungefähr auf das Ursprungsniveau. Der grundsätzliche Effekt des Anstiegens und dann wieder Abfallens ist auch im zweiten Durchlauf gegeben. Da der neue typgleiche Filter bei Variation der Feuchte keine relevanten Druckverluständerungen zeigte, ist der Effekt der Druckverluständerung also offensichtlich von den abgeschiedenen Partikeln abhängig.

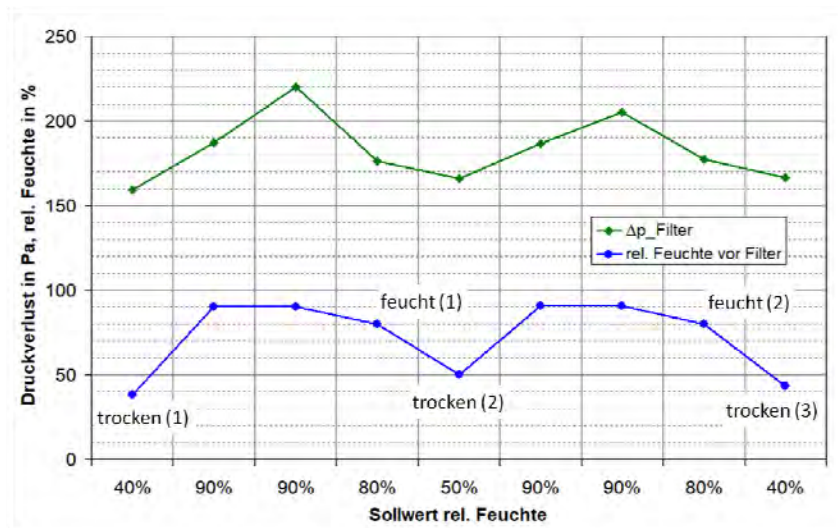


Abbildung 4.3-49: Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte für einen mit Außenluft beladenen E10-Filter

Die Variation der relativen Feuchte hat auch Auswirkungen auf die Effizienz der Filter. In Abbildung 4.3-50 wird der Fraktionsabscheidegrad des gebrauchten E10-Filters bei Variation der rel. Feuchte gezeigt. Es zeigt sich, dass die Effizienz bei 80 % Feuchte geringer ist, sie fällt in ersten Durchgang für Partikel mit einem Durchmesser von ca. 150 nm von 93 % auf 88 % ab. Nach Trocknung durch anschließende Durchströmung bei 50 % Feuchte ist tendenziell ein Wiederanstieg der Retention zu verzeichnen, wobei das ursprüngliche Niveau nicht wieder erreicht wird. Im zweiten Durchlauf zeigt sich ein gleichartiges Verhalten.

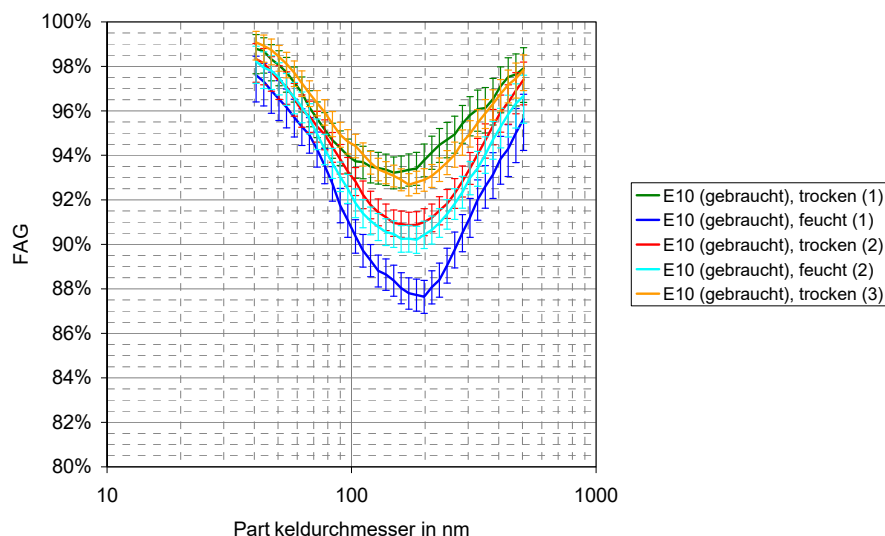


Abbildung 4.3-50: Fraktionsabscheidegrad bei Variation der rel. Feuchte eines mit Außenluft beladenem E10-Filter

Der mit Außenluft beladene Filter der Klasse E11 aus der Anlage am Standort 3 (Tabelle 4.1) zeigt ein gleichartiges Verhalten wie der zuvor untersuchte E10-Filter. Der Verlauf von Druckverlust und relativer Feuchte ist in Abbildung 4.3-51 dargestellt. Es erfolgte wiederum eine

Variation der rel. Feuchte von einem Anfangszustand von 50 % auf 90 % und ein Absenken auf 80 % und 50 % mit einem zweiten Durchlauf.

Der gebrauchte Filter hat durch die Beladung mit Außenluft einen Druckverlustanstieg um ca. 115 Pa im trockenen Anfangszustand auf ca. 275 Pa erfahren. Der Anstieg der rel. Feuchte auf 90 % führt zu einem Druckverlustanstieg von 30 Pa auf einen Wert von 305 Pa. Ein gleichartiges Verhalten ist im zweiten Durchlauf zu erkennen.

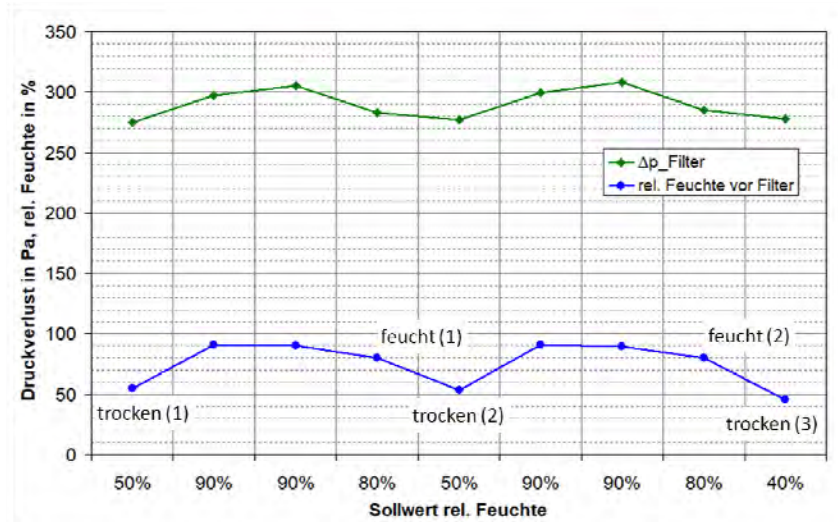


Abbildung 4.3-51: Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte für einen mit Außenluft beladenen E11-Filter

Auch die Fraktionsabscheidegrade des mit Außenluft beladenen E11-Filters (Abbildung 4.3-52) zeigen bei Variation der rel. Feuchte ein gleichartiges Verhalten wie der zuvor betrachtete E10-Filter (Abbildung 4.3-50). Im zweiten Durchlauf sinkt die Retention allerdings im feuchten Zustand noch weiter ab.

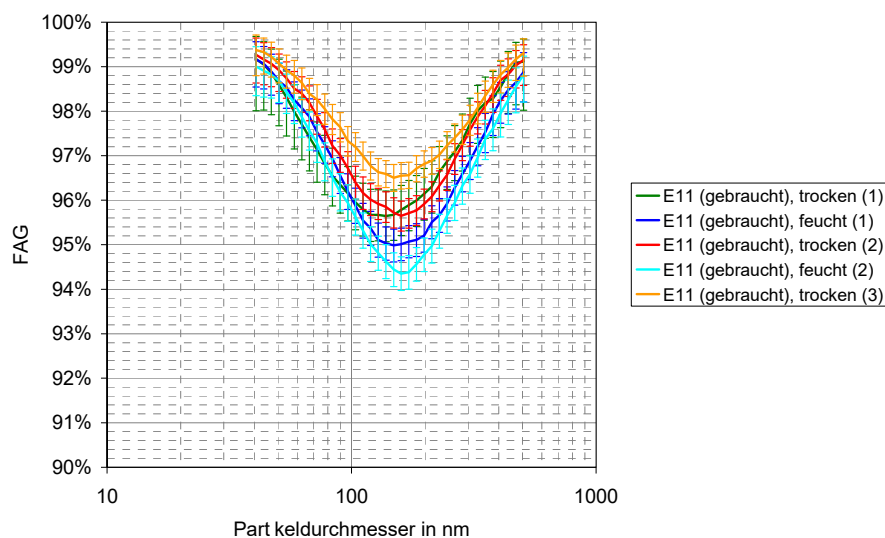


Abbildung 4.3-52: Fraktionsabscheidegrad bei Variation der rel. Feuchte eines mit Außenluft beladenem E11-Filter

Das Verhalten von Druckverlust und Fraktionsabscheidegrad der mit Außenluft beladenen Filter bei Variation der Feuchte wird durch die im Filtervlies abgeschiedenen Partikel bestimmt. Die erhöhten Salzfrachten in den Filtern aus den Anlagen der küstennahen Standorte (Abschnitt 4.2) führen zu einer Umstrukturierung innerhalb der Vliese. Bei Überschreiten der jeweiligen Deliqueszenzfeuchte gehen die Salze in Lösung und kristallisieren bei Unterschreiten der Effloreszenzfeuchte wieder aus. Die im feuchten Zustand im Filtervlies eingelagerten Flüssigkeitsvolumina verändern dessen Porosität bzw. den Strömungswiderstand. Entsprechend ist ein Anstieg des Druckverlustes zu erwarten. Nach Rekristallisation der Salzbestandteile der abgeschiedenen Partikel liegt eine andere Struktur vor als im Zustand, bevor sie in Lösung gegangen sind.

4.3.2.3 Salzbeladene Filterelemente bei Variation der Feuchte

Wie bei den Untersuchungen an Filtermedien (Abschnitt 4.3.1) wurden konfektionierte Filterelemente mit NaCl-Salz beladen und anschließend mit feuchter Luft konditioniert.

Hierbei wurden zwei unterschiedliche Methoden der Salzbeladung untersucht. Bei der ersten Methode wurde NaCl-Salz mittels einer Kugelmühle aufgemahlen und mit einem ASHRA-Banddosierer (Abbildung 4.3-53) in den Prüfkanal nach EN 779 eingebracht.

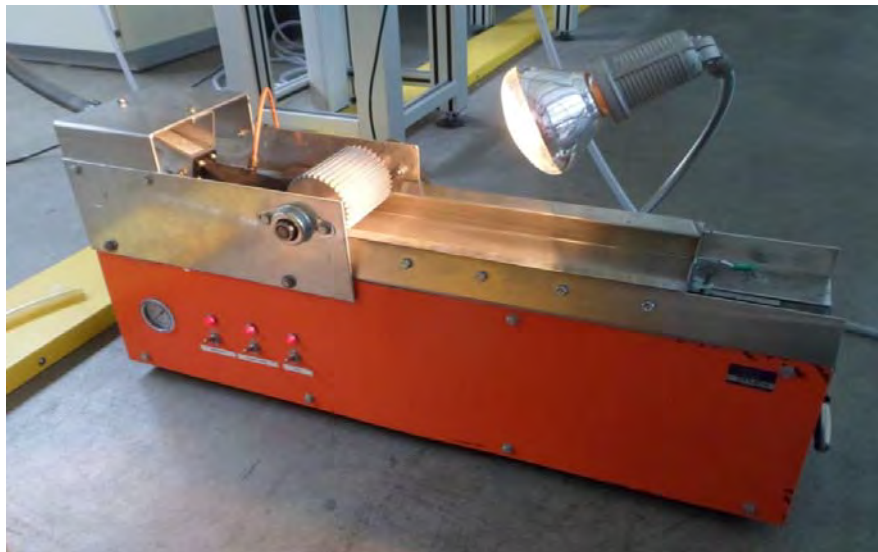


Abbildung 4.3-53: ASHRAE-Dosierer zur Salz-Beladung

Für die zweite Aufgabemethode wurde ein Sprühturm (Abbildung 4.3-54) verwendet, der fester NaCl-Partikel aus einer Salzlösung erzeugt.



Abbildung 4.3-54: Sprühturm zur Erzeugung von NaCl-Partikeln

Mit den beiden Partikelgeneratoren werden die in Abbildung 4.3-55 dargestellt Partikelanzahlkonzentrationsverteilungen erzeugt. Mit dem aufgemahlene Salz und dem ASHRAE-Dosierer erzeugt man im Vergleich zum Sprühturm größere Partikel mit einem Modaldurchmesser von ca. 500 nm (blaue Kurve). Wohingegen der Modaldurchmesser für die Partikel aus der Salzlösung 350 nm beträgt (rote Kurve).

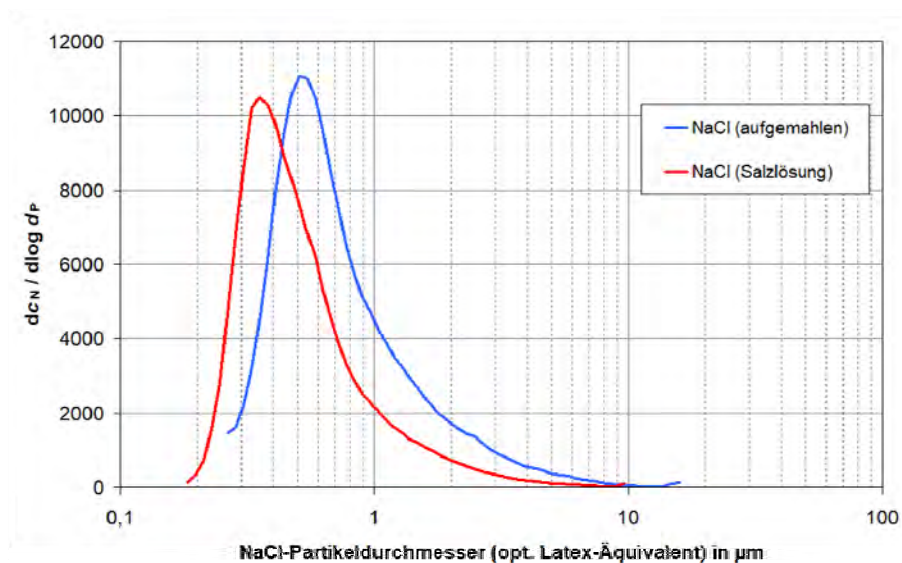


Abbildung 4.3-55: NaCl-Anzahlgrößenverteilung für unterschiedliche Generierungsverfahren

Ein natürliches Seesalz-Aerosol hat eine bimodale Verteilung mit zwei ausgeprägte Peaks bei Modaldurchmessern von 50 nm bis 60 nm und 200 nm bis 300 nm (Abbildung 4.3-56).

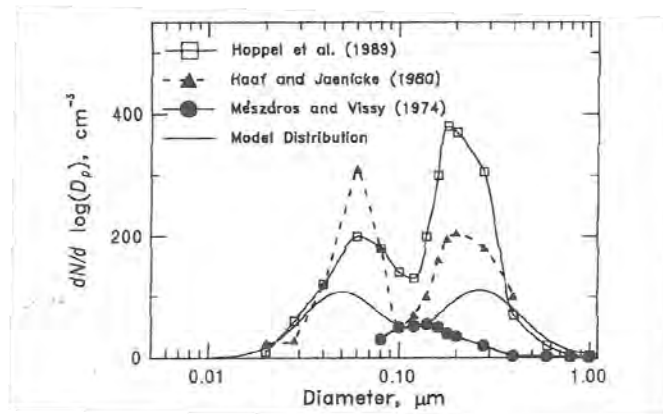


Abbildung 4.3-56: Anzahlgrößenverteilung: natürliches Seesalz-Aerosol [27]

Die mit dem Sprühturm erzeugten NaCl-Partikel haben einen Partikeldurchmesser, der in der Größenordnung des größeren Modes eines natürlichen Seesalz-Aerosols liegt.

Für die Untersuchungen zum Einfluss der rel. Feuchte auf mit Salz beladene konfektionierte Filter, wurde ein E10-Kassettenfilter mit 6,6 g/m² aufgemahlenem Salz beladen und ein anderer baugleicher Filter mit 2 g/m² mittels Sprühturm erzeugtem Salz.

Trockener Anfangszustand

Zunächst wird der Einfluss der Salzbeladung im trockenen Zustand betrachtet. Der Druckverlust als Funktion des Volumenstroms für diese beiden beladenen Filter wird in Abbildung 4.3-57 mit einem Filter im Neuzustand (schwarze Kurve) verglichen. Man erkennt, dass der Filter, der mit Salz aus dem Sprühturm beladen wurde (rote Kurve) den höchsten Druckverlustanstieg erfährt. Die Druckverlustzunahme bei 3.400 m³/h beträgt gegenüber dem Filter im Neuzustand 8 Pa. Obwohl der mit aufgemahlenem Salz beaufschlagte Filter (blaue Kurve) eine höhere Massenzunahme erfahren hat, ist die Druckverlustzunahme gegenüber dem Filter im Neuzustand niedriger. Sie beträgt 4 Pa bei 3.400 m³/h.

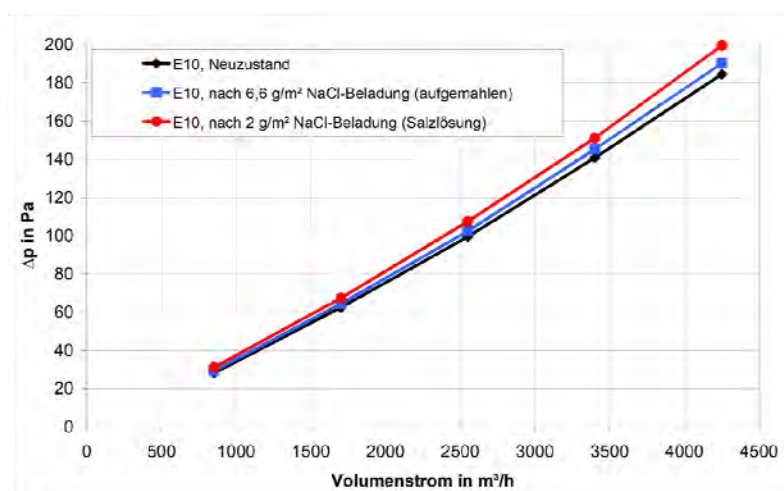


Abbildung 4.3-57: Druckverlust: E10-Kassettenfilter (Neuzustand, nach NaCl-Beladung)

Die DEHS-Effizienzen des neuen und der beladenen Filterelemente sind in Abbildung 4.3-58 vergleichend gegenübergestellt. Die Fraktionsabscheidegradkurve des mit aufgemahlenem Salz beaufschlagten Filters (rote Kurve) liegt etwas unterhalb der Kurve des Filters im Neuzustand (schwarze Kurve). Im MPPS bei einem Durchmesser von ca. 150 nm ist die Effizienz 0,5 Prozentpunkte geringer. Bei der Beaufschlagung mit Salz aus dem Sprühturm ist der MPPs hin zu größeren Durchmesser verschoben, er liegt bei ca. 170 nm (blaue Kurve). Der Fraktionsabscheidegrad im MPPs beträgt ca. 96 %.

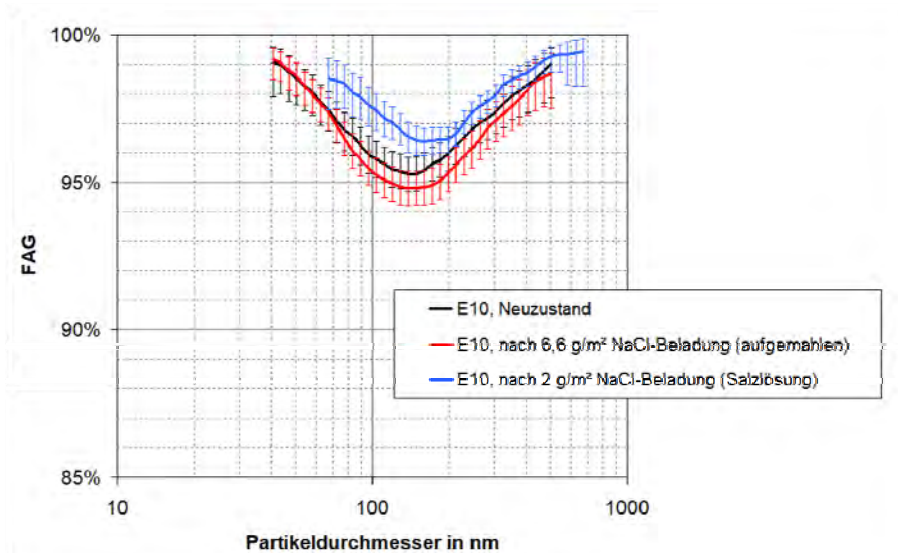


Abbildung 4.3-58: Fraktionsabscheidegrade: E10-Kassettenfilter (Neuzustand, nach NaCl-Beladung)

Variation der relativen Feuchte

Nachfolgend wird der Einfluss der Luftfeuchte auf den Druckverlust und die Abscheideeffizienz an den mit NaCl-Partikeln beladenen E10-Kassettenfiltern dargestellt. Die im vorstehenden Absatz betrachteten E10-Kassettenfilter, die mit NaCl-Partikeln beladen wurden, wurden danach im Prüfkanal nach EN 779 einer erhöhten relativen Feuchte von ca. 90 % ausgesetzt.

In Abbildung 4.3-59 ist zu erkennen, wie sich der Druckverlust bei einem Volumenstrom von 3.400 m³/h und einer Temperatur von ca. 20°C als Funktion der relativen Luftfeuchte ändert. Nach der NaCl-Beladung mittels ASHRAE-Dosierer wurde die relative Feuchte von ca. 60 % auf 90 % erhöht, für ca. 90 Minuten gehalten bis ein konstanter Druckverlust erreicht war und anschließend wieder auf ca. 60 % abgesenkt. Während der Befeuchtung stieg der Druckverlust lediglich um ca. 2 Pa an. An den Punkten 1 (Beginn), 2 (Ende der NaCl-Dosierung), 3 (Ende der Befeuchtung) und 4 (ca. 60 % rel. Feuchte) wurde jeweils der Fraktionsabscheidegrad bestimmt.

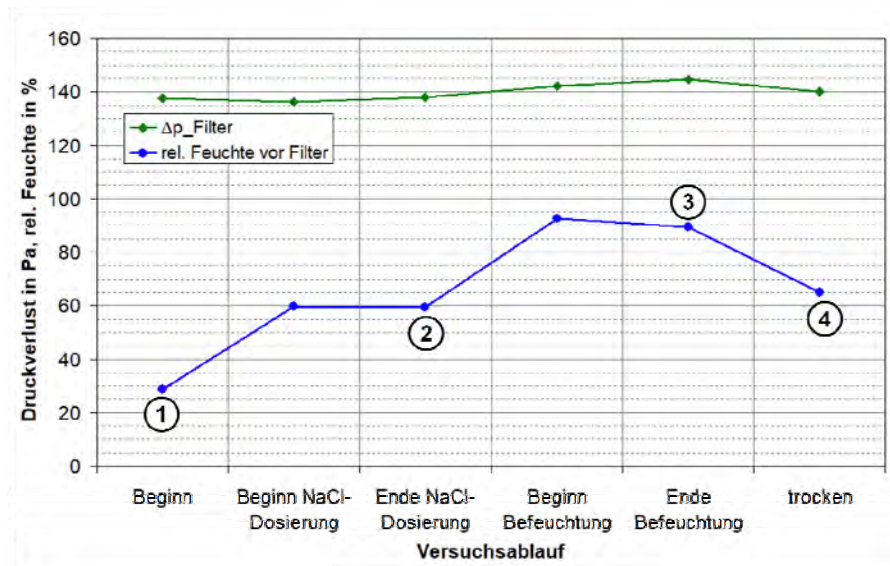


Abbildung 4.3-59: Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte bei Beladung eines E10-Filters mit NaCl (ASHRAE-Dosierer)

In Abbildung 4.3-60 werden die Fraktionsabscheidegradkurven, die an den Punkten 1 bis 4 bestimmt wurden, gezeigt. Wie schon in Abbildung 4.3-58 dargestellt, liegt die Fraktionsabscheidegradkurve des mit aufgemahlenem Salz beaufschlagten Filters (rote Kurve) etwas unterhalb der Kurve des Filters im Neuzustand (schwarze Kurve). Durch die Erhöhung der rel. Feuchte wird der Fraktionsabscheidegrad noch etwas geringer (grüne Kurve). Durch das anschließende Absenken der rel. Feuchte auf ca. 60 % liegt die Fraktionsabscheidegradkurve (graue Kurve) wieder auf einem vergleichbaren Niveau wie vor der Feuchtevariation (rote Kurve).

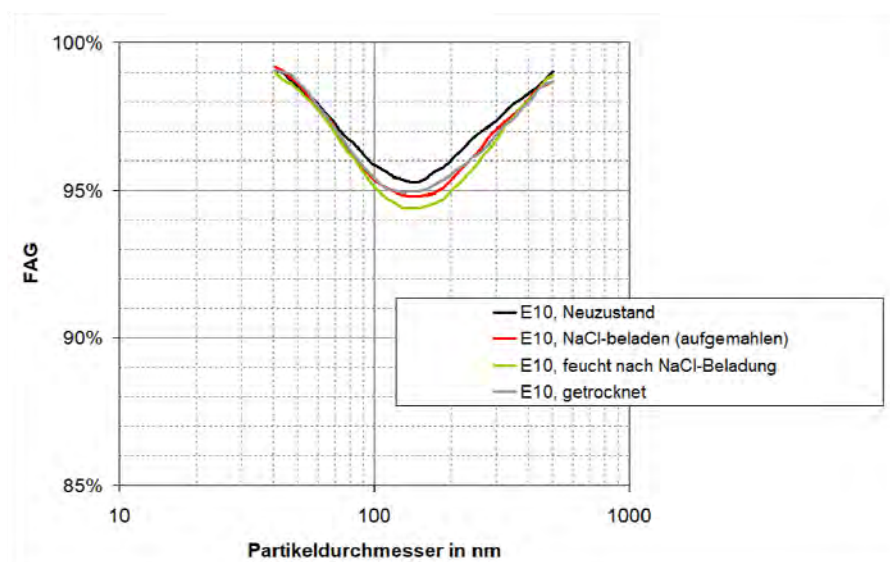


Abbildung 4.3-60: Fraktionsabscheidegrad bei Variation der rel. Feuchte eines mit NaCl-beladenem E10-Filters (ASHRAE-Dosierer)

Der Verlauf des Druckverlustes für den Filter, der mit Salz aus dem Sprühturm beladen wurde, ist in Abbildung 4.3-61 zu sehen. Die Beladung mit NaCl führt zu einem Druckverlustanstieg von ca. 15 Pa, die Erhöhung der rel. Feuchte auf ca. 85 % hat keinen Einfluss auf den Druckverlust. Auch hier wurde an den markierten Zeitpunkten 1 bis 4 im Verlauf jeweils der Fraktionsabscheidegrad bestimmt. Diese Kurven sind in Abbildung 4.3-62 dargestellt.

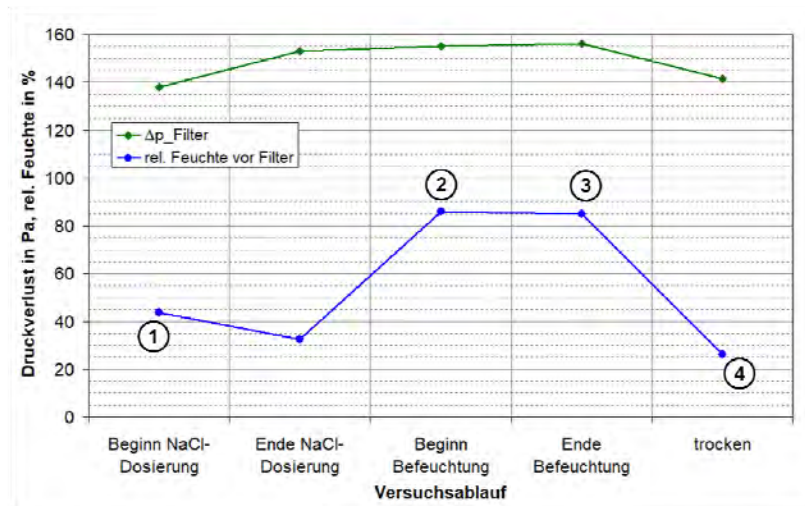


Abbildung 4.3-61: Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte bei Beladung eines E10-Filters mit NaCl (Sprühturm)

Die schwarze bzw. blaue Kurve in Abbildung 4.3-62 entspricht der farbgleichen Kurve in Abbildung 4.3-58 für den Filter im Neuzustand bzw. für den Filter, der mit NaCl-Partikeln aus der Salzlösung mittels Sprühturm beladen wurde.

Eine Erhöhung der rel. Feuchte auf ca. 85 % führt zu einem deutlichen Absinken der Effizienz (grüne Kurve) auf das Niveau des neuen Filters mit Verschiebung des MPPS hin zu größeren Partikeldurchmessern. Das anschließende Absenken der rel. Feuchte auf ca. 25 % führt zu einer weiteren Abnahme der Effizienz (graue Kurve). Der Fraktionsabscheidegrad im MPPS liegt bei ca. 95 %.

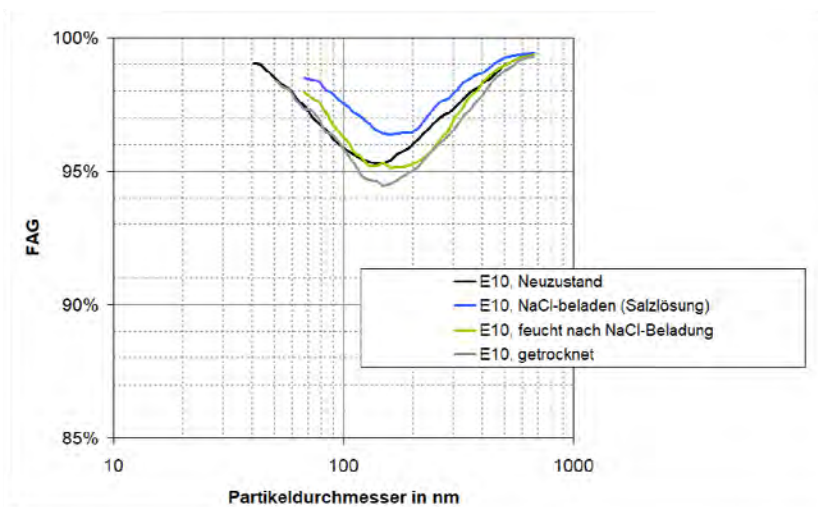


Abbildung 4.3-62: Fraktionsabscheidegrad bei Variation der rel. Feuchte eines mit NaCl-beladenem E10-Filters (Sprühturm)

4.4 Experimentelle Untersuchungen zur Vermeidung von Tropfenschlag durch Einsatz von vorgeschalteten Tropfenabscheidern

Um eine Wassertröpfchenfracht mit konstanter Konzentration und gleichbleibender Partikelgröße zu erzeugen, wurde der Prüfaufbau der Forschungsstelle 1 durch einen Constant Output Atomizer der Firma TSI erweitert. Das folgende Bild zeigt den Einbauort des Zerstäubers.

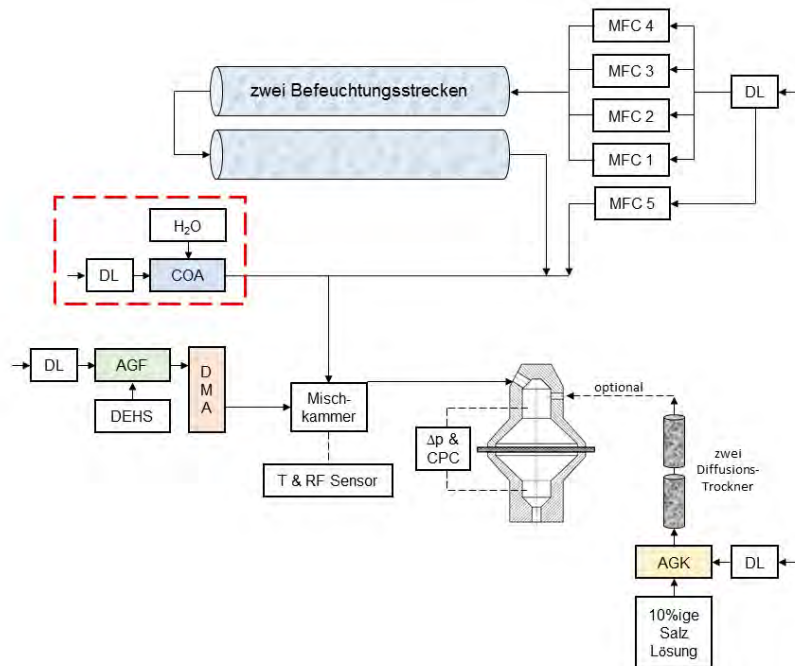


Abbildung 4.4-1: erweiterter Prüfaufbau mit Zerstäuber zur Bereitstellung von Wassertröpfchen.

Die Größenverteilung der Wassertropfen zeigt die folgende Abbildung (Abbildung 4.4-2).

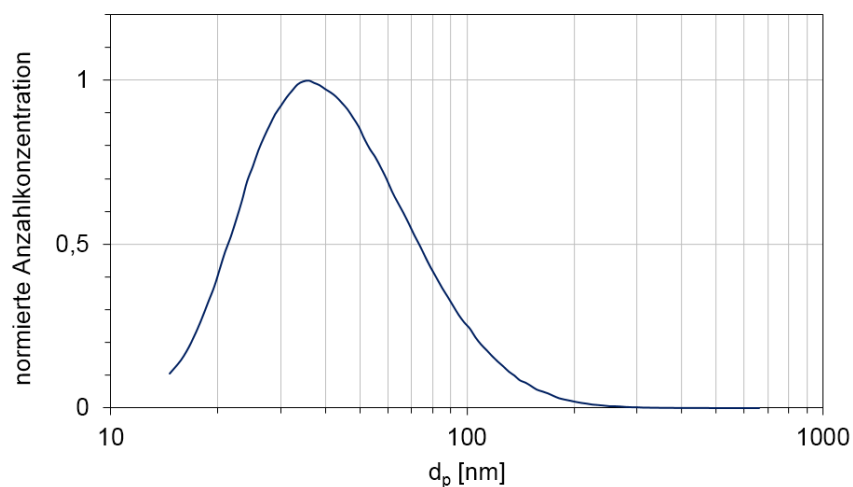


Abbildung 4.4-2: normierte Größenverteilung der bereitgestellten Wassertropfen.

Dieser Aufbau wurde sowohl für die Untersuchung von Koaleszern verwendet, als auch für die Experimente zum Tropfenschlag auf Medien (Vergleich Kapitel 4.5).

Bei dem Prüfaufbau der Forschungsstelle 1 wird das Filtermedium waagrecht in den Filterhalter eingespannt, Ober- und Unterteil werden durch eine überstehende Manschette passgenau ineinander eingesetzt und über einen Bügel fixiert. Da sich bei dieser Anordnung das abgeschiedene Wasser auf dem Filtermedium sammeln würde und die Drainage-Wirkung damit verhindert wäre, wurde der Filterhalter gedreht. Dazu musste die Halterung inklusive des Fixierbügels abgebaut werden, um sicher zu stellen, dass alle Zuführungen waagrecht angeordnet sind. Für die Koaleszer-Tests wurden an der Universität zwei unterschiedliche Koaleszer-Materialien in den gedrehten Filterhalter eingespannt und mit Wassertröpfchen beaufschlagt. Sowohl den Aufbau der gedrehten Prüffilteraufnahme, als auch die Medien zeigen die folgenden Abbildungen (Abbildung 4.4-3 und Abbildung 4.4-4).

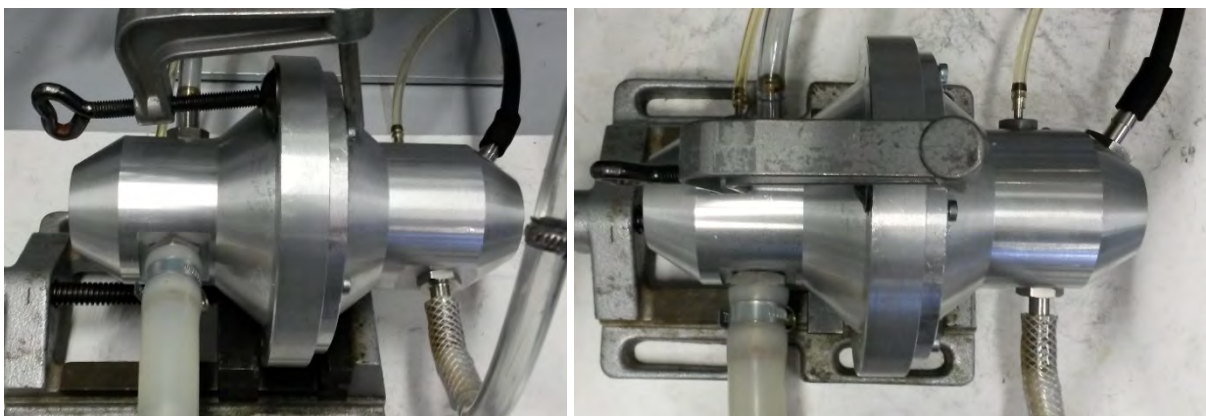


Abbildung 4.4-3: gedrehter Filterhalter.

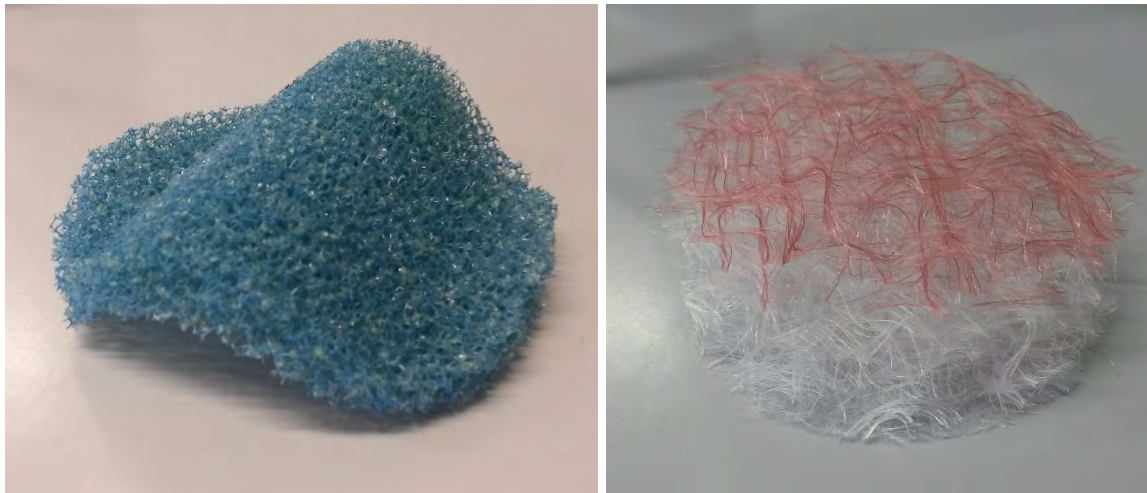


Abbildung 4.4-4: Koaleszer-Medien.

Als Anströmgeschwindigkeit wurde eine Geschwindigkeit von ca. 2,5 cm/s und als Vergleich auch 8 cm/s gewählt. Um eine konstante Tropfenbeaufschlagung zu gewährleisten, wurde der jeweilige Volumenstrom der feuchten Luft bei knapp 90 % r.F. mit dem Volumenstrom eines Constant-Output-Atomizers gemischt. Die maximale Tropfenkonzentration war dabei abhängig

von der oberen Zählgrenze der beiden CPCs. Durch die Mischung der trockenen, mit Tropfen beladenen Luft und der feuchten Luft ergab sich eine relative Feuchte im Filterhalter von knapp 90 %. Die Tropfenkonzentration und die relative Feuchte über eine Stunde sind im folgenden Diagramm dargestellt.

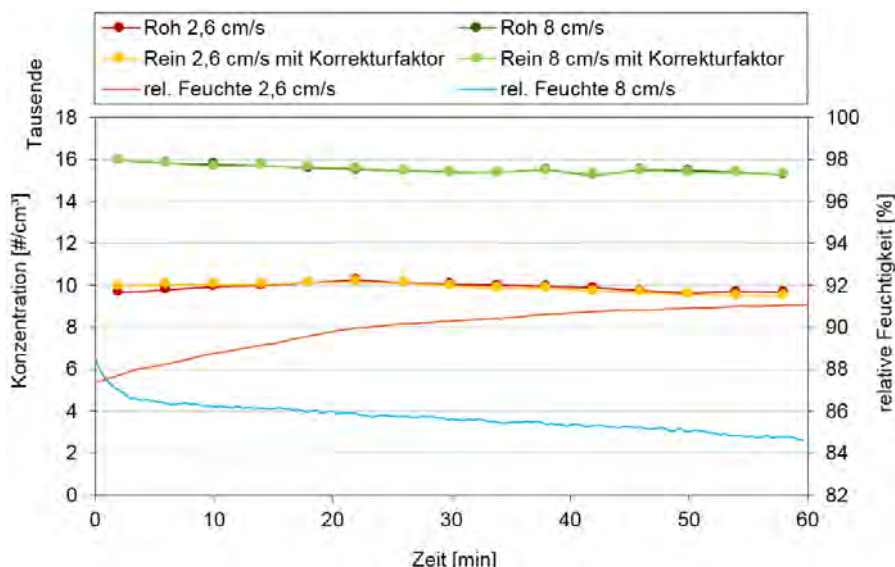


Abbildung 4.4-5: Mit Atomizer bereitgestellte Tropfenkonzentration und relative Feuchte über der Zeit.

Nach Einbau des jeweiligen Koaleszer-Mediums wurde eine Stunde lang die Anzahlkonzentration roh- und reingasseitig mittels zweier CPCs gemessen, am Anfang und am Ende der Messung wurden zusätzliche Abscheidegradkurven mit dem SMPS aufgenommen. Die Ergebnisse der Messreihen sind im Folgenden dargestellt.

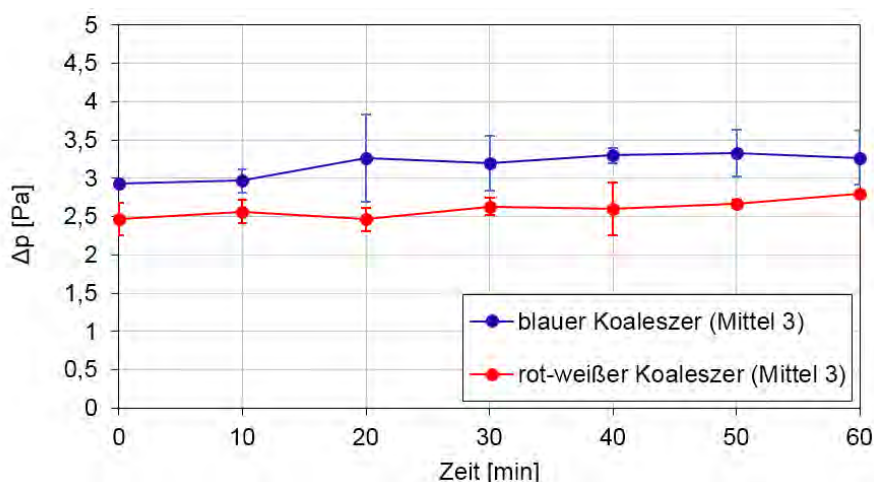


Abbildung 4.4-6: Druckverlust zweier Koaleszer-Medien bei Beaufschlagung mit Wassertröpfchen.

Wie in Abbildung 4.4-6 zu erkennen ist, verändert sich der Druckverlust der Koaleszer-Medien kaum innerhalb einer Stunde Beaufschlagung mit feuchter Luft und Wassertröpfchen. Beide Medien zeigen nur einen minimalen Anstieg über den Verlauf der Zeit, der innerhalb von 0,5 Pa liegt.

Auch die Retention der gesamten Tropfenfracht über die Zeit, berechnet aus den roh- und reingasseitigen Zählereignissen der CPCs, zeigt einen konstanten Verlauf. Lediglich beim rot-weißen Koaleszer-Medium zeigt sich am Anfang ein negativer Ausschlag, der allerdings durch einen schlechten Messpunkt, durch beispielsweise das Abreißen eines Tropfens, bei einem der drei vermessenen rot-weißen Medien begründet liegt, wie auch die Fehlerbalken zeigen.

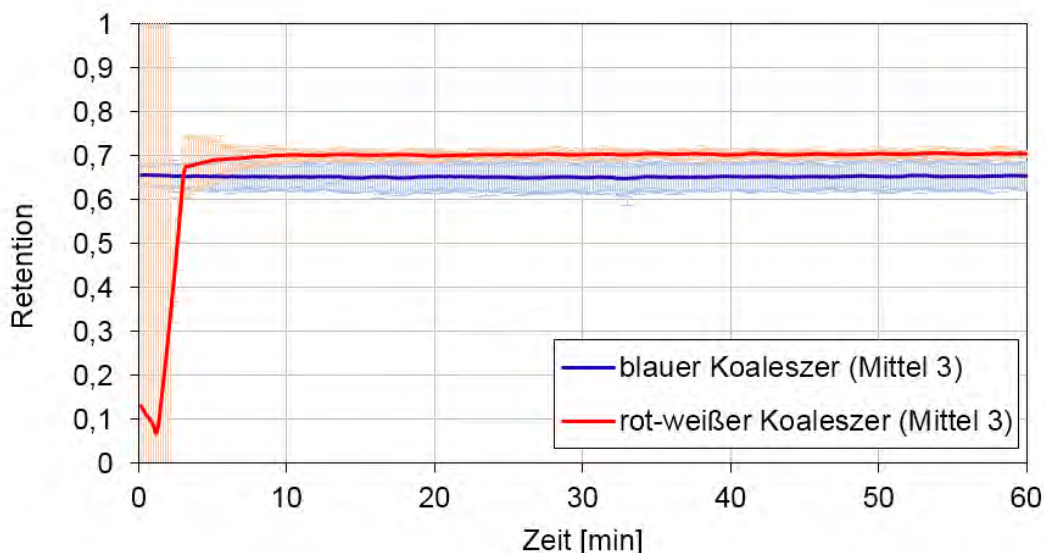


Abbildung 4.4-7: Retention zweier Koaleszer-Medien bei Beaufschlagung mit Wassertröpfchen.

Zusätzlich zu den roh- und reingasseitigen CPC-Zählungen wurden Retentionen am Anfang und am Ende der Tropfenbeaufschlagung mittels SMPS gemessen. Die Ergebnisse für die beiden Koaleszer-Medien zeigt Abbildung 4.4-8.

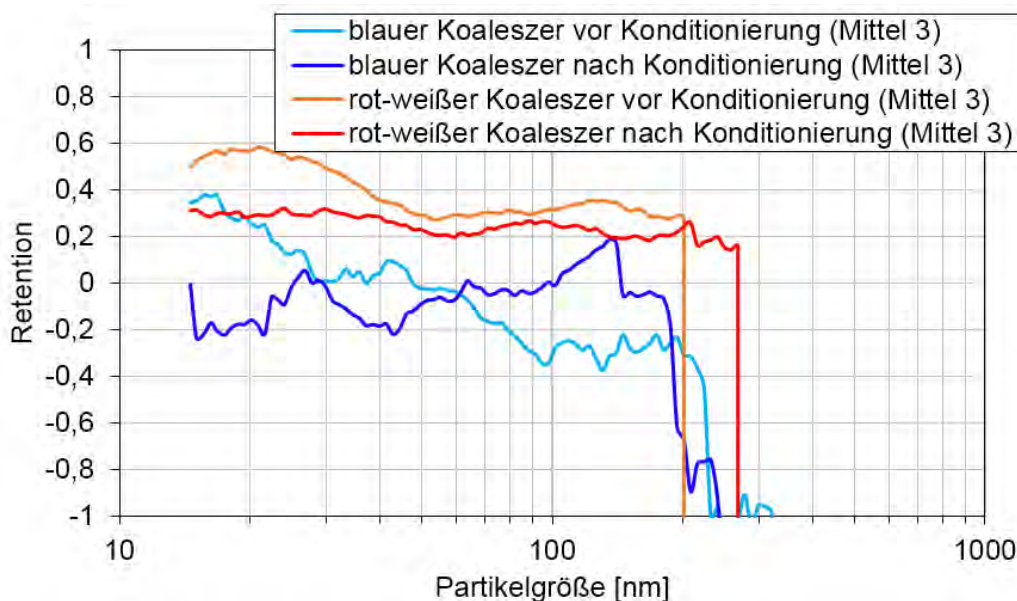


Abbildung 4.4-8: Retention zweier Koaleszer-Medien bei Beaufschlagung mit Wassertröpfchen mittels SMPS gemessen.

Anhand der Abbildung wird deutlich, dass eine Vermessung von Koaleszer-Medien an einem Filterhalter mithilfe des SMPS nicht durchführbar ist. Besonders im Bereich größerer Partikeldurchmesser wurden bei allen Messungen keine positiven Werte für die Retention ermittelt. Ein Grund dafür könnte sein, dass mehr Tropfen aus dem Koaleszer mitgerissen wurden, als durch die Drainage-Wirkung abgelaufen sind.

Da Tests an Koaleszer-Medien mit dem Filterhalter nicht sinnvoll durchgeführt werden können, wurden die weiteren Untersuchungen an der Forschungsstelle 2 durchgeführt.

Untersuchungen der Koaleszer im Prüfkanal nach EN 779

Die beiden in Abbildung 4.4-4 dargestellten Koaleszer-Medien aus Schaumstoff (blau, linkes Bild) und aus Glasfaser (weiß, rechtes Bild) wurden im Prüfkanal nach EN 779 untersucht.

Für die Aerosoldosierung wurde eine Zweistoffdüse in den Prüfkanal entgegen der Luftströmungsrichtung eingebaut. Konzentrationen und Größenverteilungen des Aerosols wurden mit einem optischen Partikelzähler gemessen, hier einem „welas“ der Firma Palas.

Es wurde der Einfluss der eingedüsten Wassermenge auf den Abscheidegrad untersucht. Es wurden Wassermengen von 1 l/h und 5 l/h betrachtet. Das Tropfenspektrum ist in Abbildung 4.4-9 dargestellt. Es ergaben sich bei den beiden betrachteten Wassermenge bimodale Verteilungen mit Modaldurchmessern von ca. 0,7 μm und 4 μm .

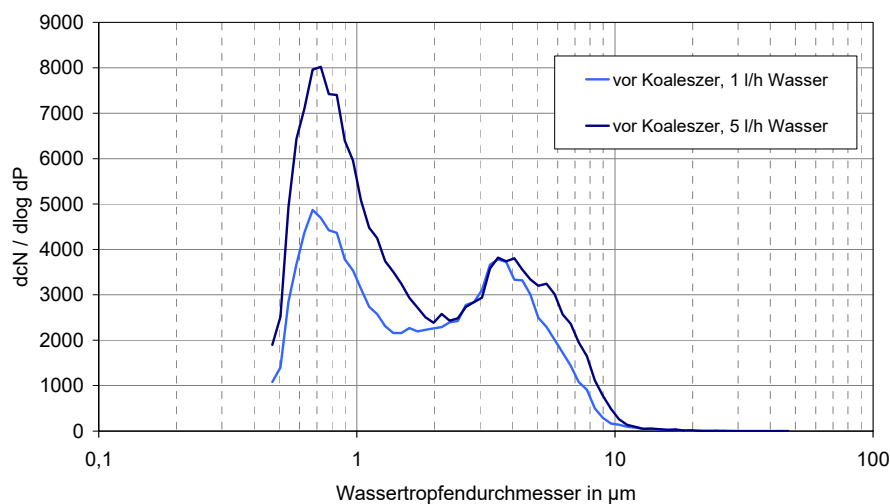


Abbildung 4.4-9: Anzahlgrößenverteilung der bereitgestellten Wassertropfen

In Abbildung 4.4-10 ist der Verlauf des Druckverlustes über dem gesamten Versuchsablauf für eine Wasserdosierung von 1 l/h zu erkennen. Der Druckverlust steigt von 43 Pa auf 68 Pa im gesättigten Zustand an.

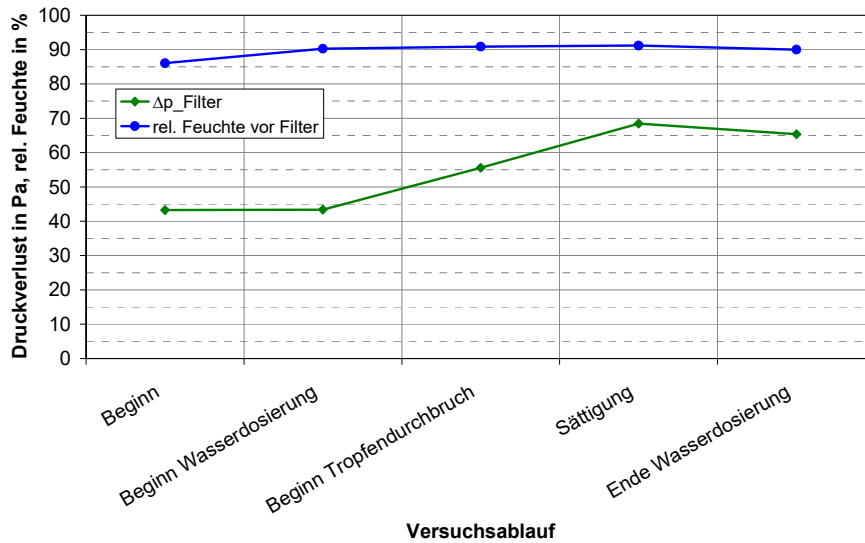


Abbildung 4.4-10: Koaleszer (Schaumstoff): Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte bei Beaufschlagung mit Wassertropfen (1 l/h)

Der Fraktionsabscheidegrad des Koaleszers aus Schaumstoff für die Wasserbeaufschlagung mit 1 l/h ist in Abbildung 4.4-11 gezeigt. Der 50 %-Abscheidegrad liegt bei einem Wassertropfendurchmesser von ca. 0,83 μm .

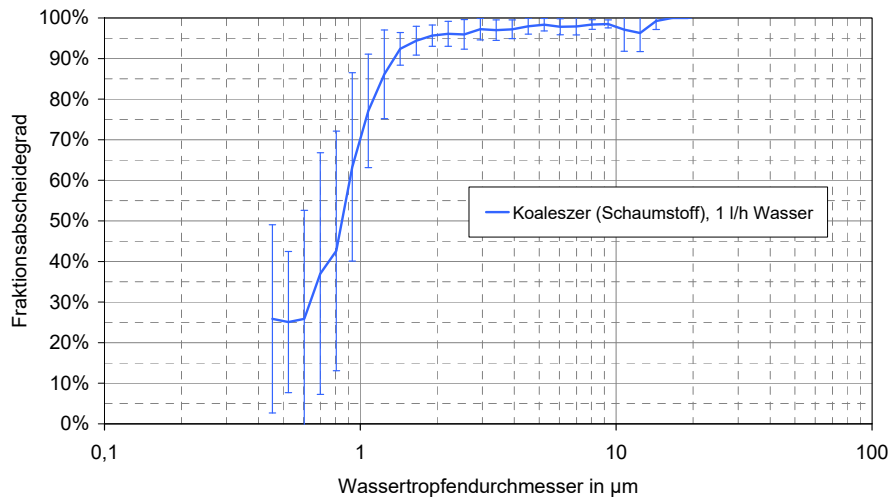


Abbildung 4.4-11: Koaleszer (Schaumstoff): Fraktionsabscheidegrad bei Beaufschlagung mit Wassertropfen (1 l/h)

Für eine Wasserdosierung von 5 l/h steigt der Druckverlust von 43 Pa auf 105 Pa im gesättigten Zustand an (Abbildung 4.4-12).

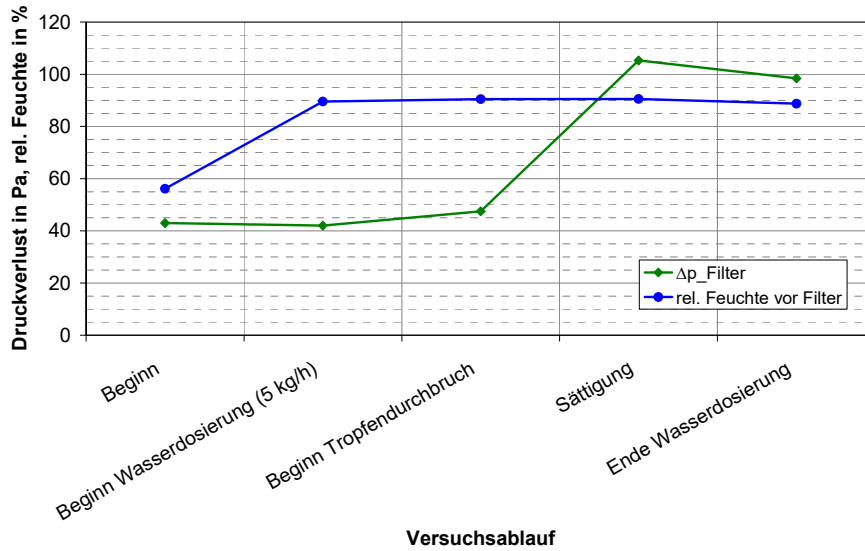


Abbildung 4.4-12: Koaleszer (Schaumstoff): Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte bei Beaufschlagung mit Wassertropfen (5 l/h)

Der Fraktionsabscheidegrad des Koaleszers aus Schaumstoff für die Wasserbeaufschlagung mit 5 l/h ist in Abbildung 4.4-13 dargestellt. Der 50 %-Abscheidegrad liegt bei einem Wassertropfendurchmesser von ca. 0,93 μm . Das Absinken des Fraktionsabscheidegrades bei größeren Partikeldurchmessern von ca. 4 μm ist reproduzierbar.

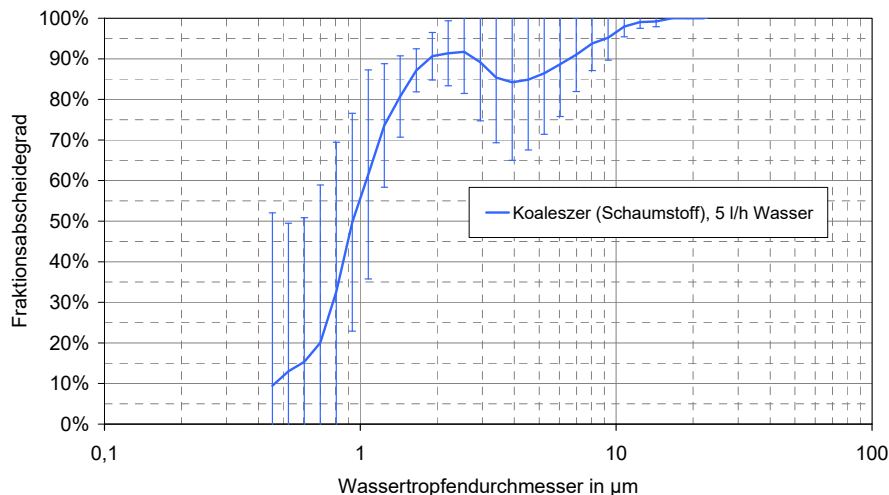


Abbildung 4.4-13: Koaleszer (Schaumstoff): Fraktionsabscheidegrad bei Beaufschlagung mit Wassertropfen (5 l/h)

Der Koaleszer aus Glasfasermaterial wurde ebenfalls mit Wassertropfen beaufschlagt. Für eine Wassermenge von 1 l/h ergab sich der in Abbildung 4.4-14 gezeigte Verlauf des Druckverlustes. Es ergab sich ein Druckverlustanstieg von 58 Pa auf 148 Pa im gesättigten Zustand.

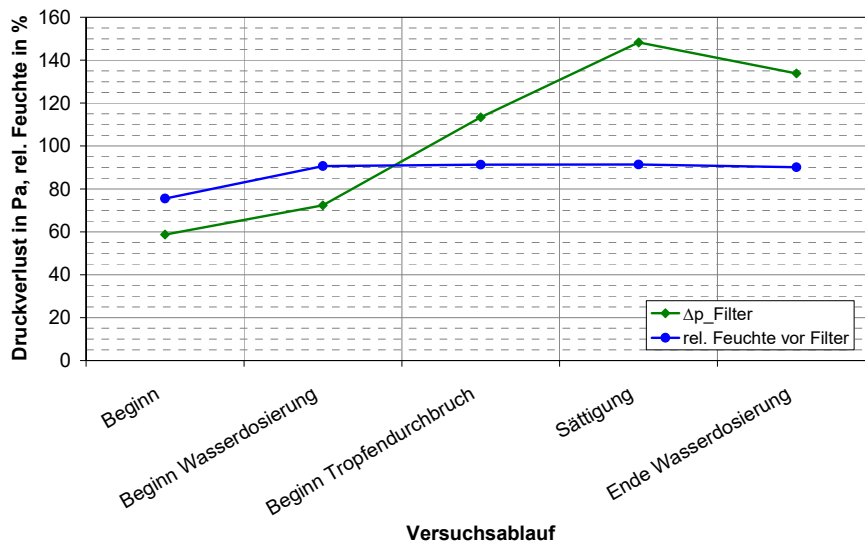


Abbildung 4.4-14: Koaleszer (Glasfaser): Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte bei Beaufschlagung mit Wassertropfen (1 l/h)

Für die Beaufschlagung mit 1 l/h Wasser liegt der 50 %-Abscheidegrad bei einem Wassertropfendurchmesser von ca. 1 μm (Abbildung 4.4-15).

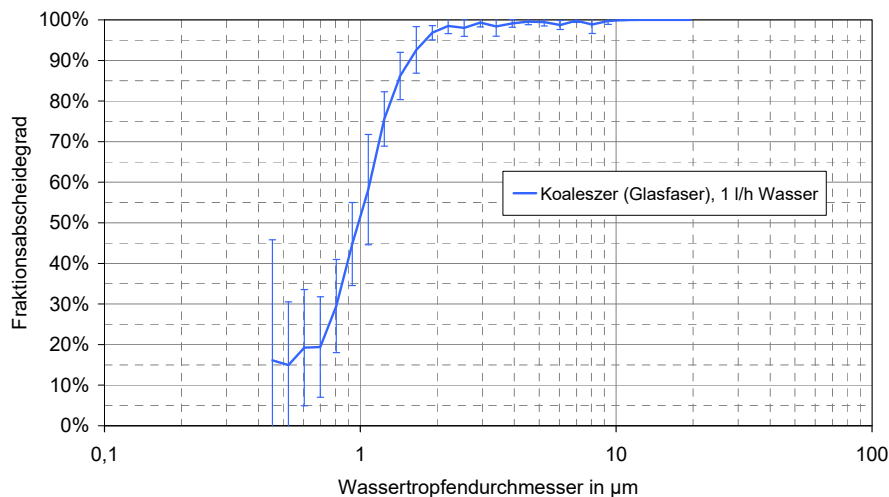


Abbildung 4.4-15: Koaleszer (Glasfaser): Fraktionsabscheidegrad bei Beaufschlagung mit Wassertropfen (1 l/h)

Wie Abbildung 4.4-16 zeigt, führt eine Beaufschlagung mit 5 l/h Wasser in Tropfenform zu einem erhöhten Druckverlustanstieg von 58 Pa auf 166 Pa im gesättigten Zustand.

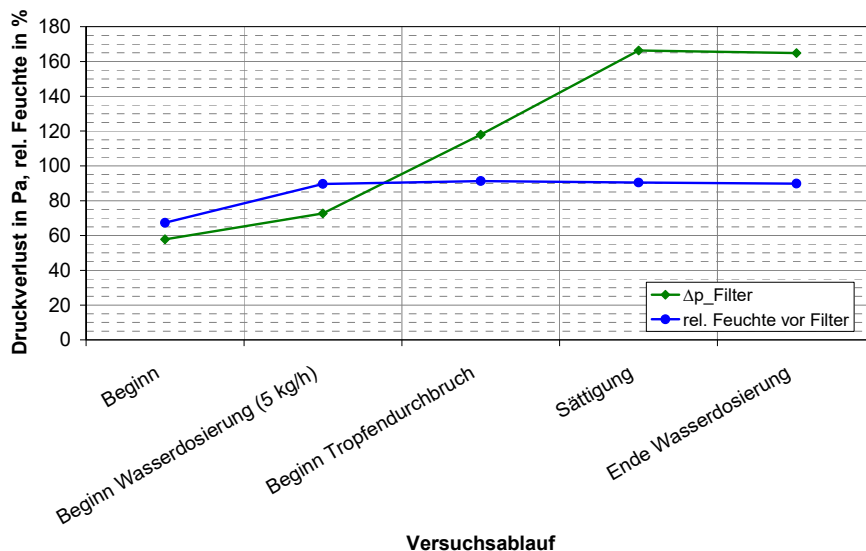


Abbildung 4.4-16: Koaleszer (Glasfaser): Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte bei Beaufschlagung mit Wassertropfen (5 l/h)

Der Koaleszer scheidet bei der höheren Wasseraufgabe von 5 l/h deutlich besser ab. Für einen Durchmesser von 1 µm liegt die Abscheidung bei über 95 % (Abbildung 4.4-17).

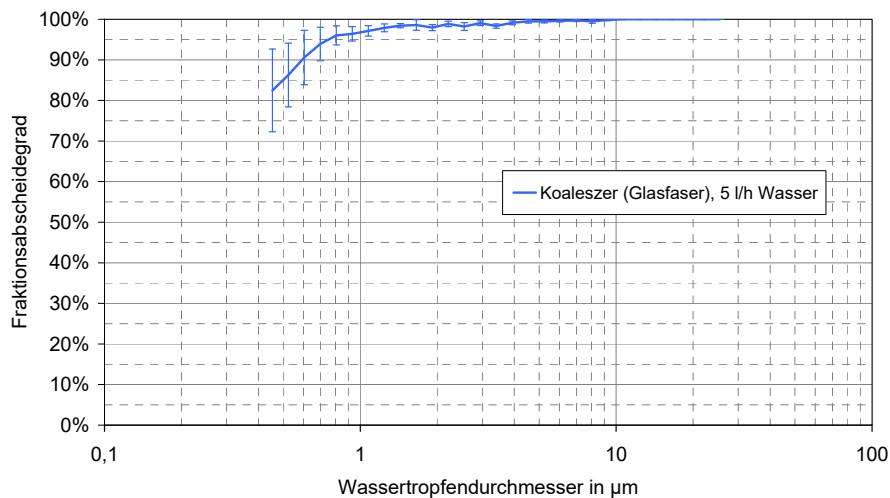


Abbildung 4.4-17: Koaleszer (Glasfaser): Fraktionsabscheidegrad bei Beaufschlagung mit Wassertropfen (5 l/h)

4.5 Experimente zum Tropfenschlag auf Medien und Filter

4.5.1 Einfluss von Luftfeuchte und Wassertropfen auf Filtermedien und konfektionierte Filter

Filtermedien

Um die Unterschiede der Beeinflussung von feuchter Luft und feuchter Luft mit Wassertropfen heraus zu stellen, wurden zunächst zwei Messreihen an je drei unterschiedlichen Filtermedien durchgeführt:

- trocken – feuchte Luft – getrocknet
- trocken – feuchte Luft und Wassertröpfchen – getrocknet

Vor den eigentlichen DEHS-Fraktionsabscheidegrad-Messungen wurden die Filtermedien jeweils eine Stunde konditioniert. Für die Anströmgeschwindigkeit wurde ein Wert von 2 cm/s gewählt, um eine Vergleichbarkeit mit vorigen Ergebnissen zu sicher zu stellen. Während der Messung wurde der Atomizer ausgeschaltet, um eine klare Trennung zwischen durchdringenden DEHS- und Wassertröpfchen zu gewährleisten. Die Ergebnisse beider Messreihen sind im Folgenden dargestellt.

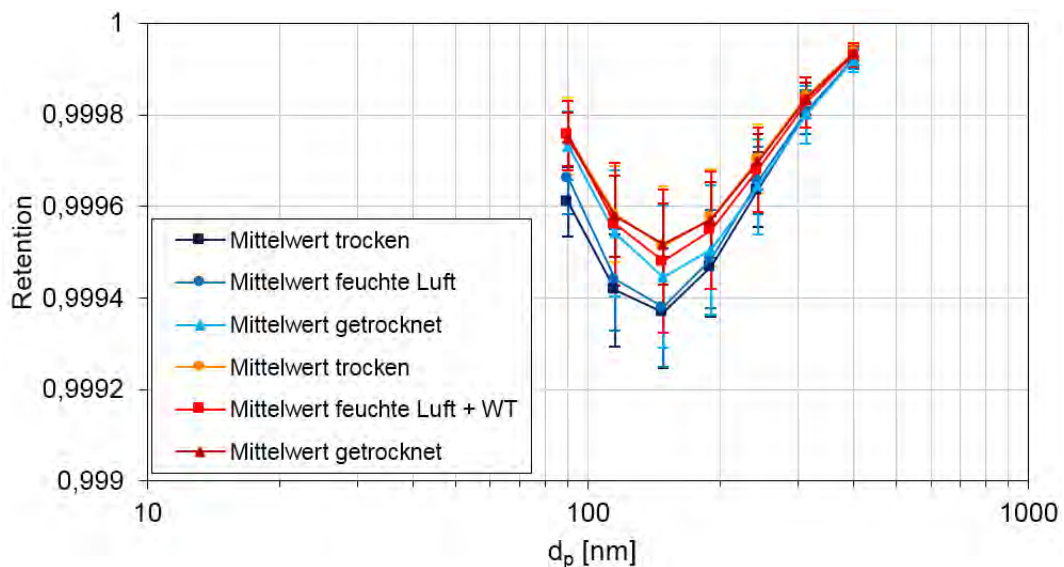


Abbildung 4.5-1: Fraktionsabscheidegrade eines Glasfaser-Mediums der Filterklasse E12.

Zu erkennen ist, dass sich bei diesem Glasfasermedium der Fraktionsabscheidegrad bei Beaufschlagung mit feuchter Luft und Wassertröpfchen leicht verbessert. Generell liegen allerdings alle Retentionskurven sehr nah beieinander.

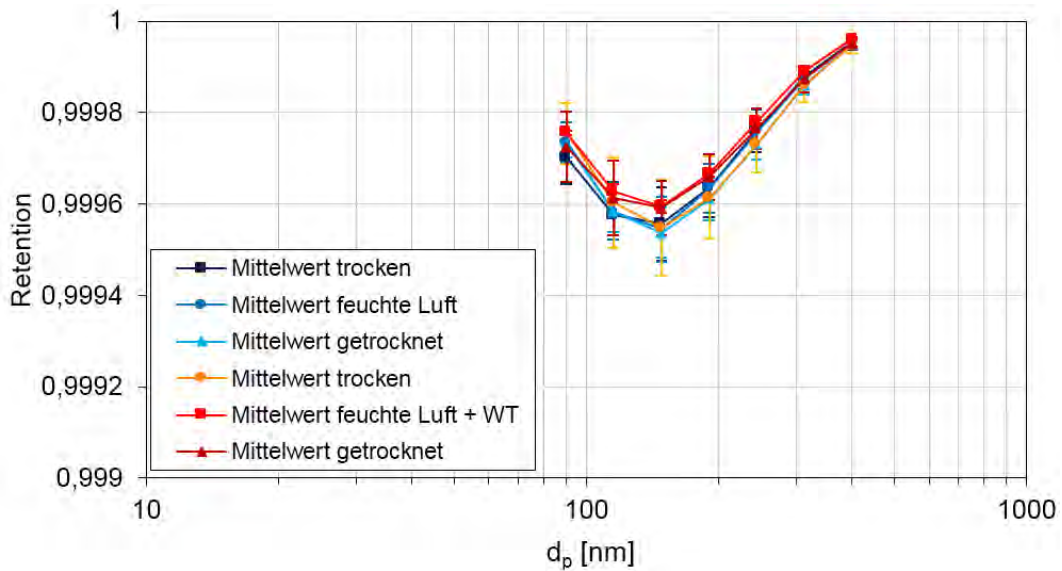


Abbildung 4.5-2: Fraktionsabscheidegrade eines funktionalisierten Glasfaser-Mediums der Filterklasse E12.

Der allgemein sehr gute Fraktionsabscheidegrades des untersuchten Glasfaser-Mediums mit wasserabweisender Funktionalisierung liegt bei Konditionierung mit Wassertröpfchen auf dem gleichen Niveau wie bei einer Beaufschlagung mit ausschließlich feuchter Luft.

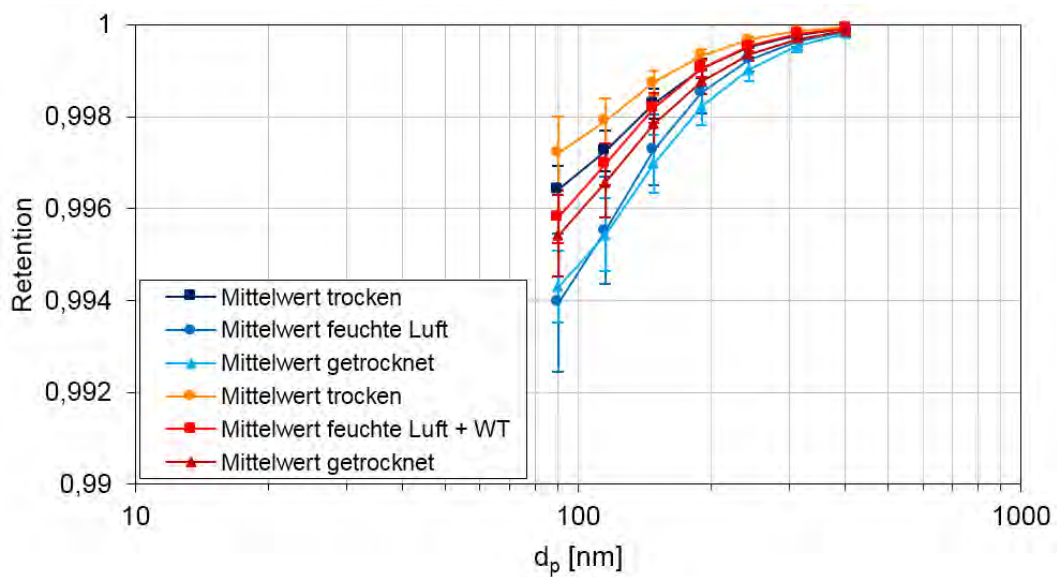


Abbildung 4.5-3: Fraktionsabscheidegrade eines Membran-Mediums der Filterklasse E12.

Das Membran-Medium hingegen zeigt wie das Glasfaser-Medium ohne Funktionalisierung (Vgl. Abbildung 4.5-1) auch eine leichte Verbesserung aufgrund von eingelagerten Wassertropfen. Tendenziell ist ebenfalls erkennbar, dass bei beiden Messreihen die Retentionen im trockenem Zustand besser sind als im feuchten oder getrockneten.

Um den Einfluss einer Konditionierung mit feuchter Luft mit oder ohne Wassertropfen-Beaufschlagung deutlicher erkennen zu können, wurde eine weitere Messreihe durchgeführt, bei der die Anströmgeschwindigkeit erhöht wurde. Wie in Kapitel 4.3.1.2.1 beschrieben wurde, bildet sich der MPPS durch eine höhere Geschwindigkeit stärker aus. Exemplarisch wurde daher eine Geschwindigkeit von 5 cm/s gewählt, um ein E12-Glasfaser-Medium im trockenen Zustand und jeweils nach Konditionierung mit feuchter Luft und zusätzlichen Wassertröpfchen zu vermessen. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 4.5-4.

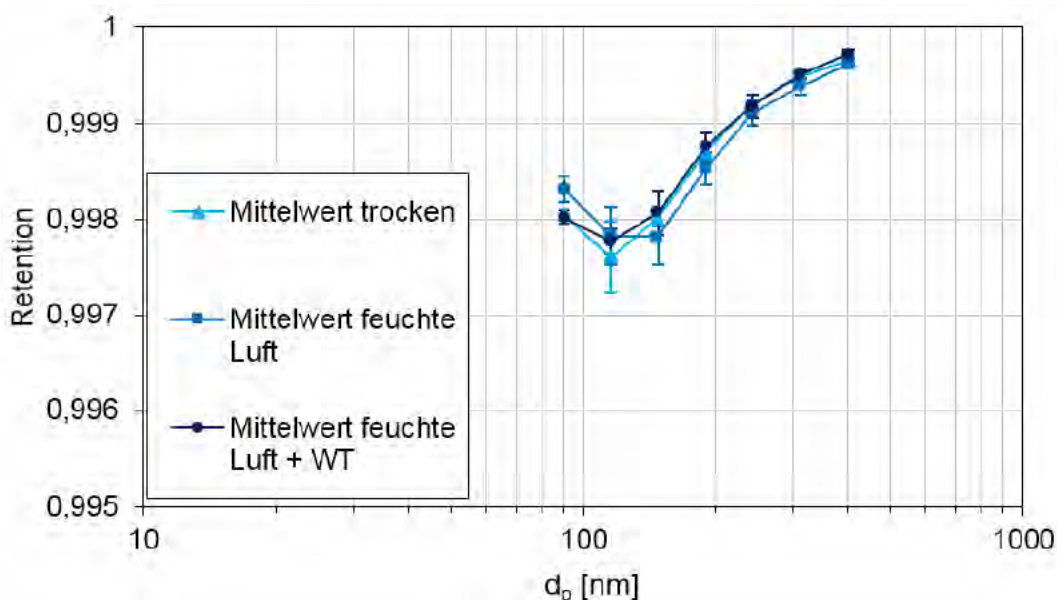


Abbildung 4.5-4: Retentionen eines E12-Glasfaser-Mediums bei 5 cm/s Anströmgeschwindigkeit.

Auch bei schnellerer Anströmgeschwindigkeit ist die Beeinflussung aufgrund von Konditionierung nur als Tendenz abzulesen. Die leichte Verbesserung der Retention aufgrund der hohen relativen Feuchte kann allerdings auch auf Abweichungen innerhalb der verschiedenen Medienproben zurück zu führen sein, da alle Messwerte innerhalb der Streuung der Standardabweichung liegen. Da eine Geschwindigkeitserhöhung keine signifikant besseren Ergebnisse erzielt und hohe relative Feuchtigkeiten bei 5 cm/s nicht so konstant eingestellt werden können, werden weitere Messungen wieder bei 2 cm/s durchgeführt.

Konfektionierte Filter

Der Einfluss von Wassertropfen auf den Druckverlust und die Abscheideeffizienz wurde exemplarisch an einem E10-Kassettenfilter untersucht. Mit einer Zweistoffdüse wurde Wasser in den Prüfkanal nach EN 779 eingedüst.

Die Beaufschlagung mit Wassertropfen führt zu einem Druckverlustanstieg von ca. 140 Pa im trockenen Zustand auf 234 Pa zu Beginn des Tropfendurchbruchs (Abbildung 4.5-5). Bei einem Druckverlust von 275 Pa wurde die Wassertropfendosierung beendet. Nach der Trocknung geht der Druckverlust wieder auf den Ausgangszustand von ca. 140 Pa zurück.

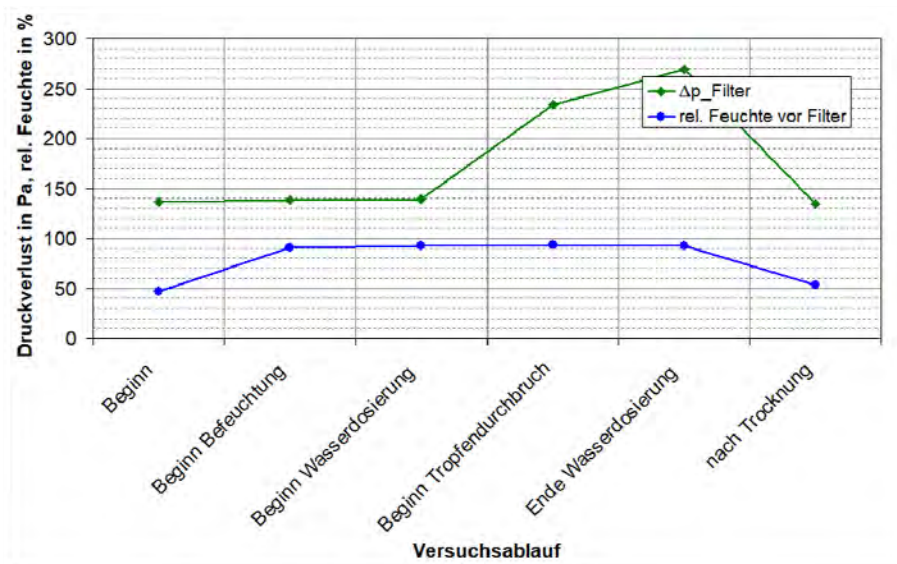


Abbildung 4.5-5: Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte bei Wassertropfenbeaufschlagung (E10-Filter)

Nach der Wassertropfenbeaufschlagung und Trocknung wurde die Effizienz bestimmt. Ein Vergleich mit den Effizienzen im Neuzustand des Filters und nach der Feuchtevariation ist in Abbildung 4.5-6 zu sehen. Die Fraktionsabscheidegradkurve nach Wassertropfenbeaufschlagung und Trocknung (grüne Kurve) liegt unterhalb der beiden anderen Kurven. Die Effizienz im MPPS hat von 96 % auf 95 % abgenommen.

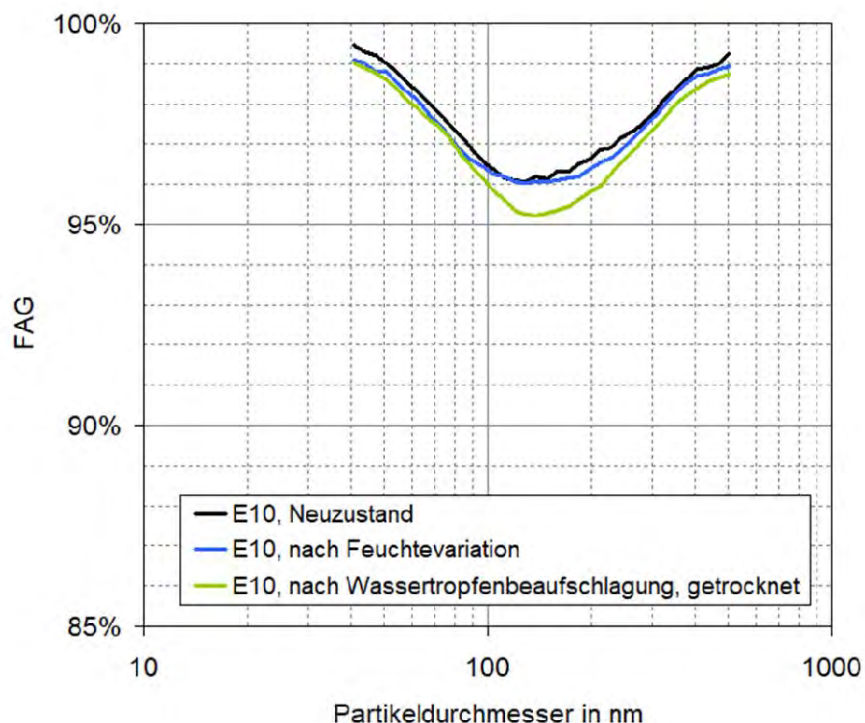


Abbildung 4.5-6: Fraktionsabscheidegrad bei Wassertropfenbeaufschlagung (E10-Filter)

4.5.2 Zusätzliche Beaufschlagung mit trockenem Salz

Filtermedien

Um die Beeinflussung einer trockenen Salzfracht zu untersuchen und die Ergebnisse vorigen Experimenten vergleichend gegenüber stellen zu können, wurden die folgenden Messreihen bei einer Anströmgeschwindigkeit von 2 cm/s durchgeführt.

Für beide Messreihen wurden je drei Filterronden zunächst im trockenen Zustand vermessen, anschließend einer einstündigen Konditionierung mit ca. 90 % relativer Feuchte ausgesetzt und die Retention aufgenommen, um nach erfolgter Trocknung erneut auf ihren Fraktionsabscheidegrad untersucht zu werden. Bei der Messreihe mit trockenem Salz (grüne Retentionskurven in Abbildung 4.5-9 - Abbildung 4.5-14) wurden die Filter zu Beginn der Messreihe mittels RBG (Vergleich Abbildung 4.3-3) mit einer trockenen Salzfracht beaufschlagt. Das NaCl wurde für diese Messreihen mittels Kugelmühle zu einem feinen Pulver vermahlen (Vergleich Abbildung 4.5-7 und Abbildung 4.5-8).

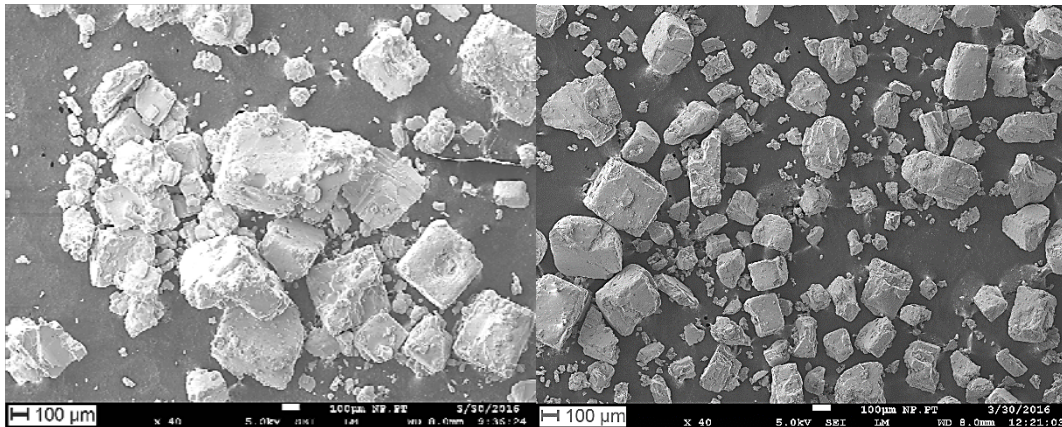


Abbildung 4.5-7: NaCl-Salz vor dem Mahlen.

Abbildung 4.5-8: NaCl-Pulver nach Behandlung in der Kugelmühle.

Bei der Beaufschlagung wurde darauf geachtet, dass der Vorschub bei allen Beladungen konstant war, wodurch sich umgerechnet über die Masse und die Stopfdichte des Kolbens eine Beaufschlagung mit knapp 10 g/m² ergab.

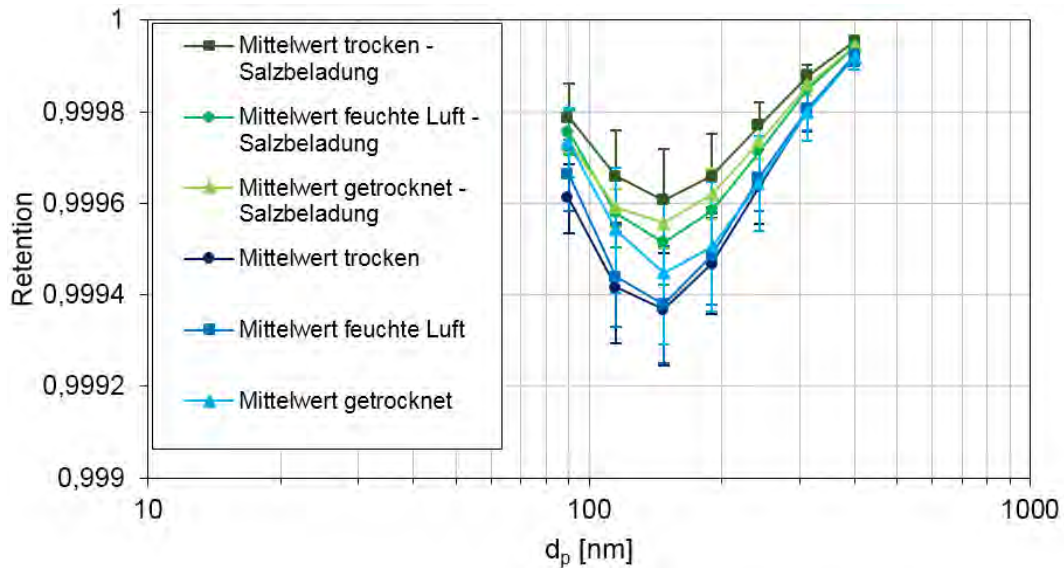


Abbildung 4.5-9: Retentionen eines E12-Glasfaser-Mediums bei Beaufschlagung mit trockenem Salz.

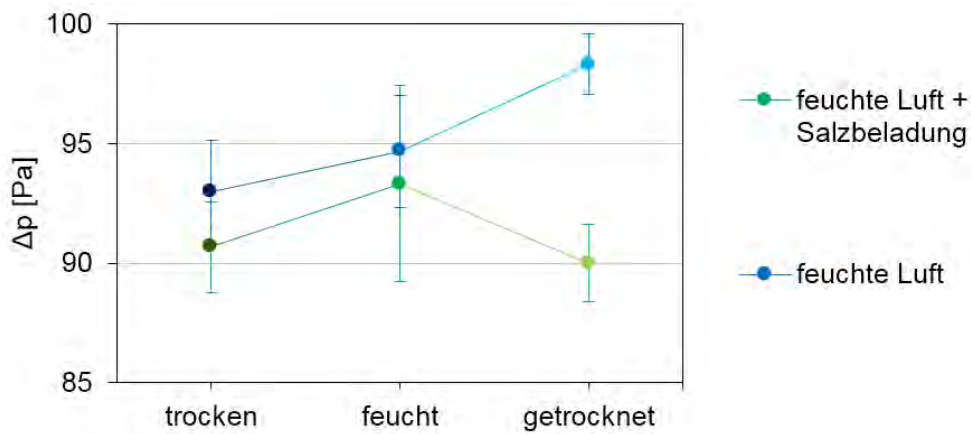


Abbildung 4.5-10: Druckverlust der Messreihen in Abbildung 4.5-9.

In Abbildung 4.5-9 und Abbildung 4.5-10 zeigt sich, dass sowohl die Retention bei Beladung mit trockenem Salz ein anderes Verhalten aufweist als ohne Salzfracht als auch der Druckverlust. Ohne vorherige Beaufschlagung verbessert sich der Fraktionsabscheidegrad im Laufe der Messreihe, so zeigt er im trocknen Anfangszustand etwas schlechtere Werte als nach Konditionierung oder im erneut getrockneten Zustand. Bei voriger Salzbeladung verschlechtert sich die Retention in feuchter Umgebung und auch im getrockneten Zustand erreicht sie nicht mehr das Anfangsniveau. In Abbildung 4.5-10 sind die Druckverlustkurven beider Messreihen zu sehen. Ohne vorherige Salzbeaufschlagung steigt der Druckverlust im Laufe der Messung stetig an, wohingegen die Medien mit Salzfracht im getrockneten Zustand einen Druckverlust aufweisen, der geringer ist als der Anfangswert.

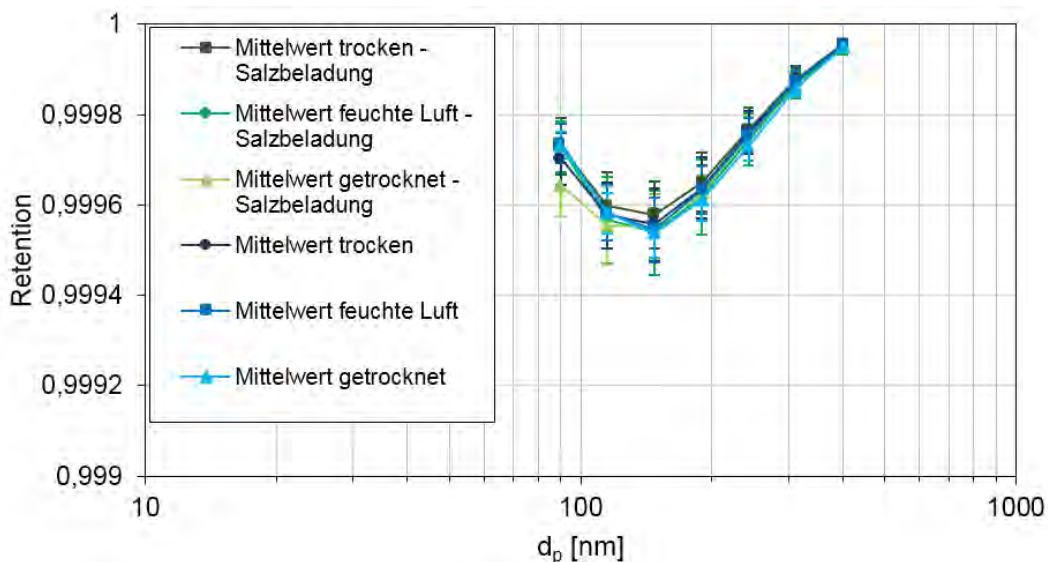


Abbildung 4.5-11: Retentionen eines funktionalisierten E12-Glasfaser-Mediums bei Beaufschlagung mit trockenem Salz.

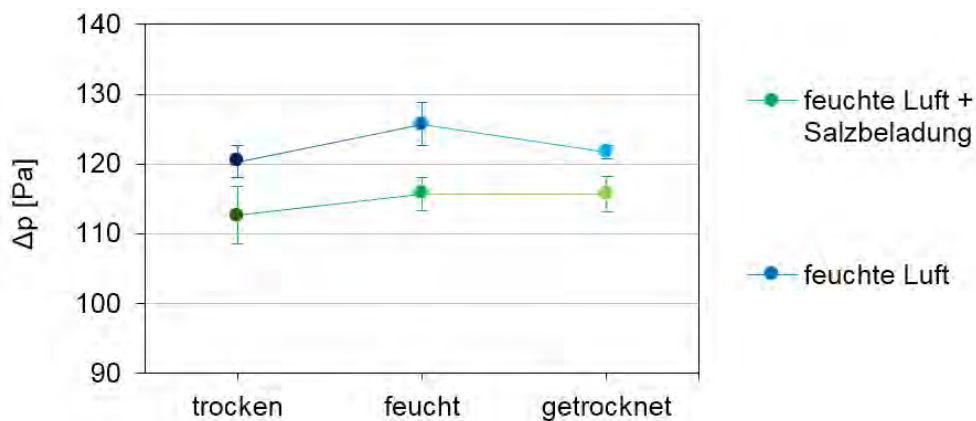


Abbildung 4.5-12: Druckverlust der Messreihen in Abbildung 4.5-11.

In Abbildung 4.5-11 und Abbildung 4.5-12 sind die Retentionen und zugehörigen Druckverluste eines funktionalisierten Glasfaser-Mediums dargestellt. Im Gegensatz zu dem Glasfaser-Medium ohne Funktionalisierung liegen alle Fraktionsabscheidegradkurven sehr nah beieinander, so dass hier keine Beeinflussung einer trockenen Salzfracht zu erkennen ist. Die Werte des Druckverlustes zeigen leichte Unterschiede, so ergeben auch hier die Messungen ohne Salzbeaufschlagung höhere Werte. Jedoch zeigt sich hier im Gegensatz zu Abbildung 4.5-10 kein konstanter Anstieg, so sinkt der Druckverlust im getrockneten Zustand wieder auf das Anfangsniveau zurück. Der Druckverlust beladener Medien weist bei feuchten Umgebungsbedingungen ebenfalls einen Anstieg auf, bleibt aber im getrockneten Zustand auf diesem Niveau.

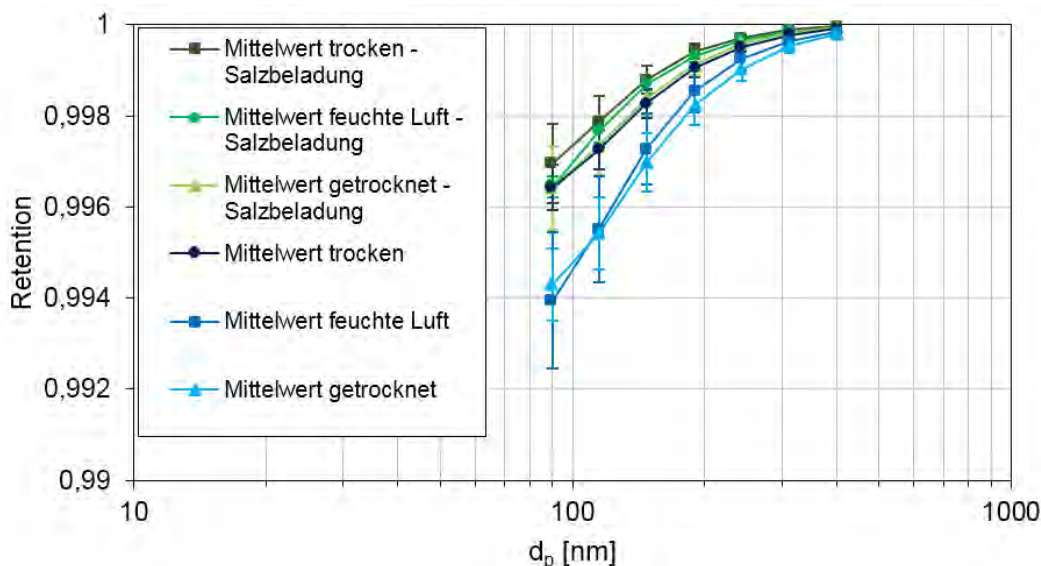


Abbildung 4.5-13: Retentionen eines E12-Membran-Mediums bei Beaufschlagung mit trockenem Salz.

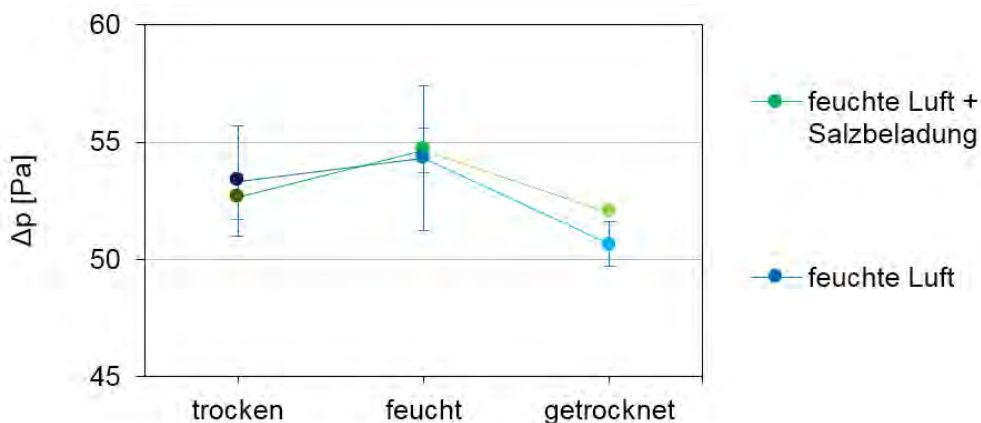


Abbildung 4.5-14: Druckverlust der Messreihen in Abbildung 4.5-13.

Die Messreihen des Membran-Mediums weisen, wie auch bei vorigen Ergebnissen, die schlechtesten Retentionswerte auf. Allerdings lässt sich hier, wie auch in Abbildung 4.5-9 und Abbildung 4.5-10, eine Abhängigkeit der Fraktionsabscheide von einer trockenen Salzbeladung erkennen. Mit NaCl-Fracht liegen die Retentionskurven auf dem Niveau eines unbeladenen Mediums im trockenen Zustand. Wird das unbeladene Medium einer Konditionierung mit Feuchte ausgesetzt und anschließend getrocknet ergeben sich in beiden Zuständen schlechtere Fraktionsabscheidegrade. Die Kurven des beladenen Mediums verschlechtern sich ebenfalls, liegen aber allgemein auf einem höheren Niveau.

Konfektionierte Filter

Ein E10-Kassettenfilter wurde im Prüfkanal nach EN 779 mit aufgemahlene NaCl-Salzpartikeln beladen und anschließend einer Wassertropfenbeaufschlagung ausgesetzt. Der Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte ist in Abbildung 4.5-15 dargestellt. Der Druckverlustanstieg durch die NaCl-Beladung betrug ca. 4 Pa bei 3.400 m³/h. Die rel. Feuchte wurde auf ca. 90 %

gesteigert und für zwei Stunden gehalten, um eine Sättigung sicherzustellen. In dieser Zeit stieg der Druckverlust um 60 Pa an. Die anschließende Wassertropfendosierung wurde bei Erreichen eines Druckverlustes von ca. 245 Pa abgebrochen. Es erfolgte danach eine Trocknung auf einen Wert von ca. 30 % rel. Feuchte.

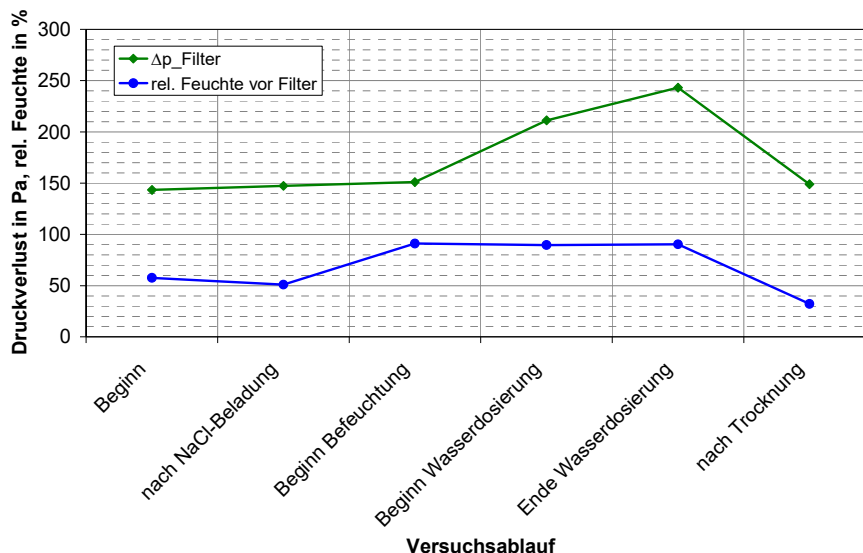


Abbildung 4.5-15: Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte bei NaCl-Beladung und Wassertropfenbeaufschlagung (E10-Filter)

Der Fraktionsabscheidegrad nach der Wassertropfenbeaufschlagung und anschließender Trocknung (grüne Kurve) liegt auf dem gleichen Niveau wie nach der NaCl-Beladung (rote Kurve) (Abbildung 4.5-16).

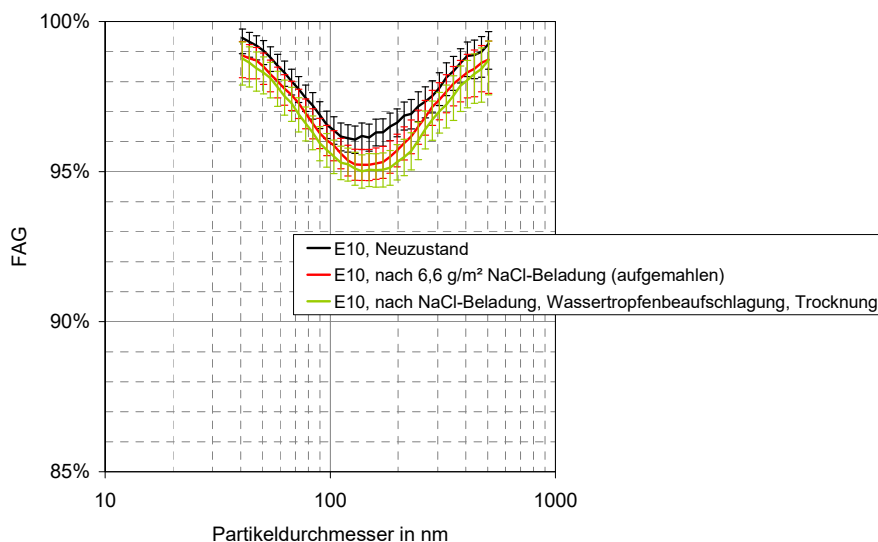


Abbildung 4.5-16: Fraktionsabscheidegrad bei NaCl-Beladung und Wassertropfenbeaufschlagung (E10-Filter)

4.6 Vergleich mit dem Prüfprozedere eines europäischen Prüfinstituts

In diesem Kapitel werden Ergebnisse denen eines Prüfinstituts vergleichend gegenüber gestellt. Der Prüfaufbau dieses Instituts besteht aus einer Mischkammer, in die von oben gefilterte Luft gemischt mit dem Testaerosol zugeführt wird. Am unteren Ende der Kammer wird der zu vermessende Volumenstrom durch einen Adapter mit der Materialprobe abgeführt und mit einem LAS X Particle Sizer vermessen. Wie die Konditionierung mit hoher relativer Feuchtigkeit realisiert wurde, wird hier nicht erläutert. Es wird lediglich erwähnt, dass die Feuchte zwischen 98,5 – 99,9 % liegt. Um einen Vergleich ziehen zu können, wurde an der FS 1 versucht die Ergebnisse nachzubilden, um so den Prüfaufbau und -ablauf zu validieren. Ebenso wie bei dem Prüfinstitut wurde daher ein Wert von knapp 3,6 cm/s für die Anströmgeschwindigkeit gewählt.

Die Messungen wurden, wie auch in Kapitel 4.5 beschrieben, mit vorheriger Konditionierung durchgeführt. Zum einen bei Beaufschlagung nur mit feuchter Luft, zum anderen mit feuchter Luft und Wassertröpfchen. Hier wurde allerdings zusätzlich noch pro Medium eine Messreihe durchgeführt, bei der die Wassertröpfchen auch während der Messung den Filter beaufschlagten. Die Ergebnisse von drei unterschiedlichen Medien sind im Folgenden dargestellt. Aus Gründen der Anschaulichkeit wurde auf die Darstellung der Fehlerbalken verzichtet. Es wurden allerdings pro Messreihe jeweils drei Filterrunden vermessen und die jeweiligen Mittelwerte gebildet.

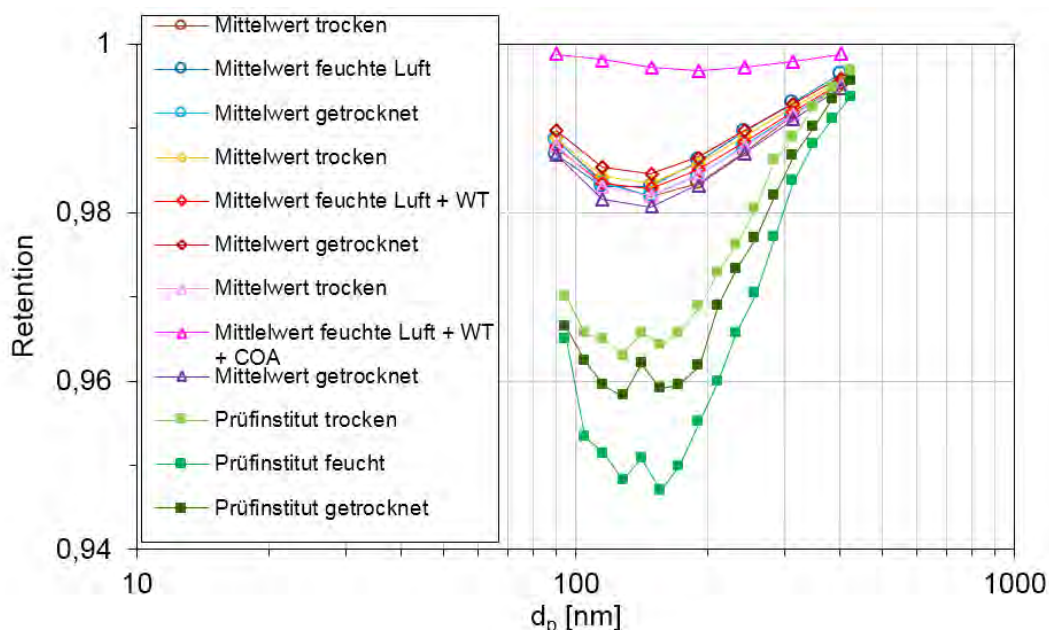


Abbildung 4.6-1: Fraktionsabscheidegrade eines Glasfaser-Mediums bei einer Anströmgeschwindigkeit von 3,6 cm/s.

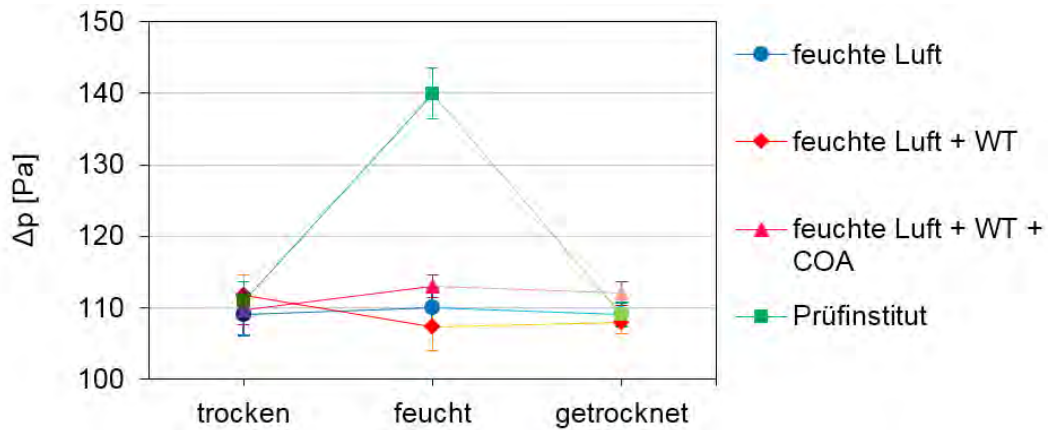


Abbildung 4.6-2: Druckverluste zu den Messreihen in Abbildung 4.6-1.

Wie in Abbildung 4.6-1 zu erkennen ist, liegen die Ergebnisse des externen Prüfinstituts auf einem deutlich schlechteren Niveau als die der FS 1. Diese liegen alle sehr eng beieinander, bis auf die Fraktionsabscheidegradkurve der Messung bei feuchter Luft und Wassertröpfchen, die das Medium auch während der Messung beaufschlagten. Diese Tatsache lässt darauf schließen, dass der rohgasseitige CPC die Tropfen zwar zählt, diese aber dann im Medium eingelagert bleiben und sich dadurch eine verbesserte Retention ergibt. Auch die Druckverluste (Vergleich Abbildung 4.6-2) liegen im feuchten Zustand auf einem gänzlich anderen Niveau als die des Prüfinstitutes, was darauf hindeutet, dass die Feuchteconditionierung dort anders vorgenommen wurde. Im trockenen und getrockneten Zustand stimmen sie jedoch gut überein.

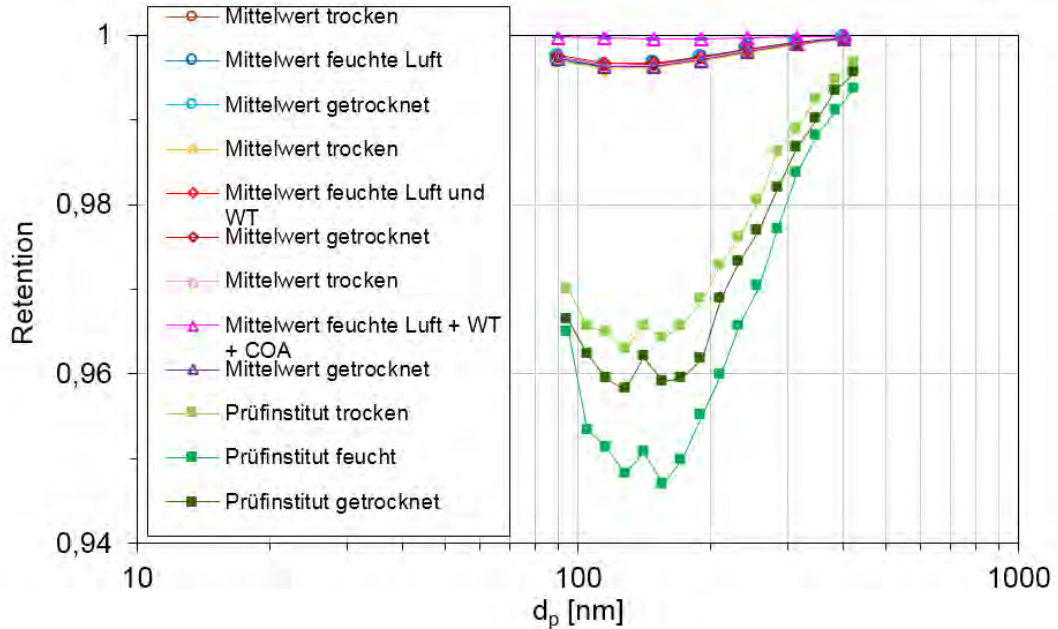


Abbildung 4.6-3: Fraktionsabscheidegrade eines Glasfaser-Mediums bei einer Anströmgeschwindigkeit von 3,6 cm/s.

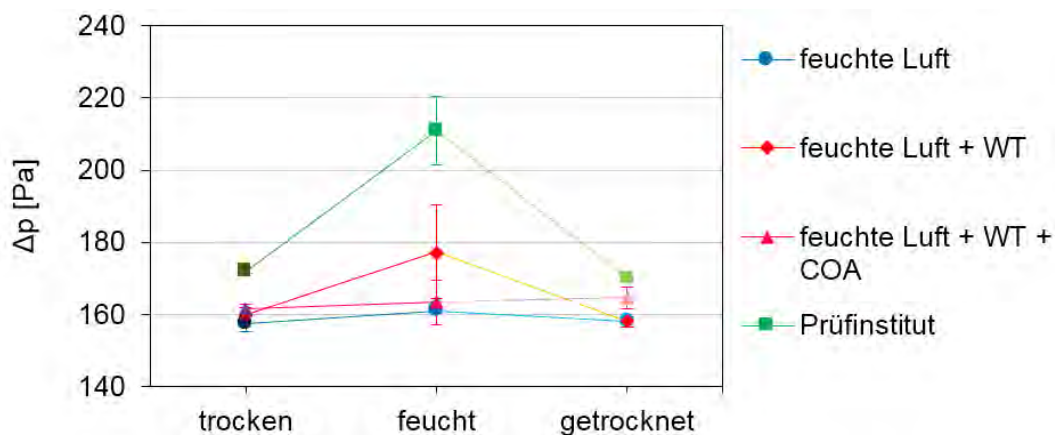


Abbildung 4.6-4: Druckverluste zu den Messreihen in Abbildung 4.6-3.

Auch bei dem zweiten getesteten Medium wird deutlich, dass weder die Fraktionsabscheidegrade noch die Druckverluste die Ergebnisse des Prüfinstituts nachbilden können. Bei diesem Medium liegen alle Retentionskurven sehr eng beieinander bis auf die Kurve der Messreihe, bei der die Wassertröpfchen-Beaufschlagung auch während der Messung fortgesetzt wurde. Diese erzielt, wie bei dem ersten Medium (Vergleich Abbildung 4.6-1) auch, eine deutlich bessere Abscheideleistung. Die Verläufe des Druckverlustes, in Abbildung 4.6-4 dargestellt, liegen bei diesem Medium sogar auch in den trockenen Zuständen deutlich unter den Ergebnissen des Prüfinstitutes.

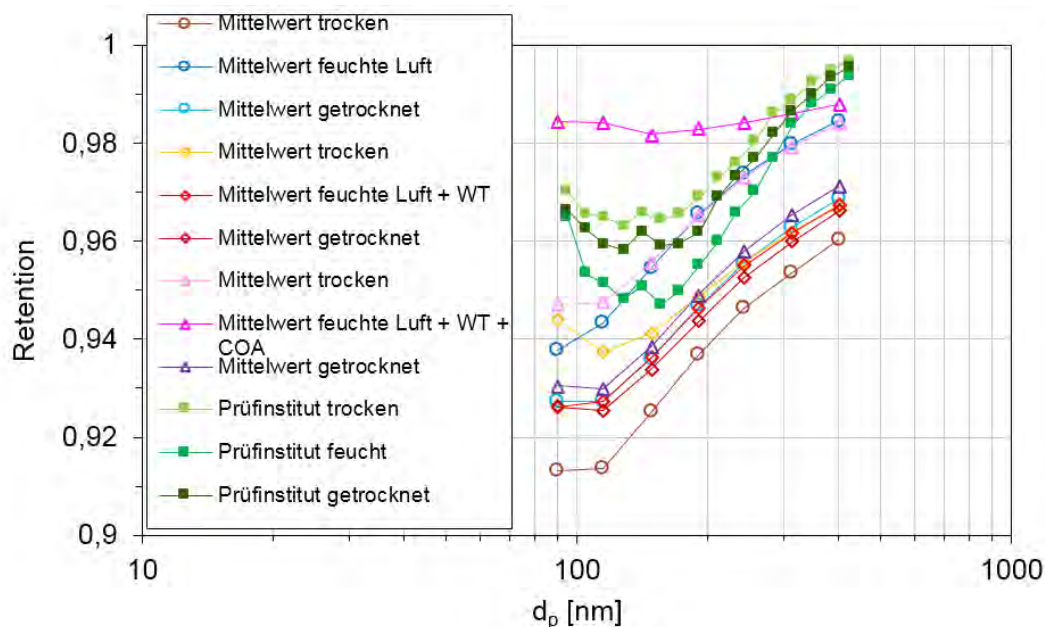


Abbildung 4.6-5: Fraktionsabscheidegrade eines Membran-Mediums bei einer Anströmgeschwindigkeit von 3,6 cm/s.

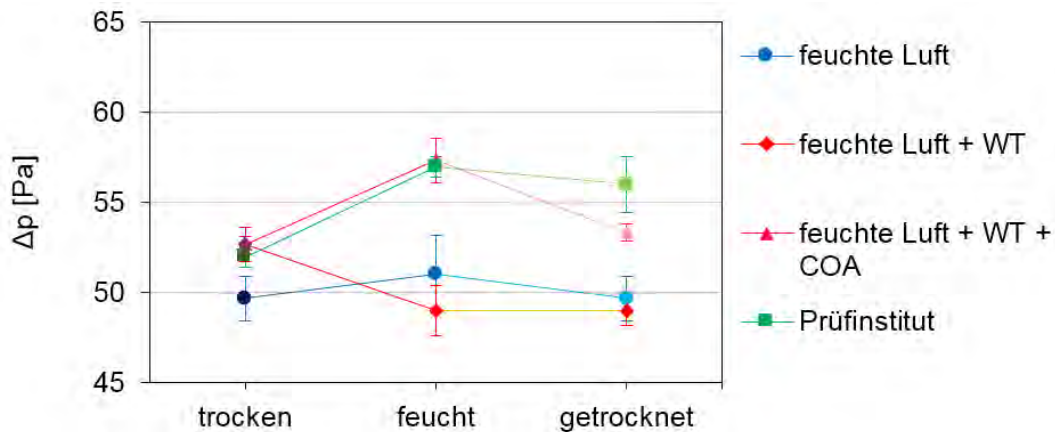


Abbildung 4.6-6: Druckverluste zu den Messreihen in Abbildung 4.6-5.

Abbildung 4.6-5 und Abbildung 4.6-6 zeigen die Ergebnisse des dritten Mediums, bei dem die Ergebnisse vergleichend gegenübergestellt sind. Diese Messreihen liegen deutlich näher beieinander als bei den vorigen beiden Vergleichsmedien (Abbildung 4.6-1 bis Abbildung 4.6-4). Allerdings ist auch hier zu erkennen, dass die Messreihe mit angeschalteten Wassertröpfchen (Messreihe „feuchte Luft + WT + COA“) während der Messung eine unrealistisch hohe Abscheideeffizienz ergibt, aufgrund von rohgasseitig mitgezählten Wassertröpfchen. Die Druckverluste dieses Mediums, die an der FS 1 gemessen wurden, liegen auch nicht so weit von den Ergebnissen des Prüfinstitutes entfernt, wie bei den anderen Medien (Vergleich Abbildung 4.6-6). Obwohl die Abscheideeffizienz der Messreihe mit angeschaltetem Atomizer eine zu hohe Effizienz ergibt, bildet der Druckverlust dieser Messreihe die Ergebnisse des Prüfinstitutes gut ab.

Als Einzelversuch wurde anschließend das erste Medium, dessen Ergebnisse in Abbildung 4.6-1 und Abbildung 4.6-2 dargestellt sind, einem Wasserbad ausgesetzt, bevor es mit feuchter Luft vermessen wurde. Wurde das Medium direkt im Anschluss an das Wasserbad eingebaut, ergab sich ein Druckverlust, der außerhalb des Messbereichs der verwendeten Druckmessdose lag. Eine 30-minütige Trocknung, so dass das Medium noch nass war, aber keinen so hohen Druckverlust mehr aufwies, ergab die folgenden Ergebnisse.

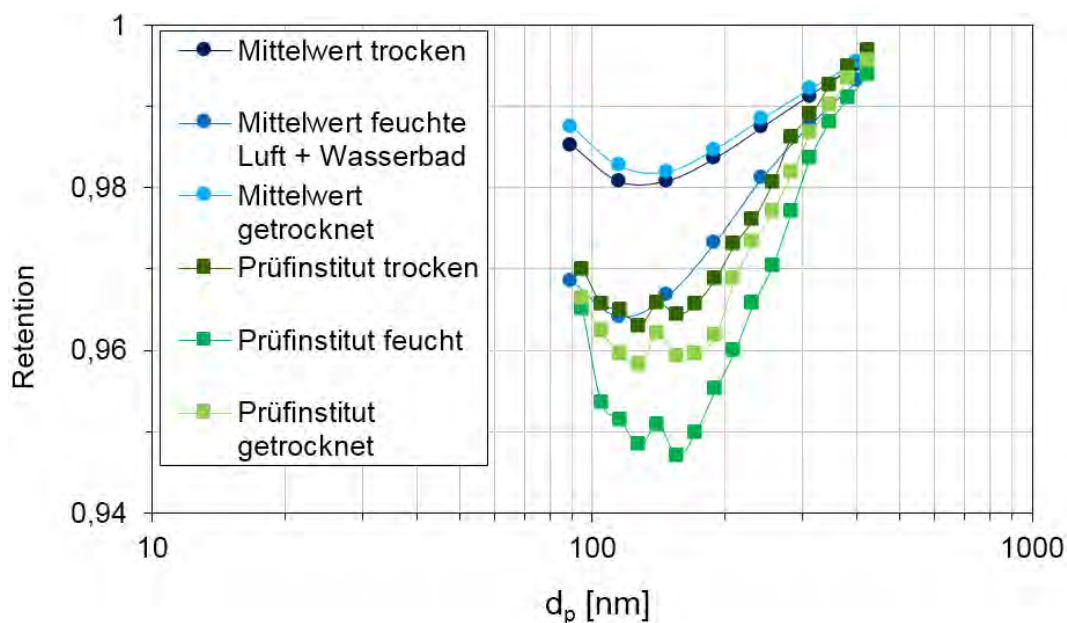


Abbildung 4.6-7: Vergleich des Fraktionsabscheidegrades nach Behandlung im Wasserbad.

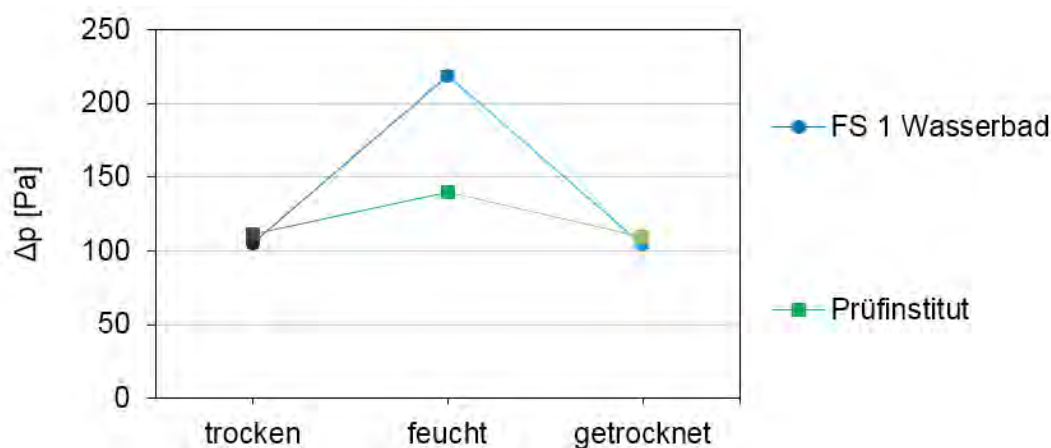


Abbildung 4.6-8: Druckverluste zu den Messreihen in Abbildung 4.6-7.

Zu erkennen ist, dass sich nach einer Behandlung der Filterrunden im Wasserbad eine deutlich schlechtere Retention ergibt als bei den vorigen Messreihen (Vergleich Abbildung 4.6-1). Im feuchten Zustand ergibt sich so die schlechteste Retention der drei Messungen pro Messreihe. Diese liegt auch auf einem ähnlichen Niveau wie die des externen Prüfinstitutes.

Zusammenfassend lässt sich für Abbildung 4.6-1 bis Abbildung 4.6-8 feststellen, dass zwar einzelne Ergebnisse der FS 1 die des zertifizierten Prüfinstitutes nachbilden können, die Gesamtheit der Abweichungen spricht allerdings für eine andere Feuchteconditionierung, da Medien und Anströmgeschwindigkeit übereinstimmen. Auch wenn eventuell Materialunterschiede vorliegen, wodurch das generell bessere Niveau der Abscheideeffizienzen erklärt werden könnte, blieben die deutlichen Unterschiede im Druckverlust im feuchten Zustand. Bei den Ergebnissen des zertifizierten Prüfinstitutes bleiben also Fragen nach der Feuchteconditionierung und auch der Feuchtigkeitsmessung. Da in den Berichten ein Bereich von 98,5 – 99,9 % für die Messung im feuchten Zustand angegeben wird, sind auch eventuelle

Kondensationseffekten in der Mischkammer zu berücksichtigen, da die Testfilterrunde am Boden eingebaut ist. Auch die Art und Dauer der Konditionierung ist entscheidend, da durch ein Abreißen von Tröpfchen aus dem Medium Zählereignisse auf Reingasseite detektiert werden könnten, die auf der Rohgasseite nicht vorhanden sind. Durch den Einzeltest mit Konditionierung im Wasserbad wurde sich den Ergebnissen des Prüfinstitutes angenähert.

4.7 REM-Bilder und EDX-Analyse

Nach den Versuchsreihen mit zwei cm/s Anströmgeschwindigkeit wurden jeweils REM-Aufnahmen ausgewertet: vor und nach Feuchtevariation und nach Tropfenschlag und anschließender Trocknung.

4.7.1 Neue, unbeladene Filtermedien

Die folgenden Aufnahmen zeigen die drei untersuchten Filtermedien im Neuzustand.

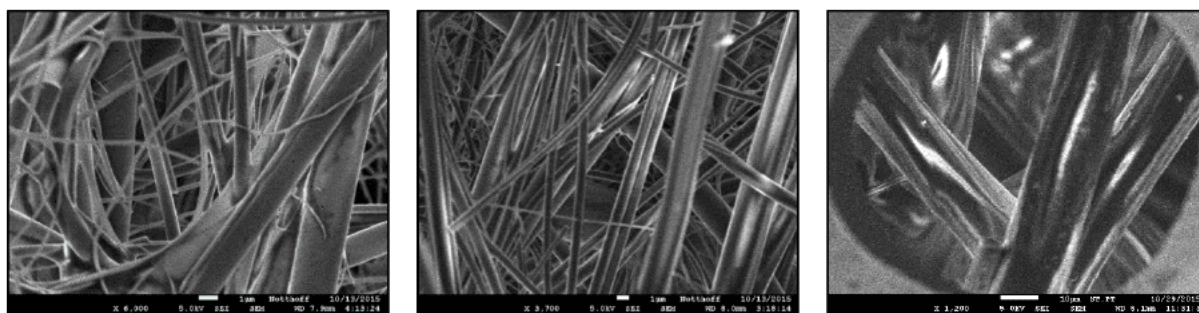


Abbildung 4.7-1: Medien im Neuzustand: links Glasfaser, Mitte funktionalisierte Glasfaser, rechts Membran.

Wie in Abbildung 4.7-1 zu erkennen ist, unterscheiden sich die beiden Glasfasermedien im neuen, unbeladenen Zustand äußerlich kaum voneinander. Beide Medien weisen einen mittleren Faserdurchmesser von ca. ein μm auf. Das Membranmedium hingegen hat deutlich dickere Fasern von etwa 10-15 μm .

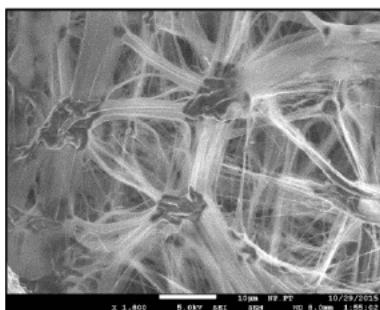


Abbildung 4.7-2: Aufnahme der Membranschicht im unbeladenen Zustand.

In Abbildung 4.7-1 sind rechts REM-Aufnahmen des Membranmediums zu sehen. Da dieses Medium aus zwei Stützwliesen und einer in der Mitte angeordneten Membranschicht besteht, wurde das Medium so präpariert, dass auch Aufnahmen der Membranschicht möglich waren,

siehe Abbildung 4.7-2. Dabei wird deutlich, dass die Membranschicht aus vielen feinen Fäden bzw. deren größeren Fadensträngen besteht, die durch Knotenpunkte miteinander verbunden sind.

4.7.2 Beladene Filtermedien

Die folgenden Abbildungen zeigen beladene Filtermedien vor und nach Feuchtevariation und nach Tropfenschlag mit anschließender Trocknung:

- **NaCl-beladen**

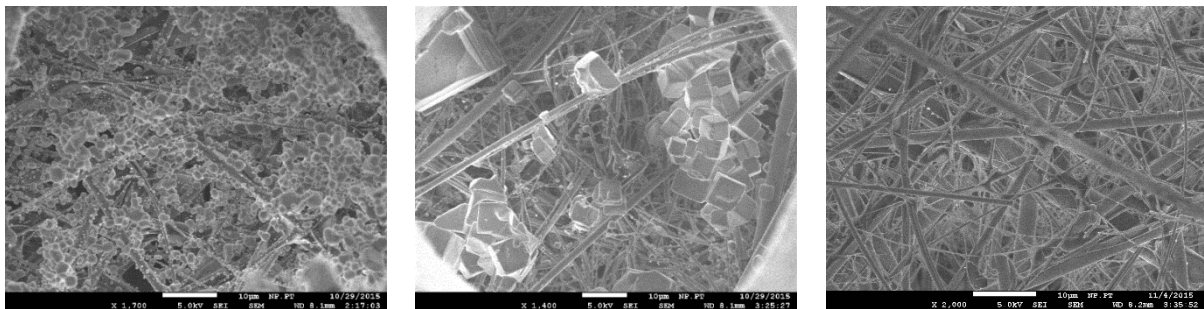


Abbildung 4.7-3: NaCl-beladenes Glasfasermedium: links vor Feuchtevariation, Mitte danach, links nach Tropfenbeaufschlagung.

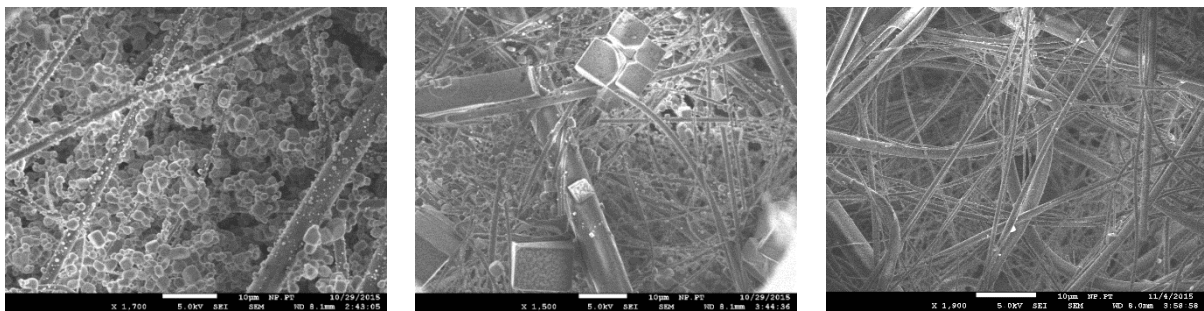


Abbildung 4.7-4: funktionalisiertes Glasfaser-Medium nach NaCl-Beladung: links vor Feuchtevariation, Mitte danach, links nach Tropfenbeaufschlagung.

Wie sich im unbeladenen Zustand zeigt, unterscheiden sich die beiden Glasfasermedien optisch nicht bedeutsam voneinander. Diese Erkenntnis wird durch die REM-Aufnahmen der NaCl-beladenen Medien bestätigt. Wie in Abbildung 4.7-3 und Abbildung 4.7-4 zu sehen ist, zeigt sich bei Beladung mit NaCl bei beiden Glasfasermedien eine gleichmäßige Verteilung der NaCl-Partikel, die sich an die einzelnen Fasern anlagern. Nach einer Feuchtevariation sind deutlich weniger und größere Salzpartikel zu sehen, deren Formen scharfkantiger sind als vorher. Nach einer Beaufschlagung mit Wassertröpfchen im Anschluss an eine NaCl-Beladung sind beide Glasfasermedien nahezu sauber gewaschen. Es lassen sich kaum noch Salzpartikel erkennen.

Diese optische Ähnlichkeit der Glasfasermedien steht im Kontrast zu den Retentionen, die sich für unterschiedlichen Beladungszustände ergeben (Vgl. Kapitel 4.3.1.2.1). Diese stimmen bei den Glasfasermedien nicht überein, obwohl sich das anhand der REM-Bilder vermuten lassen würde. Bei dem funktionalisierten Medium ist der Fraktionsabscheidegrad nach NaCl-Beladung

deutlich schlechter als im unbeladenen Zustand, andersherum ist es bei dem standardmäßigen Medium. Bei diesem sind auch die Retentionen durch an die Beladung anschließende Konditionierung oder Tropfenbeaufschlagung schlechter als im unbeladenen Zustand, bei dem funktionalisierten hingegen ergeben sich für beide Zustände bessere Fraktionsabscheidegrade.

Anders verhält es sich bei dem Membranmedium, wie anhand der folgenden Aufnahmen zu sehen ist.

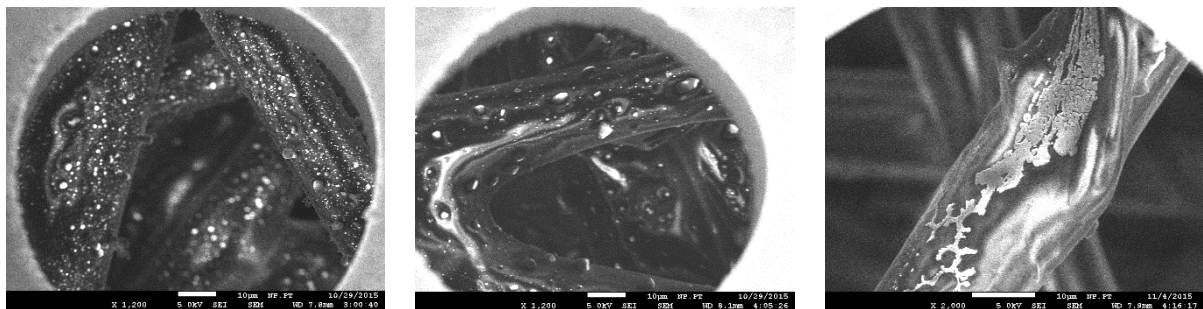


Abbildung 4.7-5: Membran-Medium mit NaCl-Beladung: links vor Feuchtevariation, Mitte danach, links nach Tropfenbeaufschlagung.

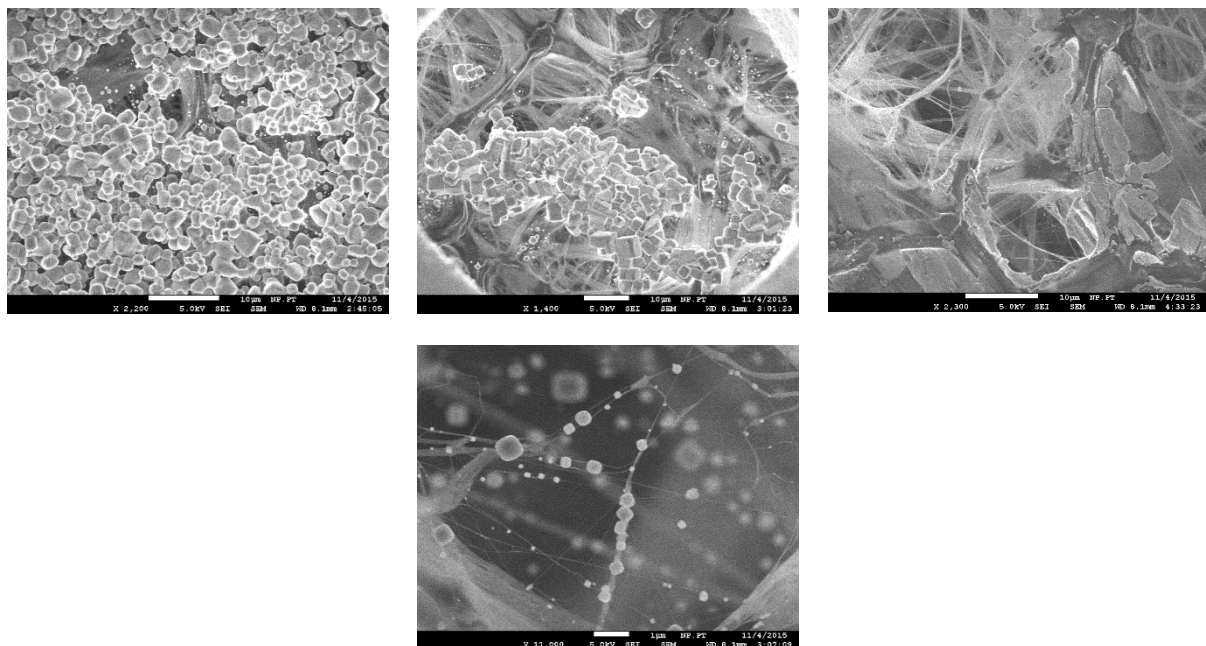


Abbildung 4.7-6: herauspräparierte Membranschicht nach NaCl-Beladung: links vor Feuchtevariation, Mitte danach, links nach Tropfenbeaufschlagung.

Das Stützvlies wird von einer NaCl-Beladung kaum beeinflusst. Es sind nur einige kleine Salzpartikel erkennbar, die an den Fasern anhaften. Das ändert sich auch nicht nach einer Feuchtevariation. Lediglich nach Tropfenschlag und anschließender Trocknung lässt sich ein Unterschied erkennen. Im Gegensatz zu den einzelnen kleinen Salzpartikeln, die vorher zu sehen waren, sind jetzt zusammenhängende Strukturen auf den Fasern sichtbar, siehe Abbildung 4.7-5. Die Membranschicht ist im beladenen Zustand kaum mehr erkennbar. Da sie als Oberflächenfilter funktioniert, ist nur die Salzfracht sichtbar, die die Fasern überlagert. Die Retention ist deutlich schlechter als im unbeladenen Zustand, genauso wie bei dem

funktionalisierten Glasfasermedium. Nach einer Feuchtevariation sind weniger Salzpartikel zu sehen, die aneinander anlagern. Im Gegensatz zu den Glasfasermedien bilden diese aber keine neuen größeren Partikel. In einer anderen Vergrößerung sieht man feinen Fäden der Membranschicht in denen kleine Salzpartikel festhängen. Der Fraktionsabscheidegrad ist zwar etwas besser als ohne Feuchtevariation, allerdings nicht so gut wie der Ausgangswert. Die Veränderung nach Tropfenschlag ist bei der Membranschicht am bemerkenswertesten. Im Gegensatz zu den Glasfasern ist die Salzfracht nicht von der Membranschicht abgewaschen, sondern bildet flächige Schichten, die sich an die Faserstränge haften bzw. auf den Fasersträngen hängen. Die Stränge in Abbildung 4.7-6, die tiefer liegen, bleiben davon jedoch weitgehend unberührt. Die Retention ist für größere Partikel (ab ca. 100 nm) etwas besser als im unbeladenen Zustand, ansonsten hat sie einen ähnlichen Verlauf.

MgCl₂-beladen

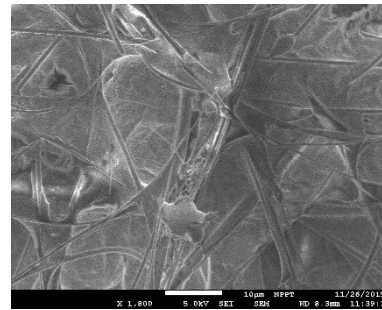
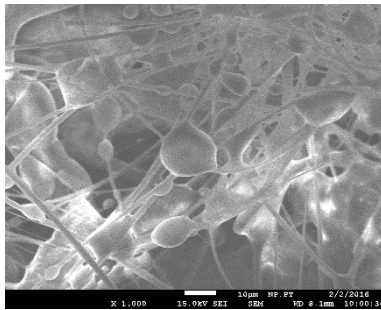


Abbildung 4.7-7: Glasfaser-Medium mit MgCl₂-Beladung: links vor und rechts nach Feuchtevariation.

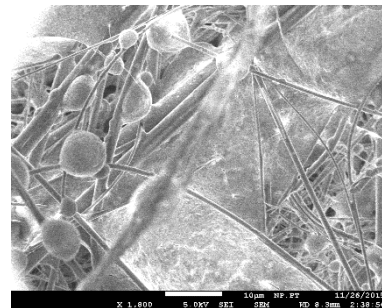
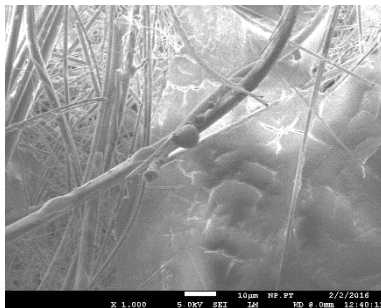


Abbildung 4.7-8: funktionalisiertes Glasfaser-Medium mit MgCl₂-Beladung: links vor und rechts nach Feuchtevariation.

Bei einer Beladung mit MgCl₂ sind sowohl bei dem Glasfasermedium als auch bei dem funktionalisierten Glasfasermedium tropfenähnliche Anlagerungen an die Fasern zu erkennen, werden diese Medien anschließend einer Feuchtevariation ausgesetzt, verschmelzen diese Anlagerungen zu Schichten. Dies erklärt auch den in Kapitel 4.3.1.7 gezeigten Druckverlustanstieg bei einer Beladung mit MgCl₂ und Feuchtevariation. Wie rechts in Abbildung 4.7-7 zu erkennen ist, wird diese Schicht allerdings an einigen Stellen durchbrochen. Das könnte zu dem etwas verschlechterten Fraktionsabscheidegrad führen, da die Partikel in diesen Kanälen eine kürzere Verweilzeit haben und somit zeitabhängige Abscheidemechanismen im kleineren Partikelgrößenbereich verstärkt werden.

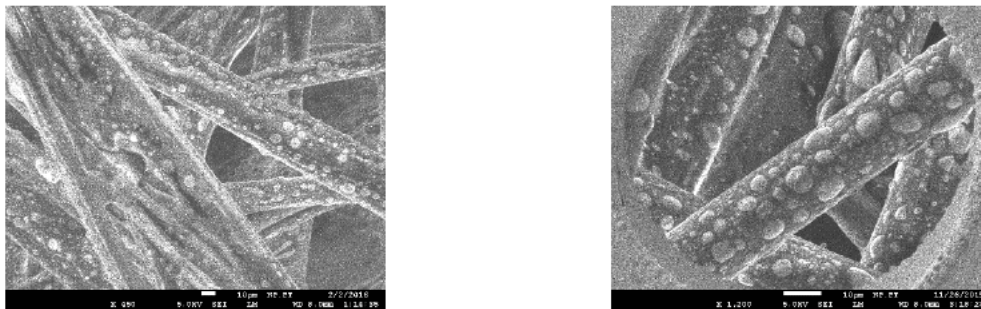


Abbildung 4.7-9: Membran-Medium mit $MgCl_2$ -Beladung: links vor und rechts nach Feuchtevariation.

Bei dem Membranmedium hingegen sieht es aus als wären die $MgCl_2$ -Partikel zum Teil in die Fasern eingedrungen, auch eine Variation der Feuchte ändert dieses Bild nicht.

4.7.3 Filtermedien nach Isopropanol-Behandlung

Um das Verhalten des Membranmediums nach einer Behandlung mit Isopropanol zu erklären (Vgl. Abbildung 4.3-32), wurden von diesen Filterproben ebenfalls REM-Aufnahmen gemacht.

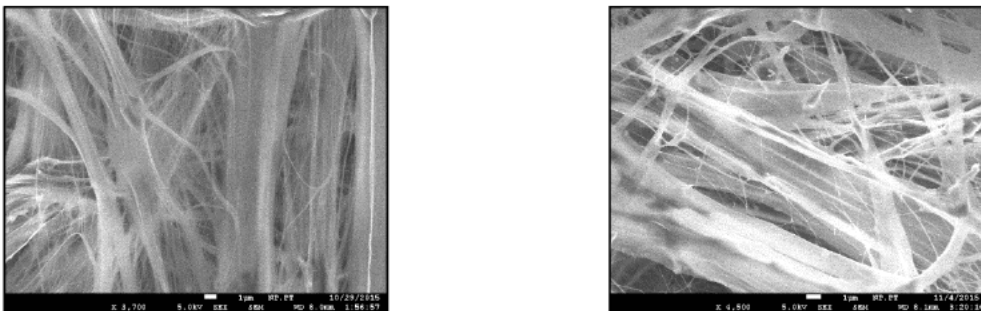


Abbildung 4.7-10: Membranschicht vor (links) und nach Isopropanol-Behandlung (rechts).

An diesen Aufnahmen wird deutlich, dass sich die feinen Fäden der Membranschicht durch eine Behandlung mit Isopropanol aneinander lagern. Dadurch ist auch die deutliche Verschlechterung der Retention erklärbar (Vgl. Kapitel Behandlung mit Isopropanol 4.3.1.3 Behandlung mit Isopropanol).

4.7.4 Filter aus dem Realbetrieb

Für EDX-Analysen (energiedispersive Röntgenanalysen) wurden ein mit Außenluft beladener F8-Kassettenfilter vom Anlagenstandort 2 (Mitteleuropa, Binnenland) und ein E10-Filter vom Standort 3 (Westeuropa, küstennah) untersucht.

Abbildung 4.7-11 zeigt REM-Aufnahmen eines mit Außenluft beladenen E10-Kassettenfilters von einem küstennahen Standort in Westeuropa. Man erkennt, dass die einzelnen Fasern trotz einer Einsatzdauer von ca. 8.000 Betriebsstunden nur sehr gering mit Partikeln belegt sind.

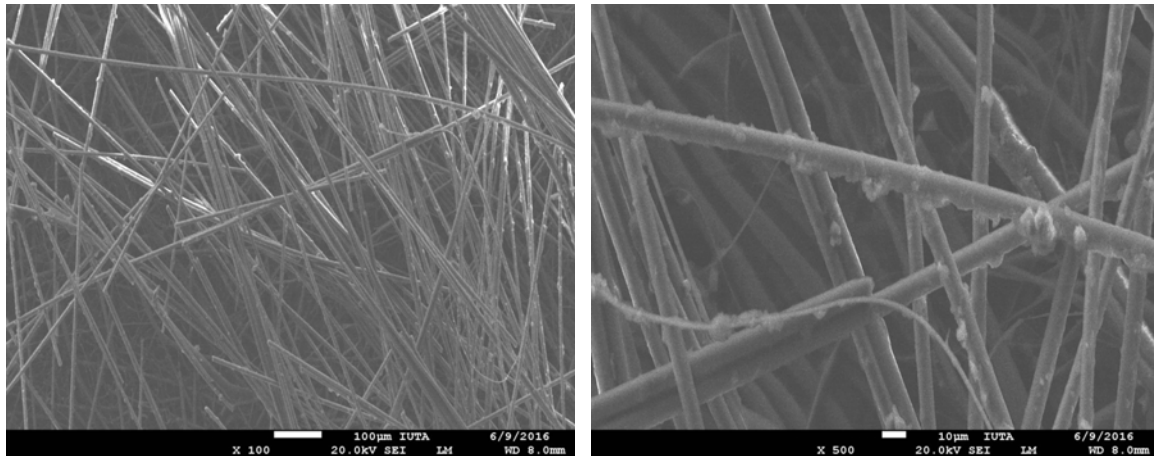


Abbildung 4.7-11: REM-Aufnahmen eines mit Außenluft beladenen E10-Kassettenfilter (küstennaher Standort, Westeuropa)

Für EDX-Analysen wurden aus dem F8-Filter drei Proben entnommen. Die Ergebnisse der einzelnen Proben sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst. Tabelle 4.4 zeigt die Ergebnisse von vier Proben aus dem E10-Filter vom Standort 3.

Die Belegung der Filter war so gering, dass die EDX-Spektren immer auch eine Fasermatrix aufwiesen bzw. Spektren von Einzelpartikeln und Agglomeraten gemacht wurden. Dies erklärt zum einen den hohen Anteil an Kohlenstoff in den Analysen und zum anderen die großen Unterschiede zwischen den einzelnen Proben eines Filters.

Tabelle 4.3: EDX-Analyseergebnisse F8-Filter (Standort 2)

Element	Probe 1	Probe 2	Probe 3
	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%
C	51,33	50,32	51,08
O	35	34,04	33,97
Na	0,55	1	0,74
Mg	0,1	0,19	0,21
Al	2,24	2,42	2,56
Si	4,57	4,41	4,68
S	2,03	2,22	2,1
Cl	0,2	0,26	0,23
K	0,61	0,82	0,75
Ca	0,78	0,97	0,82
Ti		0,92	
P	0,09		0,11

Tabelle 4.4: EDX-Analyseergebnisse E10-Filter (Standort 3)

Element	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4
	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%
C	65,69	45,48	61,23	56,4
O	25,57	38,07	32,78	34,85
Na	2,41	0,46	1,45	2,25
Mg	0,3			0,33
Al	0,65	0,55	0,44	0,64
Si	2,61	4,04	0,99	0,72
S	1,04	5,46	2,2	1,44
Cl	0,23	0,26		1,76
K	0,65	2,05	0,6	0,7
Ca	0,46	1,02	0,3	
Ti		0,46		
P		0,01		
Fe	0,38			0,5
Zn				0,42

Die EDX-Analyse kann nur einen ersten Anhaltspunkt über die chemische Zusammensetzung der abgeschiedenen Partikel geben. Aufgrund der geringen Beladung der einzelnen Fasern mit Partikeln sind EDX-Analysen an den Filtern aus dem Realbetrieb nach einem Tropfenschlag ungeeignet, um den Einfluss der Wassertropfen eindeutig darzustellen. Daher wurde auf diese Untersuchungen verzichtet.

4.8 Modellierung des Druckverlustes und des Fraktionsabscheidegrades an Filtermedien in Abhängigkeit von Beladungszustand und Luftfeuchte

Zur Beschreibung des Druckverlustanstiegs und des Abscheideverhaltens von Filtermedien mit zunehmender Beladung wurde das einzelfaserbasierte Filtrationsmodell genutzt. Dieses Modell wurde im IGF-Vorhaben 17659 N „Experimentelle Untersuchung der Effizienz von RLT-Filtern als Grundlage für praxisorientierte Prüfmethode sowie für die Weiterentwicklung der Filter durch Modellierung des Filtrationsverhaltens“ um eine Ortsdiskretisierung in Vliesdickenrichtung und eine Diskretisierung in Beladungsstufen (Abbildung 4.8-1) erweitert.

Das Abscheideverhalten kann mit zwei unterschiedlichen Ansätzen beschrieben werden. Die abgeschiedenen Partikel können entweder bevorzugt an bereits abgeschiedenen Partikeln haften bleiben und als eine „neue“ Faserfraktion betrachtet werden (Dendritenmodell) oder die abgeschiedenen Partikel lassen den Radius der Fasern anwachsen (Faserwachstumsmodell). Die bestimmenden Größen für die Gestalt der abgeschiedenen Partikel sind u. a. das Verhältnis von Partikel- zu Faserdurchmesser, die Stokes- und die Pecletzahl.

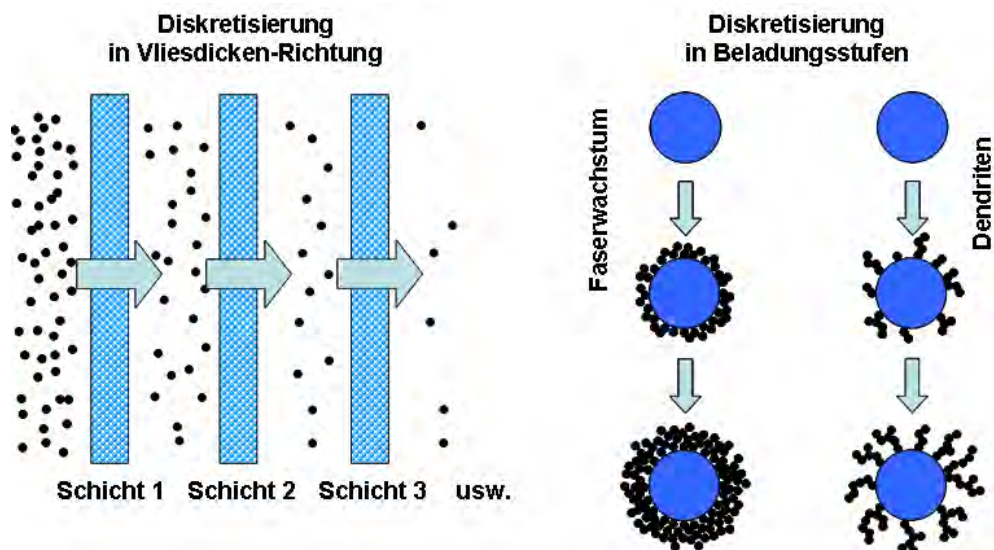


Abbildung 4.8-1: Vorgehensweise zur Beladungsmodellierung

Die grundlegenden Formeln zur Beschreibung des Filtrationsmodells wurden schon im IGF-Vorhaben 17659 N dargestellt. Dieses Modell wurde im Rahmen des Projektes weiterentwickelt. Es wird auf das gleiche Formelwerk zurückgegriffen, welches nachfolgend erneut dargestellt ist. Bei der Nutzung des einzelfaserbasierten Filtrationsmodells wurde neben der Interzeption und der Abscheidung aufgrund von Diffusion auch die Abscheidung aufgrund elektrophoretischer Transportmechanismen berücksichtigt. Die verwendeten Gleichungen wurden den Standardwerken von Hinds [19] und Brown [28] entnommen.

Für den Einzelfaserabscheidegrad durch Interzeption wurde wahlweise einer der beiden folgenden Ansätze verwendet:

$$\eta_R = \frac{(1+R)^{-1} - (1+R) + 2(1+1,996 Kn_f)(1+R)\ln(1+R)}{2 \left[-0,75 - \frac{1}{2} \ln(\alpha) \right] + 1,996 Kn_f [-0,5 - \ln(\alpha)]} \quad \eta_R = \frac{(1-\alpha) R^2}{Ku(1+R)}$$

Für Randbedingungen, bei denen der Schlupf an der Faseroberfläche berücksichtigt werden muss, wurde die Formel angewendet, die auf die Faserknudsenzahl zugreift. Diese berechnet sich aus dem Verhältnis der mittleren freien Weglänge λ zum Faserradius:

$$Kn_f = \frac{2\lambda}{d_f}$$

In den Formeln zur Berechnung des Einzelfaserabscheidegrades durch Interzeption ist α die Packungsdichte des Filtervlieses.

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

$$R = \frac{d_p}{d_f}$$

Die hydrodynamische Konstante nach Kuwabara Ku lautet:

$$Ku = 1/2 \ln(\alpha) - 3/4 + \alpha - 1/4 \alpha^2$$

Für den Einzelfaserabscheidegrad aufgrund von Diffusion wurde folgender Ansatz gewählt:

$$\eta_D = 2 Pe^{-\frac{2}{3}}$$

Mit der Peclet-Zahl Pe :

$$Pe = \frac{d_f U}{D}$$

Hierbei ist U die mittlere Anströmgeschwindigkeit des Filtervlieses und D der Diffusionskoeffizient der Partikel.

$$D = \frac{k_B T C_C}{3 \pi \mu d_p}$$

Hierbei sind k_B die Boltzmannkonstante, T die Temperatur, C_C der Cunningham-Korrekturfaktor und μ die kinematische Viskosität.

Der Cunningham-Korrekturfaktor berechnet sich zu:

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

Für den Einzelfaserabscheidegrad aufgrund von Polarisation von Partikeln bei elektrostatisch geladenen Fasern (Annahme unipolare Faserladung) wurde folgender Ansatz gewählt:

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

mit der dimensionslosen Kennzahl:
$$N_{Q0} = \frac{Q^2 d_p^2 C_C}{3 \pi^2 \varepsilon_0 \mu d_f^3 U} \frac{\varepsilon_p - 1}{\varepsilon_p + 2}$$

Mit der Faserladung pro Faserlänge Q , ε_p der Dielektrizitätskonstanten des Partikelmaterials und ε_0 der elektrischen Feldkonstanten.

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

$$\eta_{Qq} = \pi N_{Qq}$$

mit der dimensionslosen Kennzahl:
$$N_{Qq} = \frac{Q q C_C}{3 \pi^2 \varepsilon_0 \mu d_p d_f U}$$

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

Im Falle des Ladungsgleichgewichtes des Partikelkollektivs ist \bar{n}_q :

$$\bar{n}_q = 2,4 d_p^{\frac{1}{2}}$$

mit dem Partikeldurchmesser in μm .

Die Abscheideeffizienz des Filtervlieses auf Basis der superponierten Einzelfaserabschiedegrade η_Σ berechnet sich zu:

$$E = 1 - \exp\left[-\frac{4 \alpha \eta_\Sigma H}{\pi d_f}\right]$$

mit H als Dicke des Filtervlieses.

Für die Berechnung des Druckverlustes wurde folgende empirische Formel gewählt:

$$\Delta p = \frac{f(\alpha) H \mu U}{(d_f / 2)^2}$$

mit $f(\alpha) = 16 \alpha^{1,5} (1 + 56 \alpha^3)$ für $0,006 < \alpha < 0,3$

Mit dem Modell ist es möglich, Faservliese zu betrachten, die aus mehreren Layern aufgebaut sind. Im Folgenden werden exemplarisch Ergebnisse vorgestellt, die mit dem Modell berechnet wurden.

Abbildung 4.8-2 zeigt die berechnete Retentionen für ein mehrschichtiges Faservlies, das aus zwei Layern aufgebaut ist. Die erste Schicht hat eine Höhe von 0,5 mm und besteht aus Fasern mit einem Durchmesser von 3,5 µm, die zweite Schicht ist 0,3 mm stark und die Faserdurchmesser betragen 7 µm. Die Packungsdichte des Layers 1 beträgt 0,064, die des Layers 2 ist 0,1.

In den drei Diagrammen der Abbildung 4.8-2 sind jeweils die Abscheidegradkurven für die Einzelmechanismen Diffusion, Interzeption, kombinierte Diffusion und Interzeption, Impaktion, Sedimentation sowie für die Gesamteffizienz dargestellt. Die Gesamteffizienz (dunkelblaue Kurve) ergibt sich hierbei aus der Superposition der Einzeleffizienzen. Die beiden oberen Diagramme zeigen die Effizienzen für die einzelnen Schichten, das untere Diagramm ist das Ergebnis einer Reihenschaltung der beiden Schichten.

Für den ersten Layer wird ein Druckverlust von 205 Pa bei einer Anströmgeschwindigkeit von 20 cm/s berechnet. Der zweite Layer trägt mit einem Anteil von 76 Pa zum Druckverlust bei.

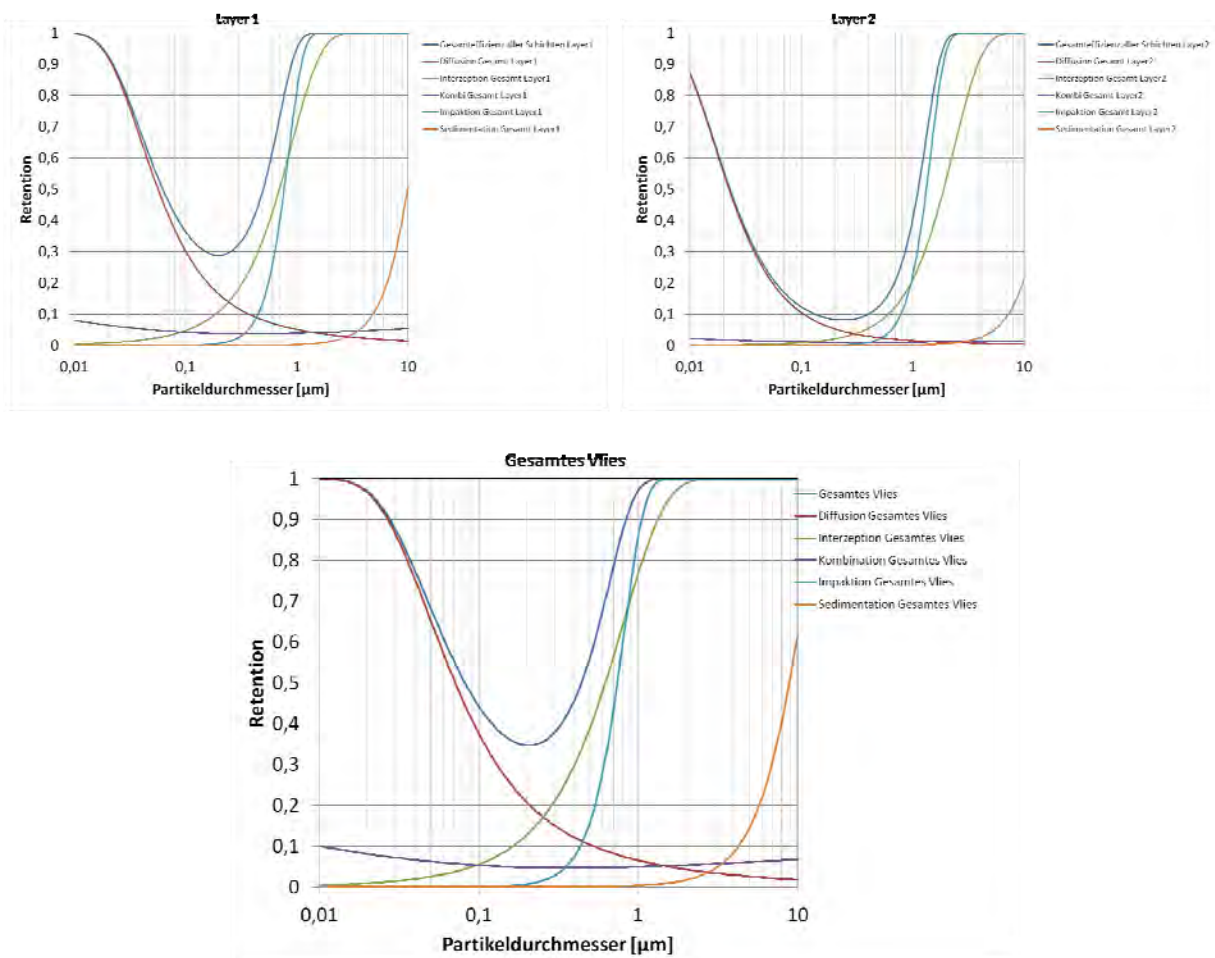


Abbildung 4.8-2: Abscheideeffizienzen für ein zweischichtiges Faservlies

Ob abgeschiedene Partikel zu einer Vergrößerung der Faserdurchmesser führen oder im Sinne eines Dendritenmodells als neue Faserfraktion betrachtet werden, ist abhängig davon, welcher Abscheidemechanismus dominiert. Eine Einstufung unterschiedlicher Strukturen abgeschiedener Partikel hat beispielsweise Kanaoka [29] vorgestellt. Maßgeblich für die Struktur der abgeschiedenen Partikel sind u. a. das Verhältnis von Partikel- zu Faserdurchmesser, die Stokes- und die Pecletzahl. Sowohl Faserwachstums- als auch Dendritenmodell stellen eine starke Vereinfachung der sich real bildenden Partikelstrukturen dar. Welcher der beiden Ansätze die Realität besser beschreibt, hängt vom Einzelfall ab, da in der Realität immer auch Mischformen beider Partikelstrukturen auftreten können. Das innerhalb dieses Projektes entwickelte Modell berücksichtigt allerdings keine Mischformen aus Faserwachstum und Dendritenbildung.

Für das oben betrachtete Beispiel wird eine Beladung mit Partikeln mit einem Durchmesser von $0,15 \mu\text{m}$ und einer Dichte von 1.000 kg/m^3 durchgeführt. Das Verhältnis von Partikel- zu Faserdurchmesser, die Stokes- und die Pecletzahl verursachen nach Kanaoka [29] eher ein Faserwachstum. Die Verwendung des Faserwachstumsmodells führt zu dem in Abbildung 4.8-3 gezeigten Druckverlustanstieg für das gesamte Filtriervlies.

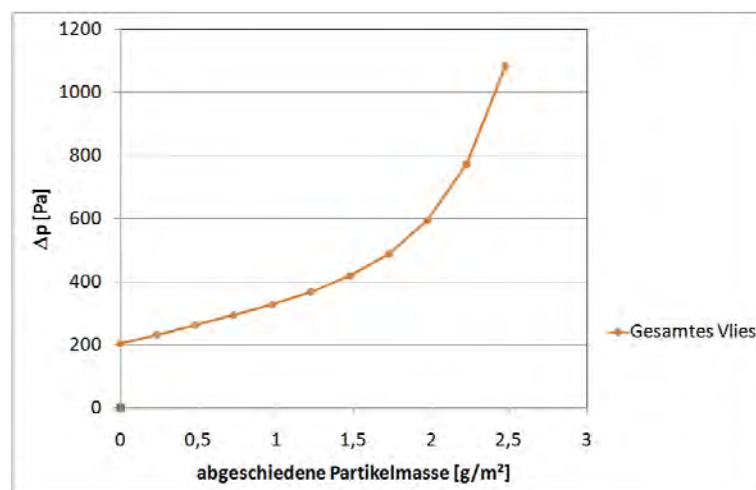


Abbildung 4.8-3: Druckverlustzunahme als Funktion der abgeschiedenen Partikelmasse

Im Folgenden wird der Vergleich des mit dem eigenen Modell berechneten Druckverlustanstiegs bei einer Partikelbeaufschlagung mit Literaturwerten dargestellt. Thomas et al. [30] haben in ihr Modell ein Dendritenwachstum für abgeschiedene Partikel implementiert. Sie haben ihre Modellergebnisse mit eigenen experimentellen Daten abgeglichen. Für das reale verwendete Filtermedium wurden Unsicherheiten bei der Bestimmung der Filterdicke und den Faserdurchmessern angenommen und ein Minimal- und Maximalwert für den Druckverlustanstieg berechnet. Das von ihnen entwickelte Modell überprognostiziert den gemessenen Druckverlustanstieg (Abbildung 4.8-4).

Nach der Einstufung von Kanaoka [29] führen die Randbedingungen eher zu einem Dendritenwachstum, daher wurde zur Berechnung des Druckverlustanstiegs bei Beladung das entsprechende eigene entwickelte Modell verwendet. Zur Berechnung des Druckverlustes wurden die jeweiligen Mittelwerte für Dicke und Faserdurchmesser verwendet. Die eigenen

berechneten Werte liegen nochmals oberhalb der von Thomas et al. [30] berechneten Maximalwerte (Abbildung 4.8-4, blaue Kurve).

Ein Unterschied zwischen eigenem Modell und dem Modell von Thomas et al. [30] besteht darin, dass bei ihnen die abgeschiedenen Partikel nicht nur Dendriten und somit neue Fasern bilden, sondern dass Partikel auch auf bestehenden und neuen Fasern abgeschieden werden. Das Verhältnis wie viele Partikel neue Fasern bilden zu den Partikeln, die auf Fasern abgeschieden werden, ist allerdings intuitiv und nicht mathematisch angenommen worden [31]

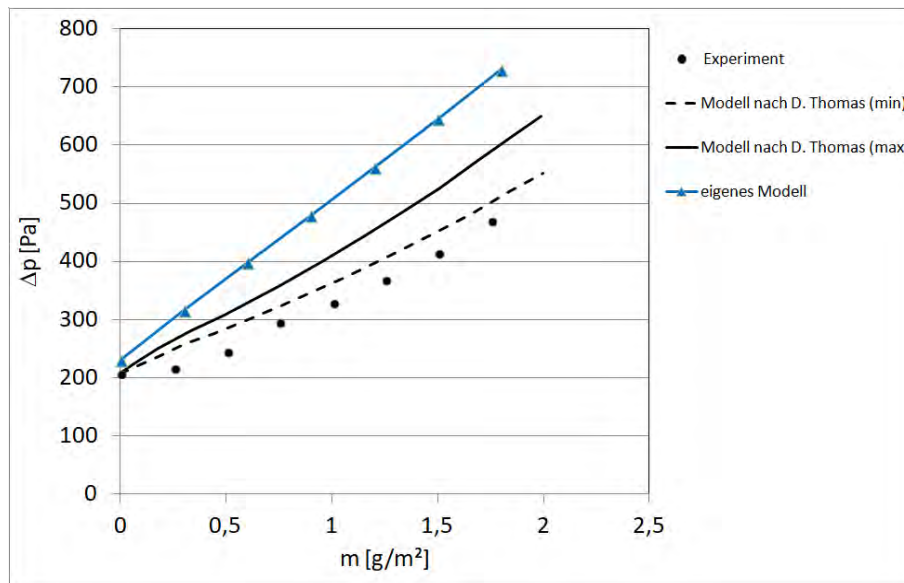


Abbildung 4.8-4: Vergleich Druckverlustberechnungen: eigenes Modell mit Literaturdaten

4.9 Modellierung der Beladung an plissierten Filterstrukturen

Der Übergang von den Filtermedien hin zu plissierten Filtern erfolgt mittels numerischer Berechnungen (CFD) unter Verwendung der kommerziellen Software ANSYS - FLUENT. Den als poröse Strukturen abgebildeten Falten wird im Neuzustand des Filters eine örtlich einheitliche Permeabilität zugewiesen. Auf Basis des Strömungsfeldes (Geschwindigkeitsprofile und Druckverlust) wird die Beaufschlagung des Filters mittels Lagrangeschem Partikeltracking berechnet.

Im Folgenden werden Ergebnisse von numerischen Berechnungen vorgestellt, bei denen Partikeltrajektorien innerhalb einer als dreieckig angenommener Faltengeometrie betrachtet werden.

Abbildung 4.9-1 zeigt die Partikeltrajektorien für Partikel mit einem Durchmesser von $0,15 \mu\text{m}$ für eine dreieckige Falte mit einer Länge von 150 mm und einer Breite von 5 mm für einen Filter mit einer Permeabilität $5,473 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$. Die Partikeltrajektorien sind bei einem Volumenstrom von $3.000 \text{ m}^3/\text{h}$ auf einen Panelfilter (610 mm x 610 mm) berechnet worden. Sie sind ein Maß

für die Beaufschlagung des Filtermediums. Da in den numerischen Berechnungen das Filtermedium als poröse Struktur abgebildet wird, kann eine Abscheidung der Partikel im Medium nicht realisiert werden. Demzufolge sind in den Abbildungen die Partikeltrajektorien auch abströmseitig vorhanden. Zwecks besserer Visualisierung ist der Faltenabstand um den Faktor 10 gestreckt dargestellt worden. Aus Symmetriegründen wird nur die halbe Falte gezeigt.

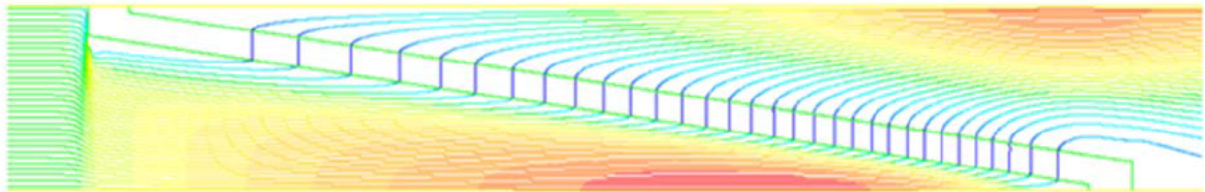


Abbildung 4.9-1: Partikeltrajektorien ($d_p = 0,15 \mu\text{m}$), Faltenhöhe = 150 mm, Faltenbreite = 5 mm

Die Partikeltrajektorien sind im Bereich der Faltenspitze enger beieinander als am Eintritt in die Falte auf der linken Seite. In der Faltenspitze liegt daher eine starke Beaufschlagung mit Partikeln vor.

Über eine eigene implementierte User Defined Funktion (UDF) wird am Auftreffort eines Partikels die Permeabilität des Filtermediums lokal geändert. Die sukzessive Beladung der Filterfalte wird in entsprechenden Zeitschritten abgebildet.

Abbildung 4.9-2 zeigt anhand der Farbkonturplots die Druckverlustzunahme an der exemplarischen Falte von 150 mm Länge und 5 mm Breite für eine Beaufschlagung mit Partikeln von 0,15 μm Durchmesser.

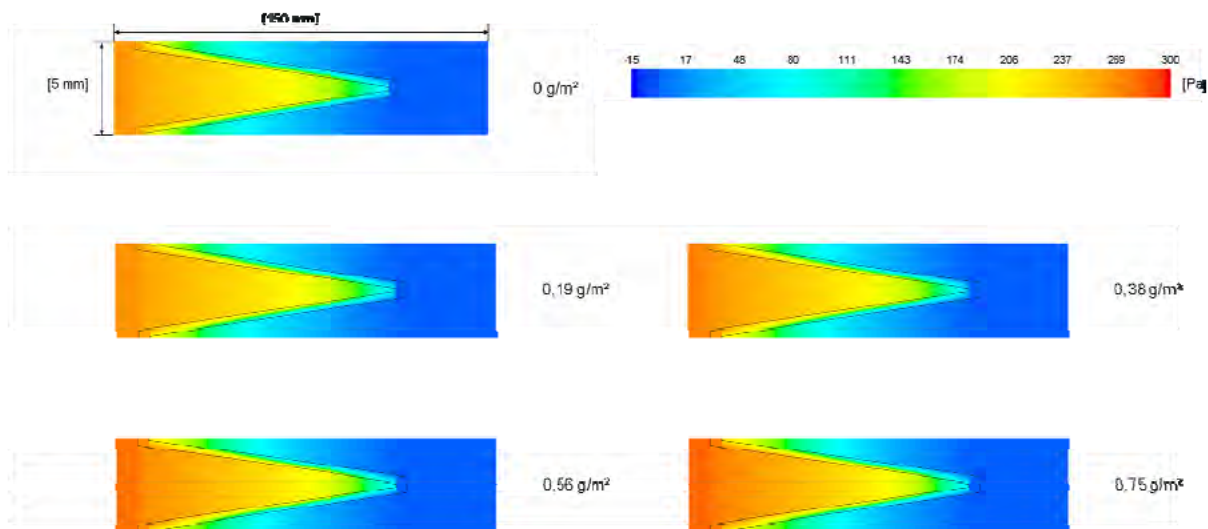


Abbildung 4.9-2: Druckverlustzunahme mit zunehmender Beladung ($d_p = 1 \mu\text{m}$, Faltenhöhe = 150 mm, Faltenbreite = 5 mm)

Die Druckverlustzunahme der CFD-Berechnung wird in der nachfolgenden Abbildung 4.9-3 mit den schon in Abbildung 4.8-4 gezeigten Ergebnissen des eigenen Modells und Literaturdaten verglichen.

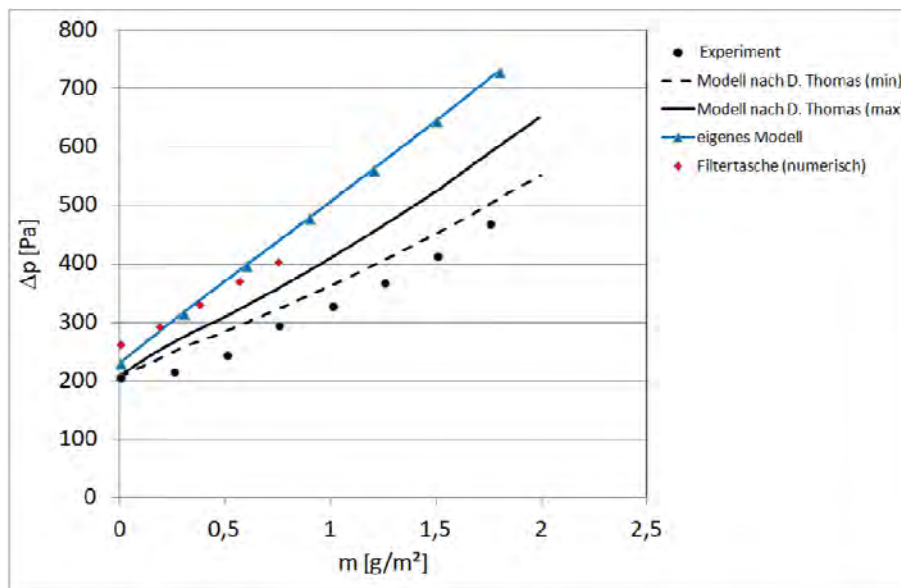


Abbildung 4.9-3: Vergleich Druckverlustberechnungen: CFD-Berechnungen mit eigenem Modell und Literaturdaten

Die numerisch berechneten Druckverlustwerte (Abbildung 4.9-3, rote Rauten) ergeben einen Kurvenverlauf, der eine flachere Steigung hat als die Ergebniskurve des eigenen Modells (blaue Kurve). Die Steigung des Kurvenverlaufs der numerisch berechneten Werte entspricht in etwa der Steigung der experimentell ermittelten Daten, die Kurve liegt allerdings insgesamt auf einem höheren Niveau.

Eine variierende Luftfeuchte führt je nach abgeschiedenen Partikelmaterial zu Änderungen der lokalen Permeabilitäten. Joubert et al. [32] zeigen in ihrer Veröffentlichung, dass gegen Feuchtigkeit inerte Partikel (Aluminiumpartikel) die Permeabilität eines Filtermediums bei Variation der rel. Feuchte nicht ändern. Eine Beladung mit Salzpartikeln erniedrigt hingegen die Permeabilität des Filtermediums bei Erhöhung der rel. Feuchte. Dies bedeutet, dass der Druckverlust mit Erhöhung der rel. Feuchte ansteigt.

Exemplarisch werden die vorher gezeigten numerischen Berechnungen unter der Annahme durchgeführt, dass es sich bei den abgeschiedenen Partikeln um NaCl-Partikel handelt. Es wird eine rel. Feuchte von 60 % angenommen. Für diese Feuchte wird die entsprechende Permeabilitätsänderung des Filtermediums bei den Berechnungen berücksichtigt. Die Ergebnisse der CFD-Berechnungen sind in Abbildung 4.9-4 zu sehen. Die Ergebnisse der Berechnungen bei 60 % rel. Feuchte sind den in Abbildung 4.9-3 gezeigten Werten vergleichend gegenübergestellt.

Man erkennt, dass die Druckverlustwerte für die Salzpartikel (braune Quadrate) über den numerisch berechneten Werten für die feuchtigkeitsinerten Partikel (rote Rauten) liegen.

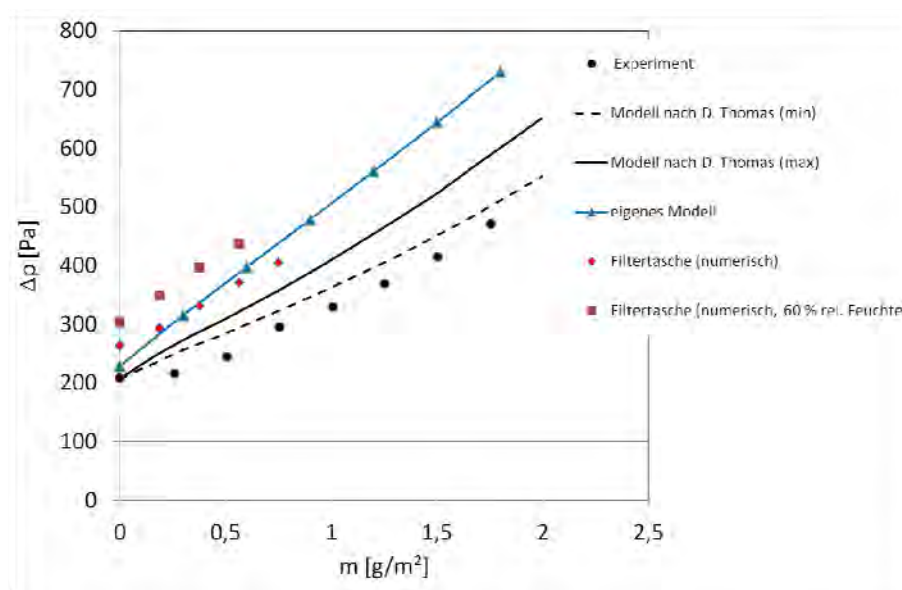


Abbildung 4.9-4: Vergleich Druckverlustberechnungen: CFD-Berechnungen (trocken, feucht) mit eigenem Modell und Literaturdaten

4.10 Prüfprozedere nach Wilcox und Poerner

Im Folgenden wird die von Wilcox und Poerner vorgeschlagene Prüfprozedur zusammengefasst, um anschließend Erweiterungen, Änderungen und Verbesserungen näher zu beleuchten.

Prüfaufbau

Der vorgeschlagene Prüfaufbau von Wilcox und Poerner [1] basiert auf den in ASHRAE 52.2-2007 [2] und EN 779-2002 [3] beschriebenen. Durch den Einbau von mehreren Düsen und Abflüssen kann Flüssigkeit in den Kanal eingespeist und gemessen werden, wieviel davon aus dem Luftstrom ausfällt. Weitere Änderungen gegenüber der Norm ergeben sich durch Fenster oder klare Testabschnitten, damit optische Sensoren außerhalb des Testkanals angeordnet werden können. Außerdem werden Probenahmesonden vor und nach dem Testfilter vorgeschlagen, um die Zusammensetzung des Aerosols zu analysieren. Wenn Filtersysteme getestet werden sollen, müssen weitere Änderungen vorgenommen werden, um den Filter durch Filterkomponenten in einem langgestreckten Testabschnitt zu ersetzen.

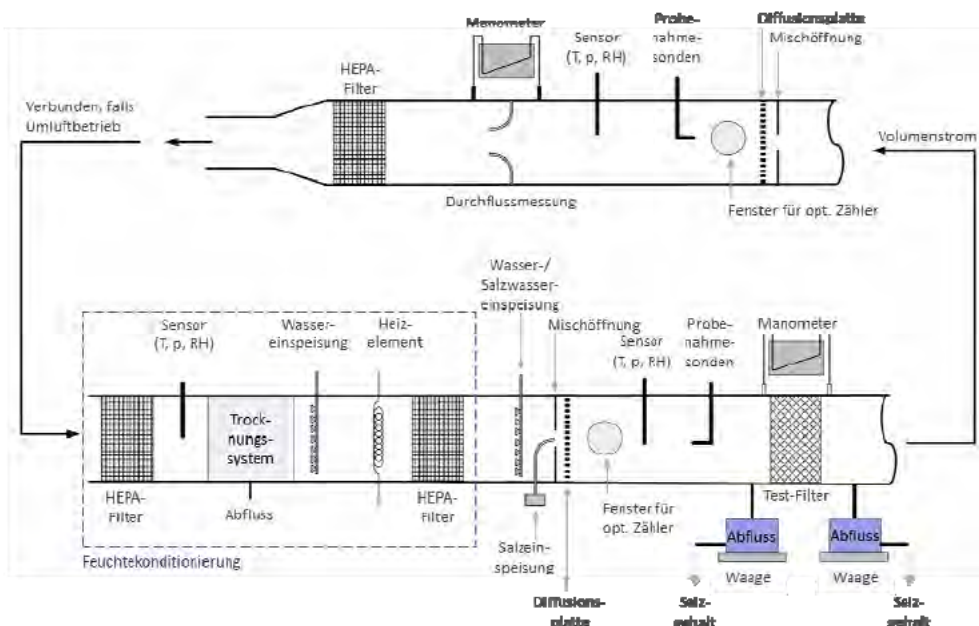


Abbildung 4.10-1: Prüfaufbau nach Wilcox und Poerner [1] .

4.10.1 Testverfahren und Messungen

Die Autoren schlagen drei unterschiedliche Effizienzmessungen vor, zum einen gemäß ASHRAE 52.2 [2] mit KCl-Partikeln. Diese trockene Effizienzmessung soll im Neuzustand, zwischen den Beladungen und nach Beendigung eines Tests durchgeführt werden. Zum anderen einen Wirkungsgrad, der sich aus der roh- und reingasseitigen Analyse der Salzzusammensetzung ergibt. Hierbei wird ein Natriumflammenphotometer empfohlen. Und als letzten Wirkungsgrad, das Verhältnis aus roh- und reingasseitigen Zählereignissen, wenn der Filter mit Salzstaubmischungen, Wasser und Salzwasser beladen wird. Dieser Wirkungsgrad soll Auskunft darüber geben, wie die Veränderung des Filters von der Substanz abhängt.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die Tests die innerhalb einer Messreihe durchgeführt werden, die Reihenfolge ist dabei nicht entscheidend.

Tabelle 4.5: Übersicht der durchzuführenden Tests nach Wilcox und Poerner [1].

Test-Nr.	Trockenes Salz	Wasser	Salzwasser	0 – 40 % r.F.	90 – 100 % r.F.
1		X		X	
2			X	X	
3	X	X		X	
4	X				X
5			X		X
6	X			Rampe fahren	

Test 1 und 2 sollen Orte mit hoher Wellen- oder Brandungsaktivität bei geringer Luftfeuchte nachstellen, wobei Test 2 wasserlösliche Verunreinigungen beinhaltet. Test 3 soll z.B. einen Regenschirm in Gebieten abbilden, in denen sich unter normalen Umständen bereits Salz abgeschieden hat und Test 4 soll Orte mit hoher Luftfeuchtigkeit und viel abgeschiedenem Salz nachstellen. Das Salz wird bei Test 3 und 4 jeweils bei trockenen Bedingungen vor der Effizienzmessung aufgebracht. Test 5 soll Bedingungen von Orten mit hoher Luftfeuchtigkeit und Salzwassernebel abbilden und Test 6 ist die zyklische Simulation realer Bedingungen.

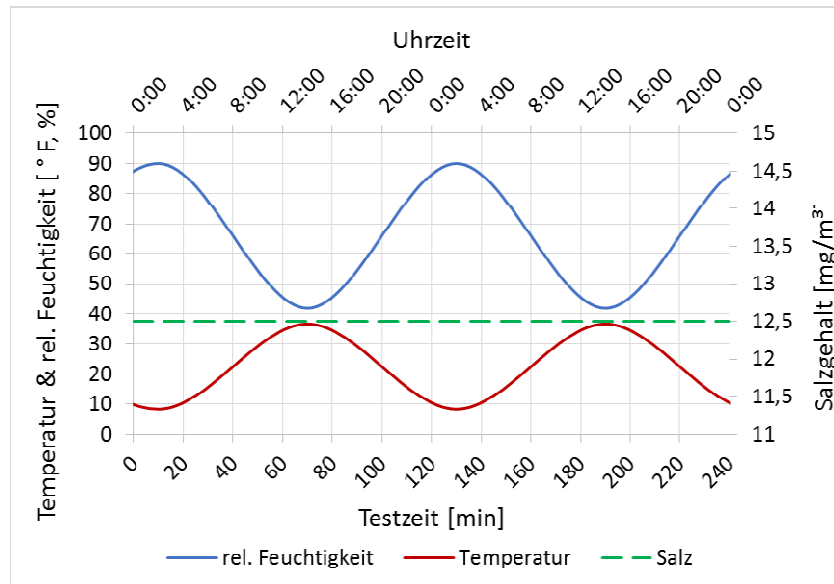


Abbildung 4.10-2: Ablauf von Test 6: zyklische Simulation realer Bedingungen.

4.10.2 Künftige Weiterentwicklungen

Als künftige Weiterentwicklungen bezogen auf die Salzbeladung empfehlen die Autoren [1] zum einen eine Beladung mit einer Salz-Staub-Mischung anstelle von trockenem Salz. Des Weiteren sollten Additive zur Minimierung der Agglomeration untersucht werden und die Verwendung eines Aerosol-Generators anstelle eines Staubförderers muss validiert werden. Bei den Messungen geben Wilcox und Poerner [1] an, dass der Feuchtigkeitssensor für hohe Feuchtigkeiten ausgelegt sein muss und eine gleichzeitige Messung der roh- und reingasseitigen Partikelkonzentrationen zu empfehlen ist.

Außer Test 3 (trockenes Salz, Wassernebel bei niedriger Feuchte) und Test 5 (Salzwasser bei hoher Feuchte) wurden die Tests noch nicht durchgeführt. Bei letzterem haben Wilcox und Poerner [1] bei hoher Feuchtigkeit nach 45 Minuten kein Salz hinter dem Filter festgestellt, da das Material scheinbar noch nicht gesättigt war und empfehlen deswegen Test 5 solange durchzuführen bis der Filter gesättigt ist. Bezogen auf beide Tests treffen die Autoren die Aussage, dass sie wiederholt und die Unsicherheit der Ergebnisse skizziert werden müssen. Die Ergebnisse dieser Messreihen sind allerdings nicht zu finden.

4.11 Festlegung der Prüfmethode

Auf Basis der experimentellen und theoretischen Ergebnisse eine Prüfmethode zu entwickeln scheint aufgrund der Uneinheitlichkeit nicht trivial. Fraglich ist, ob mit gezielten Einzelversuchen überhaupt Aussagen über das Verhalten von Filtern bei praxisrelevanten Bedingungen getroffen werden können, da die komplexen Randbedingungen zu unterschiedlich sein können.

Um diese Standort bezogenen Randbedingungen genauer charakterisieren zu können, müssten deutlich mehr und auch genauere Daten vorliegen, wie bspw. die genauen klimatischen Bedingungen, der Wechselzeitpunkt der Filter (ob vor oder nach der Feuchteperiode), ob der Filter auf der vom Wind angeströmten Seite liegt und sich dadurch höhere Geschwindigkeiten ergeben, ob es weitere Vorfilter gibt, ob eine zusätzliche Wassereindüsung vorgesehen ist und viele andere relevante Einflüsse. Auf Basis solcher Daten könnten Standorte eindeutiger charakterisiert werden, um für jeden Einzelfall Messungen zu planen.

Die Prüfbedingungen müssten dann entsprechend dem vorgesehenen Standort genauer eingegrenzt werden (Wassertropfen, Wasserbad, welche Geschwindigkeit, welche Beaufschlagung, welche Konditionierung (auch Dauer) etc.). Dementsprechend sollten die Randbedingungen etwaiger Messreihen schärfer auf einzelne Phänomene beschränkt werden: wie reagiert der Filter bei hoher Feuchte, wie bei trocken aufgebrachtem NaCl, wie bei NaCl aus der Lösung aufgebracht etc.

Es erscheint sinnvoll eine Auswahl an Basis-Messungen zu erstellen, die dann für die einzelnen Standorte kombiniert werden können. Eine gültige Prüfmethode für eine allgemeine Aussage zur Eignung wird durch die komplexen und vielfältigen Einsatzbedingungen kaum möglich sein.

Allgemein:

- DEHS als Prüfaerosol
- für hohe relative Feuchten sollte ein Wert von über 90 % r.F. gewählt werden, um eine Verdunstung auszuschließen, die auch die Größe von Salzpartikeln beeinflussen würde (die durchschnittlich gemessene Feuchte in marinen Umgebungen liegt bei ca. 88 %)
- Geschwindigkeit abhängig vom Realeinsatz zu wählen

- im Gegensatz zu Wilcox und Poerner [1] keine vorgegebene Testreihe, sondern an den vorgesehenen Standort angepasste Kombinationen

- Beladung mit Staub, wenn z.B. in der Nähe Braunkohleabbau stattfindet oder ein urbaner Standort repräsentiert werden soll, bei dem eine hohe Partikelkonzentration in der Umgebungsluft vorliegen
- Beladung mit trockenem Salz, wenn Verhalten bei bereits abgeschiedenem Salz untersucht werden soll
- Beladung mit Salzlösung, wenn Standorte mit hoher Wellen- oder Brandungsaktivität inklusive wasserlöslicher Verunreinigungen vorgesehen sind

- Konditionierung mit Wassertröpfchen, wenn hohe Wellen- oder Brandungsaktivität ohne Verunreinigungen oder Regenstürme abgebildet werden sollen
- Konditionierung mit Wasserbad bei zusätzlicher Wassereindüsung vor dem Filter (Filter dauerhaft "nass")

Tabelle 4.6: Vorschlag verschiedener Basis-Tests

			Testbedingungen			
			relative Luftfeuchte		Windseite, Windgeschwindigkeit	
			hohe Feuchte	niedrige Feuchte	hohe Geschw.	niedrige Geschw.
Beladung	Entfernung zu Salzgewässern, Windseite, relative Luftfeuchtigkeit	keine Beladung				
		Staub				
		Salzlösung	1		1	
		trockenes Salz	1			1
Konditionierung	Wassereindüsung, Entfernung zu Gewässern, Regen	keine Konditionierung				
		Wassertropfen	2			2
		Wasserbad	2		2	

In Tabelle 4.6 sind zwei Beispiele eingetragen. Die hellblau markierten Felder zeigen Tests mit hoher relativer Feuchte und einer Beaufschlagung mit Salz aus einer wässrigen Lösung, sowie einen zweiten Test mit dauerhafte Wassereindüsung und hohen Geschwindigkeiten. Diese Messungen würden einen Standort mit hoher relativer Luftfeuchte repräsentieren bei dem der Filter auf der Wetterseite eingebaut ist. Die hellgrünen Felder repräsentieren einen Standort, bei dem der Filter nicht auf der dem Wetter zugewandten Seite eingebaut ist und somit auch deutlich niedrigeren Geschwindigkeiten ausgesetzt wird. Zudem weist der Standort eine hohe relative Luftfeuchtigkeit auf. Daher beschränken sich die Basis-Tests für den hellgrünen Fall auf eine Beaufschlagung mit trockenem Salz bei niedrigen Anströmgeschwindigkeiten und der Konditionierung mit einzelnen Wassertropfen.

Selbst bei ähnlich abgegrenzten Tests wären noch einige Fragestellungen offen, wie beispielsweise die Komplexität der Deliqueszenzfeuchte. Zu überlegen wäre daher ein anderes Salz zu verwenden, um den problematischen Feuchtigkeitsbereich großräumig zu umgehen. Wird ein anderes Salz verwendet, müsste die Übertragbarkeit der Ergebnisse validiert werden. Eine weitere Problematik ergibt sich bei Effizienzmessung nach ASHRAE 52.2 [2], wenn KCl als Testaerosol für Medien, die anschließend einer Feuchtevariation ausgesetzt werden, verwendet wird, da das abgeschiedene Kaliumchlorid ebenfalls auf hohe Feuchtigkeiten reagiert ($DRH_{KCl} \approx 85\% \text{ r.F.}$). Zudem kann es eventuelle Beladungen, wie NaCl beeinflussen oder sich mischen, was die Ergebnisinterpretation zusätzlich erschweren würde (Vergleich Abbildung 4.3-42). Um zusätzlich den Deliqueszenz-Bereich von KCl zu umgehen, müssten relative

Feuchten von nahe 100 % für die Messungen bei feuchter Umgebung stabil bereitgestellt werden können. Bei diesen Bedingungen würden jedoch sehr wahrscheinlich Kondensations-effekte auftreten.

Auch wenn sowohl das externe Prüfinstitut als auch Wilcox und Poerner [1] Feuchtigkeiten von an die 100 % realisiert haben wollen, bleiben die Fragen, wie diese hohe Feuchte stabil zur Verfügung gestellt und Kondensationseffekte umgangen wurden. Kommerzielle Filterprüfstände (bspw. MMTC 2000 EHF von Fa. Palas) sind aus diesem Grund nur mit Feuchtebereichen bis 80 % rel. Feuchtigkeit ausgestattet. Der Prüfaufbau der FS 1 bietet im Vergleich dazu die Vorteile kostengünstig, klein und modular zu sein. Des Weiteren erlaubt dieser einen einfachen Wechsel oder den Austausch einzelner Komponenten, so dass bspw. die Beladung schnell geändert werden kann.

5 Fazit

Im Projekt wurden Effizienz und Druckverlust unterschiedlicher Kassettenfilter im Neuzustand und nach Nutzung in Gasturbinenanlagen bestimmt. Der Einfluss einer Feuchtevariation auf die Leistungsdaten dieser Filter wurde an einem Prüfstand nach EN 779 untersucht. Insbesondere die Feuchtevariation an beladenen Filtern aus den Realanlagen führte zu einem ungleichartigen Verlauf der Fraktionsabscheidegradkurven, der auch nicht mittels der Analyseergebnisse der abgeschiedenen Partikel erklärt werden konnte. Hierzu wäre eine genauere Kenntnis der Beladungshistorie notwendig.

Da die Untersuchungen an konfektionierten Filtern sehr zeitaufwändig sind, wurde im Rahmen des Projektes ein modularer Prüfaufbau für Medientests errichtet, an dem ein schneller Wechsel der Bedingungen und Beladungen möglich ist. An diesem Prüfstand wurden zunächst Verläufe des Druckverlustes von Medien im Neuzustand und nach vorheriger Beladung bei Variation der Feuchte aufgezeichnet. Anschließend wurden poly- und monodisperse Messungen der Fraktionsabscheidegrade in unterschiedlichen Beladungszuständen und bei verschiedenen Bedingungen gemessen. Als Beladungs-aerosole kamen NaCl – im gemahlten Zustand und aus einer Lösung versprüht, MgCl₂ und auch der Teststaub A2 fine zum Einsatz. Auch die gezielte Behandlung mit Isopropanol und deren Einfluss auf die Retention wurde untersucht. Sowohl bei den Druckverlust- als auch bei den Effizienzmessungen wurden durch gezielte Messungen Abgleiche mit einem normkonformen Prüfstand durchgeführt. Dabei zeigten sich maximal leichte Unterschiede, die durch eine Abweichung der Anströmfläche, respektive der Geschwindigkeit beziehungsweise durch Materialunterschiede erklärbar sind.

Die Druckverluste der untersuchten Medien (Glasfaser, funktionalisierte Glasfaser und Membran) sprachen unterschiedlich stark auf eventuelle Beladungen und auf anschließende Variation der Feuchte an. Je höher die Anströmgeschwindigkeit gewählt wurde, umso extremer zeigte sich die Auswirkung, wobei Medien mit A2-Beladung keinen Einfluss aufwiesen. Das Verhalten der untersuchten Salze unterschied sich dabei deutlich und zeigte geschwindigkeitsabhängige Einzelergebnisse.

Anschließend wurden polydisperse Messungen der Retentionen bei 8 cm/s gemessen, da bei niedrigeren Anströmgeschwindigkeiten kein Einfluss der Feuchte erkennbar war. Bei Medien mit NaCl-Beladung traten materialabhängige Tendenzen auf. Beladung mit A2 Teststaub verbesserte im Allgemeinen die Abscheideeffizienz. Um auch die Auswirkung der Isopropanol-Behandlung zu untersuchen, wurden die Medien besprüht und anschließend erneut der Fraktionsabscheidegrad gemessen. Zusätzlich wurden REM-Aufnahmen vor und nach Behandlung aufgenommen, die die deutliche Verschlechterung der Retention bei dem Membran-Medium erklären konnten.

Um eine ungewollte Beladung mit DEHS bei polydispersen Messungen zu vermeiden, wurde der Prüfaufbau erweitert, so dass auch monodisperse Effizienztests durchführbar waren und eine Tropfenbeaufschlagung während der Versuche möglich war. Nach diesem Umbau wurden Messreihen von Koaleszer-Medien durchgeführt, die leider keine sinnvollen Ergebnisse erbrachten. Medientests mit diesem modifizierten Prüfstand zum Tropfenschlag wurden bei

zwei cm/s durchgeführt und ergaben leicht verbesserte Effizienzen bei Beaufschlagung mit Wasser. Diese waren allerdings durch die eng bei einander liegenden Retentionskurven nur als Tendenz zu erkennen. Das gleiche Bild zeigte sich auch bei Beladung mit trockenen NaCl vor einer Feuchteconditionierung. Anschließend wurden Ergebnisse der FS 1 mit denen eines externen Prüfinstitutes verglichen. Hierbei ergaben sich allerdings große Diskrepanzen, was darauf zurück zu führen ist, dass aus den Prüfberichten nicht eindeutig hervorgeht, wie eine Conditionierung mit hoher relativer Feuchte realisiert wurde.

Des Weiteren wurden eine kurze Fehlerdiskussion, eine Literaturrecherche zur Deliqueszenzfeuchte von NaCl durchgeführt und REM-Aufnahmen verschiedener Zustände der Medien ausgewertet. Das Membran-Medium wurde dazu so präpariert, dass auch Aufnahmen der vom Stützvlies abgetrennten Membranschicht möglich waren.

Abschließend wurde kurz der Prüfvorschlag von Wilcox und Poerner [1] vorgestellt, um den im Rahmen dieses Projektes erarbeiteten vergleichend gegenüber stellen zu können. Es ist jedoch auf Basis der experimentellen und theoretischen Ergebnisse dieses Projektes nicht möglich, eine generell gültige Aussage zu der Eignung von Filtern basierenden auf einzelnen allgemeinen Tests zu treffen, da die Standortbedingungen entscheidender zu sein scheinen, als das verwendete Material. Daher wären auch detailliertere Daten über den Standort real gealterter Filter wichtig, um die Medien- und Vergleichstests an Filtern genauer auf diese Parameter eingrenzen zu können, da beispielsweise auch die Abhängigkeit der Größenverteilung und der Salzkonzentration von der Windgeschwindigkeit oder der Höhenlage nicht unerheblich ist (Fitzgerald [33]). Generell scheint es sinnvoller einzelne Phänomene zu untersuchen, die sich klar voneinander abgrenzen lassen, da sich die Auswirkungen und Einflüsse sonst überlagern und eine Interpretation sehr komplex wird. Eventuell könnte auch die mechanische Belastbarkeit von beladenen und/oder feuchten Medien als Qualitätsmerkmal entscheidend für die Auswahl sein.

6 Gegenüberstellung von Projektziel und erreichten Ergebnissen

Primäres Ziel des Projektes war es, Vorschläge für eine Prüfprozedur zu entwickeln, die reale Bedingungen von Gasturbinenfiltern besser beschreibt als die bisherigen Normen und Regelwerke. Dazu wurden Untersuchungen an Filtermedien im Neuzustand, nach Beladung mit Testaerosolen und Conditionierung mit Feuchtigkeit durchgeführt.

Ziel der begleitenden modellierenden Untersuchungen war es darüber hinaus, ein verbessertes Verständnis für die einzelnen Abscheidebeiträge zu gewinnen.

Zur Erreichung des Projektziels wurden im Einzelnen bearbeitet:

- Druckverlust- und Retentionsmessungen an Filtermedien und Filtern
 - Im Neuzustand
 - Nach Beladung mit verschiedenen Aerosolen und Stäuben
 - Nach Konditionierung mit Feuchtigkeit, beispielsweise Tropfenschlag oder Feuchtevariation
 - Nach Behandlung mit Isopropanol
- Modellierung
 - Begleitende Modellierung des Druckverlustes und des Fraktionsabscheidegrades an Filtermedien in Abhängigkeit von Beladungszustand sowie Betrachtungen plissierter Filterstrukturen

Tabelle 6.1: Gegenüberstellung von geplanten Projektzielen und erreichten Ergebnissen

Projektziel	Ergebnis
<p>Aufbauend auf vorhandenen Normen und Richtlinien Entwicklung einer neuen Prüfmethode, die die Leistungsparameter von Gasturbinenfiltern und anderen Filtersystemen mit ähnlichen Randbedingungen praxisnah beschreibt.</p>	<p><u>Filtermedien:</u></p> <p>Es wurde ein modularer Prüfaufbau konzipiert, der schnelle Wechsel der Bedingungen und Beladungen ermöglicht. Für verschiedene Filtermedien wurden daran Druckverlust und Fraktionsabscheidegrad bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten und bei variierender relativer Luftfeuchte untersucht. Die Medien wurden sowohl im Neu- als auch im beladenen Zustand geprüft. Als Beladungs-aerosole kamen dabei NaCl, sowohl versprüht als auch im gemahlene Zustand, MgCl₂ und der Teststaub A2 fine zum Einsatz. Zusätzlich wurden REM-Aufnahmen der Filtermedien ausgewertet. Für die theoretische Untersuchung wurden eine Fehlerdiskussion und eine Recherche zur Deliqueszenzfeuchte von NaCl durchgeführt.</p> <p>Da die experimentellen Untersuchungen zu sehr uneinheitlichen Ergebnissen führen, ist eine verallgemeinerte Interpretation nicht trivial. Durch die Überlagerung einzelner Phänomene ergeben sich scheinbar deutlich komplexere Zustände, als bisher vermutet.</p> <p><u>Konfektionierte Filter:</u></p> <p>An unterschiedlichen Filterelementen wurde der Druckverlust und Fraktionsabscheidegrad mit DEHS-Partikeln im Neuzustand der Filter ermittelt. Die gleichen Filterelemente wurden, nachdem sie eine Beladungshistorie und wechselnde Klimabedingungen im Realeinsatz in</p>

	<p>Zuluftanlagen von Gasturbinen erfahren haben, einer Prüfung unterzogen. Hierbei wurden Druckverlust und DEHS-Effizienz bei Variation der rel. Feuchte bestimmt.</p> <p>Eine universelle Prüfmethode, die insbesondere die lokalen Randbedingungen aller Anlagenstandorte einbezieht, ist nicht umsetzbar.</p> <p>Resultat der Untersuchungen ist eine Präzisierung, Weiterentwicklung und Ergänzung der in der Literatur vorgeschlagenen Basis-Prüfungen. Anwender können standortabhängig die jeweils relevanten Basis-Tests auswählen. Die so erzielbaren Prüfergebnisse bilden dann den Real-einsatz der Filter besser ab.</p>
<p>Die begleitende Modellierung soll zu einem verbesserten Verständnis für die Prozesse während der Beladung mit Stäuben und Salzen bei sich ändernden Randbedingungen führen.</p>	<p>Für die Modellierung hinsichtlich der Filtermedien wurde das einzelfaserbasierte Filtrationsmodell genutzt. Es wurde um eine Ortsdiskretisierung in Vliesdickenrichtung und eine Diskretisierung in Beladungsstufen erweitert. Unter Zugrundelegung der Größenverteilung und Anzahlkonzentration des Beladungs-aerosols wurde die zeitliche Änderung der Filterstruktur berücksichtigt. Je nach Partikeldurchmesser und dominierendem Abscheidemechanismus wurde die Struktur der abgeschiedenen Partikel im Sinne eines Faserwachstums oder durch „Bildung neuer Fasern“ dargestellt.</p> <p>Die Beladung plissierte Filterstrukturen wurde mittels Lagrangeschem Partikeltracking berechnet. Die sukzessive Beladung der plissierten Filter wurde durch Zuweisung ortsabhängiger Permeabilitäten in entsprechenden Zeitschritten abgebildet.</p> <p>Die Modelle können für die Untersuchung der Partikeltransportprozesse bei der Beladung von Filtern genutzt werden.</p>

Das Ziel des Forschungsprojektes wurde erreicht.

7 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.

Kleine und mittelständische Unternehmen, die im Bereich der Filtermedienherstellung, der Filterkonfektionierung und der Filterprüfung tätig sind, profitieren vom modularen Aufbau der Prüfmethode, die eine detaillierte Schwachstellenanalyse der Filter ermöglicht und Wege zur Qualitätsverbesserung aufzeigt.

Die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen wird gesteigert durch Einsparung von Kosten bei der Filterprüfung und durch verbesserte Filter. Die verbesserten Filter führen zur Verlängerung von Standzeiten, die Kosten- und Energieeinsparung bedingen.

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

Für das Projekt wurde eine ausgabenneutrale Verlängerung um 1 Jahr beantragt. Das Projektende hatte sich damit auf den 31.07.2017 verschoben.

8.1 Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

Übersicht in Personenmonaten (PM):

Forschungsstelle	Ansätze	bewilligte PM	geleistete PM	Differenz PM
UDE (FSt 1)	A.1	46,67	46,675	+0,005
IUTA (FSt 2)	A.1	37	34,85	-2,15

Forschungsstelle 1 (Universität Duisburg-Essen)

Die Arbeiten an der Forschungsstelle 1 wurden bedingt durch das Ausscheiden einer Mitarbeiterin von 3 Mitarbeitern/innen mit wiss. Hochschulstudium und einem Mitarbeiter mit Bachelorabschluss bearbeitet, dabei wurden 46,675 PM HPA Gr. A+B abgerechnet.

Forschungsstelle 2 (Institut für Energie- und Umwelttechnik)

Die Arbeiten an der Forschungsstelle 2 wurden von 4 Mitarbeitern/innen mit wiss. Hochschulstudium bearbeitet. Es wurden 34,85 PM HPA Gr. A+B wie genehmigt abgerechnet.

- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans):

entfällt

- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans):

An der FSt.2 wurde eine Jahreslizenzen der Software ANSYS Academic Research CFD beschafft.

8.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten und der Personaleinsatz waren zur Erreichung des Projektzieles notwendig. Die eingesetzten Projektmitarbeiter haben in enger Zusammenarbeit der beiden Forschungsstellen die Messungen konzipiert, durchgeführt, und ausgewertet. Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Versuche mit Stäuben, Salzen, Wasser- und Lösungströpfchen wurden hinsichtlich der Prüfmethode bewertet. Es wurden gemeinsame Arbeiten zur Modellierung unter Verwendung des einzelfaserbasierten Filtrationsmodells sowie CFD-Berechnungen an plissierten Filterstrukturen angestellt.

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

9 Fortgeschriebener, aktualisierter Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

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

Tabelle 9.1: durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Rahmen	Datum
Einstellung von Projektinformationen in die öffentlich zugängliche IUTA Webseite, Bereich Industrielle Gemeinschaftsforschung, Internet-Projektdatenbank	Projektdatendatenbank IUTA	erfolgt
Erstellung von Zwischenberichten und Weitergabe dieser Berichte an interessierte Branchenfachverbände und alle interessierten Unternehmen	Vorstellung der Ergebnisse	seit 2014 zugänglich

Information und Beratung interessierter Unternehmen (außerhalb des PA) durch die Forschungsstellen	Gespräche mit Mitarbeitern der Forschungsstellen	fortlaufend
Regelmäßige Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses und kontinuierliche Berichterstattung gegenüber den hierin vertretenen Unternehmen und Verbänden	Vorstellung der erzielten Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens	06.11.2014 05.11.2015 28.06.2016 08.06.2017
Übernahme der Ergebnisse in die akademische/universitäre Lehre	Vorlesungen an der Uni Duisburg-Essen: „Aerosolprozesstechnik“ Prof. Dr.-Ing. Schmidt „Air pollution control“ Dr.-Ing. Haep	Ab SS 2015 Ab WS 2014/2015
Übernahme der Ergebnisse in technische Regelwerke und Normen durch bestehende Mitarbeit in entsprechenden Arbeitsgruppen	durch Prof. Dr.-Ing. F. Schmidt als Mitglied folgender Norm- u. Richtlinienausschüsse: Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, Fachbereich: Allgemeine Lufttechnik (NA 060) Normenausschuss Kraftfahrzeuge (FAKRA) des Verbandes der Automobilindustrie (VDA) Arbeitskreis „Kabinenluftfilter“	fortlaufend
Vorstellung der Ergebnisse auf Veranstaltungen	European Aerosol Conference, Zürich (Poster)	27.08. - 01.09.2017
Veröffentlichung der Projektberichte auf den Internetseiten der Forschungsstellen	Internetseiten / Projektdatenbank	erfolgt
Tätigkeitsbericht des IUTA		für 2015 und 2016 erfolgt
Normen- und Richtlinienarbeit	CEN, DIN, VDI und NAM	fortlaufend durch die Projektleiter der FS 1 und FS 2

Tabelle 9.2: geplante Transfermaßnahmen

Maßnahme	Rahmen	Datum/Zeit
Information und Beratung interessierter Unternehmen (außerhalb des PA) durch die Forschungsstellen	Bilaterale Gespräche mit Mitarbeitern der Forschungsstellen	wird kontinuierlich vorangetrieben
Normen- und Richtlinienarbeit	CEN, DIN, VDI und NAM	fortlaufend durch die Projektleiter der FS 1 und FS 2
Veröffentlichung in Chemie Ingenieur Technik	Vorstellung der Ergebnisse bei interessierten Lesern aus Wissenschaft, Forschung und Industrie	Beitrag eingereicht
IUTA Tätigkeitsbericht	Information interessierter Personen aus Wissenschaft und Forschung	2. Quartal 2017
Veröffentlichung des Abschlussberichtes auf der Webseite der Mitgliedsvereinigung	Wissenstransfer zu interessierten Personen	nach Abschluss des Vorhabens
Beratung interessierter Unternehmen vor Ort und in der Forschungsstelle	Wissenstransfer in die Wirtschaft	nach Anfrage ohne Zeitbegrenzung
Teilnahme der Projektmitarbeiter an Fachausstellungen der Industrie	Unterstützung der Firmen bei der Umsetzung der Ergebnisse	nach Anfrage ohne Zeitbegrenzung
Transfer der Ergebnisse in die DIN EN 16890 (Mitglied Prof. F. Schmidt)	Einflussnahme der Ergebnisse auf den Stand der Technik	nach Abschluss des Vorhabens
Übernahme der Ergebnisse in die Lehre durch die Vorlesungen von Prof. F. Schmidt	Einflussnahme der Ergebnisse auf den Stand der Wissenschaft und Entwicklung	nach Abschluss des Vorhabens

Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Über die durchgeführten und geplanten Transfermaßnahmen, wie PA-Sitzungen, Konferenzbeiträge, Veröffentlichungen usw., wurden die Unternehmen, die im Bereich der Filtration tätig sind, gezielt angesprochen. Die vorgeschlagene modular aufgebaute Prüfprozedur, bei der die Anwender standortabhängig die jeweils relevanten Basis-Tests auswählen können, wird es ermöglichen, Produkte gezielt auf den Anwendungsfall hin zu optimieren. Unternehmen, die Produkte für den Bereich der Filterprüfung anbieten, profitieren von den Ergebnissen des IGF-Projektes.

Die im Projekt gewonnen Erkenntnisse werden durch den Projektleiter der Forschungsstelle 1 unmittelbar in die entsprechenden Normungsgremien eingebracht. Die Umsetzung in internationale Normen ist allerdings bekanntermaßen ein langwieriges Verfahren.

10 Literaturverzeichnis

- [1] M. Wilcox und N. Poerner, „Gas Turbine Filter Efficiency test Procedure: Liquid and Soluble Particles,“ *Gas Machinery Research Council*, 2011.
- [2] ASHRAE 52.2:2007, *Method of testing general ventilation air-cleaning devices for removal efficiency by particle size*.
- [3] DIN EN 779:2012, *Partikel-Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik; Bestimmung der Filterleistung*.
- [4] DIN EN 1822:2011, *Schwebstofffilter (EPA, HEPA und ULPA)*.
- [5] EUROVENT.
- [6] D. Brumbaugh, „Inlet Air Filtration Adapts to Evolving Gas Turbine Technology,“ *Power Engineering Vol. 106, No. 10*, pp. 51-54, 2002.
- [7] P. Sennett, „Air filtration: Perfect air filtering for gas turbines,“ *Filtration & Separation, Vol. 44, No. 10*, pp. 20-22, 2007.
- [8] K. Sutherland, „Air filtration in industry: Gas turbin intake air filtration,“ *Filtration & Separation, Vol. 45, No. 1*, pp. 20-23, 2008.
- [9] R. Loud und A. Slaterpryce, „Gas Turbine Inlet Air Treatment, paper GER-3419A, General Electric Power Generation“.
- [10] R. Kurz und K. Brun, „Fouling Mechanisms in Axial Compressors,“ *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 134*, p. 2012.
- [11] M. Förster und F. Neumann, „Potenziale der Druckkphlenstaubfeuerung und zukünftige alternative Kraftwerksprozesse“. *Fachkongress: Innovative Technologien zur Stromerzeugung, 10.-12. Mai 2004, Berlin*.
- [12] DIN EN ISO 17294-1:2007-02, *Wasserbeschaffenheit - Anwendung der induktiv gekoppelten Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) - Teil 1: Allgemeine Anleitung (ISO 17294-1:2004); Deutsche Fassung EN ISO 17294-1:2006*.
- [13] DIN EN ISO 11885:2009-09, *Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES) (ISO 11885:2007); Deutsche Fassung EN ISO 11885:2009*.
- [14] DIN EN ISO 10304-1:2009-07, *Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von gelösten Anionen mittels Flüssigkeits-Ionenchromatographie - Teil 1: Bestimmung von Bromid, Chlorid, Fluorid, Nitrat, Nitrit, Phosphat und Sulfat (ISO 10304-1:2007); Deutsche Fassung EN ISO 10304-1:2009*.
- [15] F. Immler, *Lidar-Fernerkundung von troposphärischem Ozon und Aerosol in einer urbanen Umgebung*, Berlin, 1999.
- [16] Bayerisches Landesamt für Umwelt, *Feinstaubinhaltsstoffe: Quantifizierung der Anteile von Streusalz und Straßensplitt im PM10/PM2.5*, 2016.
- [17] ISO 12103, *Straßenfahrzeuge - Prüfstaub zur Bewertung von Filtern*.
- [18] DIN 71460, *Straßenfahrzeuge - Luftfilter für Kraftfahrzeuginnenräume*.
- [19] W. C. Hinds, *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, 2 ed., John Wiley & Sons, 1999.

- [20] G. Biskos, A. Malinowski, L. M. Russell, P. R. Buseck und S. T. Martin, „Nanosize Effect on the Deliquescence and the Efflorescence of Sodium Chloride Particles,“ *Aerosol Science and Technology* 40:2, pp. 97-106, 2006.
- [21] D. Gupta, H.-J. Eom, H.-R. Cho und C.-U. Ro, „Hygroscopic behavior of NaCl-MgCl₂ mixture particles as nascent sea-spray aerosol surrogates and observation of efflorescence during humidification,“ *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 15, pp. 11273-11290, 2015.
- [22] M. Langlet, F. Nadaud, M. Benali, I. Pezron und K. Saleh, „Kinetics of Dissolution and Recrystallization of Sodium Chlorid at Controlled Relative Humidity,“ *KONA Powder and Particle Journal*, No. 29, pp. 168-179, 2011.
- [23] B. Noziere, „Don't forget the surface,“ *Science*, Vol. 351, pp. 1396-1397, 2016.
- [24] C. R. Ruehl, J. F. Davies und K. R. Wilson, „An interfacial mechanism for cloud droplet formation on organic aerosols,“ *Science*, Vol. 351, pp. 1447-1450, 2016.
- [25] Y. S. Djikaev, R. Bowles, K. Hämeri, A. Laaksonen, H. Reiss und M. Väkevä, „Theory of Size Dependent Deliquescence of Nanoparticles: Relation to Heterogeneous Nucleation and Comparison with Experiments,“ *the Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 105, No. 32, pp. 7708-7722, 2001.
- [26] F. Schmidt und S. Haep, „Experimentelle Untersuchung der Effizienz von RLT-Filtern als Grundlage für praxisorientierte Prüfmethode sowie für die Weiterentwicklung der Filter durch Modellierung des Filtrationsverhaltens (IGF-Vorhaben 17659 N),“ http://www.veu.de/index.php?article_id=28&clang=0&show=detail&id=479, 2016.
- [27] Seinfeld, J. H. and Pandis, S. N., *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, New York: Wiley, 1997.
- [28] R. C. Brown, *Air Filtration, An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters*, Oxford: Pergamon Press, Ltd., 1993.
- [29] C. Kanaoka, „Performance of an air filter at dust-loaded condition,“ in *Advances in Aerosol Filtration*, K. R. Spurny, Hrsg., Boca Raton, FL, 1998, pp. 323-335.
- [30] D. Thomas, P. Contal, V. Renaudin, P. Penicot, D. Leclerc und J. Vendel, „Modelling Pressure Drop in HEPA Filters During Dynamic Filtration,“ *J. Aerosol Sci.*, pp. 235-246, No. 2 Vol. 30 1999.
- [31] Saleh et al., *3-D microscale simulation of dust-loading in thin flat-sheet filters: A comparison with 1-D macroscale simulations*, Bd. 99, 2013, pp. 284-291.
- [32] A. Joubert, J. Laborde, L. Bouilloux, S. Chazelet und D. Thomas, „Modelling the pressure drop across HEPA filters during cake filtration in the presence of humidity,“ *Chemical Engineering Journal*, Vol. 166, pp. 616-623, 2011.
- [33] J. W. Fitzgerald, „Marine Aerosols: a Review,“ *Atmospheric Environment*, Vol. 25A, No. 3/4, pp. 533-545, 1991.

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4.1-1: Prüfkanal nach DIN EN 779 an der Forschungsstelle 2.....	4
Abbildung 4.1-2: Langjährige Temperatur- und Niederschlagsverläufe am Standort 1	5
Abbildung 4.1-3: F8-Kassettenfilter: Druckverlust und Wirkungsgrad, neu und gebraucht Standort 1	5
Abbildung 4.1-4: Langjährige Temperatur- und Niederschlagsverläufe am Standort 2	6
Abbildung 4.1-5: F8-Kassettenfilter: Druckverlust und Wirkungsgrad, neu und gebraucht Standort 2	6
Abbildung 4.1-6: Langjährige Temperatur- und Niederschlagsverläufe am Standort 3	7
Abbildung 4.1-7: E10-Kassettenfilter: Druckverlust und Wirkungsgrad, neu und gebraucht Standort 3	7
Abbildung 4.2-1: Eluate: neue E10- und F8-Filter / E10- und F8-Filter aus dem Realeinsatz (Standort 3 und 2).....	8
Abbildung 4.2-2: Inhaltsstoffe abgechiedener Partikel im Eluat der F8-Filter (Standort 2).....	9
Abbildung 4.2-3: Inhaltsstoffe abgechiedener Partikel im Eluat der E10-Filter (Standort 3)	10
Abbildung 4.3-1: Schematischer Versuchsaufbau an der Forschungsstelle 1.	11
Abbildung 4.3-2: Schema der Aerosolgeneratoren (AGF und AGK) der Fa. Palas.	12
Abbildung 4.3-3: Funktionsprinzip des RBG (Fa. Palas).....	12
Abbildung 4.3-4: Größenverteilung der verwendeten Aerosole.	13
Abbildung 4.3-5: Schema nach DIN EN 1822-3 und Foto der Prüffilteraufnahme.	14
Abbildung 4.3-6: Messblende zur Überprüfung des Druckverlustes.	14
Abbildung 4.3-7: Druckverlustvergleich der Medienprüfstände.	15
Abbildung 4.3-8: Druckverlust an neuen, unterschiedlichen Filtermedien bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten.....	15
Abbildung 4.3-9: Druckverlust-Anstieg bei zwei cm/s Anströmgeschwindigkeit an NaCl- beladenen Filtermedien bei Variation der Feuchte.....	16
Abbildung 4.3-10: Druckverlust-Anstieg bei acht cm/s Anströmgeschwindigkeit an NaCl- beladenen Filtermedien bei Variation der Feuchte.....	16
Abbildung 4.3-11: Druckverlust-Anstieg bei 20 cm/s Anströmgeschwindigkeit an NaCl- beladenen Filtermedien bei Variation der Feuchte.....	17
Abbildung 4.3-12: Druckverlust-Anstieg an einem E12-Glasfasermedium bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten.....	18
Abbildung 4.3-13: Druckverlust-Anstieg bei zwei cm/s Anströmgeschwindigkeit an MgCl ₂ - beladenen Filtermedien bei Variation der Feuchte.....	19
Abbildung 4.3-14: Druckverlust-Anstieg bei acht cm/s Anströmgeschwindigkeit an A2-beladenen Filtermedien bei Variation der Feuchte.....	19
Abbildung 4.3-15: Druckverlustverlauf des Glasfaser-Mediums bei zwei cm/s.....	20
Abbildung 4.3-16: Druckverlustverlauf des funktionalisierten Glasfaser-Mediums bei 2 cm/s. ...	21
Abbildung 4.3-17: Druckverlustverlauf des Membran-Mediums bei zwei cm/s.	21
Abbildung 4.3-18: Druckverlustverlauf des Glasfaser-Mediums bei acht cm/s.	22
Abbildung 4.3-19: Druckverlustverlauf des funktionalisierten Glasfaser-Mediums bei 8 cm/s. ...	22
Abbildung 4.3-20: Druckverlustverlauf des Membran-Mediums bei acht cm/s.	23
Abbildung 4.3-21: FAG-Vergleich eines E12-Mediums bei einer Anströmgeschwindigkeit von zwei cm/s.....	24
Abbildung 4.3-22: Fraktionsabscheidegrad über der Partikelgröße in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit (Hinds [19]).	25
Abbildung 4.3-23: Fraktionsabscheidegrade eines Glasfasermediums bei unterschiedlichen relativen Feuchten und einer Anströmgeschwindigkeit von zwei cm/s.....	25
Abbildung 4.3-24: Fraktionsabscheidegrade eines Glasfasermediums bei unterschiedlichen relativen Feuchten und einer Anströmgeschwindigkeit von zwei cm/s nach anfänglicher Beladung mit MgCl ₂	26
Abbildung 4.3-25: Fraktionsabscheidegrade eines Glasfasermediums bei unterschiedlichen relativen Feuchten und einer Anströmgeschwindigkeit von acht cm/s.	27

Abbildung 4.3-26: Fraktionsabscheidegrade eines Glasfasermediums bei verschiedenen NaCl-Beladungszuständen.	28
Abbildung 4.3-27: Fraktionsabscheidegrade eines funktionalisierten Glasfasermediums bei verschiedenen NaCl-Beladungszuständen.	28
Abbildung 4.3-28: Fraktionsabscheidegrade eines Membranmediums bei verschiedenen NaCl-Beladungszuständen.	29
Abbildung 4.3-29: Fraktionsabscheidegrade eines Glasfasermediums bei verschiedenen A2-Beladungszuständen.	29
Abbildung 4.3-30: Fraktionsabscheidegrade eines funktionalisierten Glasfasermediums bei verschiedenen A2-Beladungszuständen.	30
Abbildung 4.3-31: Fraktionsabscheidegrade eines Membranmediums bei verschiedenen A2-Beladungszuständen.	30
Abbildung 4.3-32: Fraktionsabscheidegrade verschiedener Medien unbehandelt und nach Isopropanol-Behandlung.	31
Abbildung 4.3-33: Druckverlustanstieg während polydisperser Retentionsmessung bei einer Anströmgeschwindigkeit von 8 cm/s.	32
Abbildung 4.3-34: schematischer 1 nach Umbau für monodisperse Messungen. Versuchsaufbau an der Forschungsstelle.	33
Abbildung 4.3-35: verschiedene Wegstrecken in dem Filterhalter.	34
Abbildung 4.3-36: Einfluss des zweiten Neutralisators auf die Effizienzmessung eines E10-Mediums bei 2 cm/s.	35
Abbildung 4.3-37: Übereinstimmung der CPCs mit Korrekturfaktor bei trockener Luft.	36
Abbildung 4.3-38: Poisson-Verteilung (Auszug aus DIN EN 1822-2 [4]).	37
Abbildung 4.3-39: Darstellung der Messunsicherheit und der Standardabweichung.	38
Abbildung 4.3-40: Grafische Darstellung der Köhler-Kurve.	39
Abbildung 4.3-41: zeitliche Abfolge von ESEM-Aufnahmen des Lösungsvorgangs von NaCl-Partikeln (Quelle: Langlet et al. [22]).	40
Abbildung 4.3-42: Darstellung des 2D-Flächenverhältnisses zerstäubter NaCl- und MgCl ₂ -Partikel als Funktion der relativen Feuchte (oben) und einer Mischung aus NaCl und MgCl ₂ (unten). (Gupta et al. [21]).	42
Abbildung 4.3-43: Fraktionsabscheidegrade eines Glasfasermediums in unterschiedlichen Zuständen.	43
Abbildung 4.3-44: Druckverlust Glasfasermedium in unterschiedlichen Zuständen.	43
Abbildung 4.3-45: Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte (E10-Filter)	45
Abbildung 4.3-46: Fraktionsabscheidegrad bei Variation der rel. Feuchte (E10-Filter)	46
Abbildung 4.3-47: Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte (E11-Filter)	46
Abbildung 4.3-48: Fraktionsabscheidegrad bei Variation der rel. Feuchte (E11-Filter)	47
Abbildung 4.3-49: Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte für einen mit Außenluft beladenen E10-Filter	48
Abbildung 4.3-50: Fraktionsabscheidegrad bei Variation der rel. Feuchte eines mit Außenluft beladenen E10-Filter	48
Abbildung 4.3-51: Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte für einen mit Außenluft beladenen E11-Filter	49
Abbildung 4.3-52: Fraktionsabscheidegrad bei Variation der rel. Feuchte eines mit Außenluft beladenen E11-Filter	49
Abbildung 4.3-53: ASHRAE-Dosierer zur Salz-Beladung	50
Abbildung 4.3-54: Sprühturm zur Erzeugung von NaCl-Partikeln	51
Abbildung 4.3-55: NaCl-Anzahlgrößenverteilung für unterschiedliche Generierungsverfahren.	51
Abbildung 4.3-56: Anzahlgrößenverteilung: natürliches Seesalz-Aerosol [27]	52
Abbildung 4.3-57: Druckverlust: E10-Kassettenfilter (Neuzustand, nach NaCl-Beladung)	52
Abbildung 4.3-58: Fraktionsabscheidegrade: E10-Kassettenfilter (Neuzustand, nach NaCl-Beladung)	53
Abbildung 4.3-59: Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte bei Beladung eines E10-Filters mit NaCl (ASHRAE-Dosierer)	54
Abbildung 4.3-60: Fraktionsabscheidegrad bei Variation der rel. Feuchte eines mit NaCl-	

beladenem E10-Filters (ASHRAE-Dosierer)	54
Abbildung 4.3-61: Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte bei Beladung eines E10-Filters mit NaCl (Sprühturm)	55
Abbildung 4.3-62: Fraktionsabscheidegrad bei Variation der rel. Feuchte eines mit NaCl-beladenem E10-Filters (Sprühturm)	55
Abbildung 4.4-1: erweiterter Prüfaufbau mit Zerstäuber zur Bereitstellung von Wassertröpfchen.	56
Abbildung 4.4-2: normierte Größenverteilung der bereitgestellten Wassertropfen.	56
Abbildung 4.4-3: gedrehter Filterhalter.....	57
Abbildung 4.4-4: Koaleszer-Medien.	57
Abbildung 4.4-5: Mit Atomizer bereitgestellte Tropfenkonzentration und relative Feuchte über der Zeit.	58
Abbildung 4.4-6: Druckverlust zweier Koaleszer-Medien bei Beaufschlagung mit Wassertröpfchen.	58
Abbildung 4.4-7: Retention zweier Koaleszer-Medien bei Beaufschlagung mit Wassertröpfchen.	59
Abbildung 4.4-8: Retention zweier Koaleszer-Medien bei Beaufschlagung mit Wassertröpfchen mittels SMPS gemessen.	59
Abbildung 4.4-9: Anzahlgrößenverteilung der bereitgestellten Wassertropfen	60
Abbildung 4.4-10: Koaleszer (Schaumstoff): Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte bei Beaufschlagung mit Wassertropfen (1 l/h)	61
Abbildung 4.4-11: Koaleszer (Schaumstoff): Fraktionsabscheidegrad bei Beaufschlagung mit Wassertropfen (1 l/h).....	61
Abbildung 4.4-12: Koaleszer (Schaumstoff): Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte bei Beaufschlagung mit Wassertropfen (5 l/h)	62
Abbildung 4.4-13: Koaleszer (Schaumstoff): Fraktionsabscheidegrad bei Beaufschlagung mit Wassertropfen (5 l/h).....	62
Abbildung 4.4-14: Koaleszer (Glasfaser): Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte bei Beaufschlagung mit Wassertropfen (1 l/h)	63
Abbildung 4.4-15: Koaleszer (Glasfaser): Fraktionsabscheidegrad bei Beaufschlagung mit Wassertropfen (1 l/h).....	63
Abbildung 4.4-16: Koaleszer (Glasfaser): Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte bei Beaufschlagung mit Wassertropfen (5 l/h)	64
Abbildung 4.4-17: Koaleszer (Glasfaser): Fraktionsabscheidegrad bei Beaufschlagung mit Wassertropfen (5 l/h).....	64
Abbildung 4.5-1: Fraktionsabscheidegrade eines Glasfaser-Mediums der Filterklasse E12.	65
Abbildung 4.5-2: Fraktionsabscheidegrade eines funktionalisierten Glasfaser-Mediums der Filterklasse E12.	66
Abbildung 4.5-3: Fraktionsabscheidegrade eines Membran-Mediums der Filterklasse E12.	66
Abbildung 4.5-4: Retentionen eines E12-Glasfaser-Mediums bei 5 cm/s Anströmgeschwindigkeit.....	67
Abbildung 4.5-5: Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte bei Wassertropfenbeaufschlagung (E10-Filter).....	68
Abbildung 4.5-6: Fraktionsabscheidegrad bei Wassertropfenbeaufschlagung (E10-Filter)	68
Abbildung 4.5-7: NaCl-Salz vor dem Mahlen.	69
Abbildung 4.5-8: NaCl-Pulver nach Behandlung in der Kugelmühle.....	69
Abbildung 4.5-9: Retentionen eines E12-Glasfaser-Mediums bei Beaufschlagung mit trockenem Salz.....	70
Abbildung 4.5-10: Druckverlust der Messreihen in Abbildung 4.5-9.	70
Abbildung 4.5-11: Retentionen eines funktionalisierten E12-Glasfaser-Mediums bei Beaufschlagung mit trockenem Salz.	71
Abbildung 4.5-12: Druckverlust der Messreihen in Abbildung 4.5-11.	71
Abbildung 4.5-13: Retentionen eines E12-Membran-Mediums bei Beaufschlagung mit trockenem Salz.....	72
Abbildung 4.5-14: Druckverlust der Messreihen in Abbildung 4.5-13.	72

Abbildung 4.5-15: Verlauf von Druckverlust und rel. Feuchte bei NaCl-Beladung und Wassertropfenbeaufschlagung (E10-Filter).....	73
Abbildung 4.5-16: Fraktionsabscheidegrad bei NaCl-Beladung und Wassertropfenbeaufschlagung (E10-Filter).....	73
Abbildung 4.6-1: Fraktionsabscheidegrade eines Glasfaser-Mediums bei einer Anströmgeschwindigkeit von 3,6 cm/s.....	74
Abbildung 4.6-2: Druckverluste zu den Messreihen in Abbildung 4.6-1.....	75
Abbildung 4.6-3: Fraktionsabscheidegrade eines Glasfaser-Mediums bei einer Anströmgeschwindigkeit von 3,6 cm/s.....	75
Abbildung 4.6-4: Druckverluste zu den Messreihen in Abbildung 4.6-3.....	76
Abbildung 4.6-5: Fraktionsabscheidegrade eines Membran-Mediums bei einer Anströmgeschwindigkeit von 3,6 cm/s.	76
Abbildung 4.6-6: Druckverluste zu den Messreihen in Abbildung 4.6-5.....	77
Abbildung 4.6-7: Vergleich des Fraktionsabscheidegrades nach Behandlung im Wasserbad. .	78
Abbildung 4.6-8: Druckverluste zu den Messreihen in Abbildung 4.6-7.....	78
Abbildung 4.7-1: Medien im Neuzustand: links Glasfaser, Mitte funktionalisierte Glasfaser, rechts Membran.....	79
Abbildung 4.7-2: Aufnahme der Membranschicht im unbeladenen Zustand.....	79
Abbildung 4.7-3: NaCl-beladenes Glasfasermedium: links vor Feuchtevariation, Mitte danach, links nach Tropfenbeaufschlagung.....	80
Abbildung 4.7-4: funktionalisiertes Glasfaser-Medium nach NaCl-Beladung: links vor Feuchtevariation, Mitte danach, links nach Tropfenbeaufschlagung.....	80
Abbildung 4.7-5: Membran-Medium mit NaCl-Beladung: links vor Feuchtevariation, Mitte danach, links nach Tropfenbeaufschlagung.	81
Abbildung 4.7-6: herauspräparierte Membranschicht nach NaCl-Beladung: links vor Feuchtevariation, Mitte danach, links nach Tropfenbeaufschlagung.....	81
Abbildung 4.7-7: Glasfaser-Medium mit MgCl ₂ -Beladung: links vor und rechts nach Feuchtevariation.	82
Abbildung 4.7-8: funktionalisiertes Glasfaser-Medium mit MgCl ₂ -Beladung: links vor und rechts nach Feuchtevariation.	82
Abbildung 4.7-9: Membran-Medium mit MgCl ₂ -Beladung: links vor und rechts nach Feuchtevariation.	83
Abbildung 4.7-10: Membranschicht vor (links) und nach Isopropanol-Behandlung (rechts).	83
Abbildung 4.7-11: REM-Aufnahmen eines mit Außenluft beladenen E10-Kassettenfilter (küstennaher Standort, Westeuropa)	84
Abbildung 4.8-1: Vorgehensweise zur Beladungsmodellierung	86
Abbildung 4.8-2: Abscheideeffizienzen für ein zweischichtiges Faservlies	89
Abbildung 4.8-3: Druckverlustzunahme als Funktion der abgeschiedenen Partikelmasse	90
Abbildung 4.8-4: Vergleich Druckverlustberechnungen: eigenes Modell mit Literaturdaten	91
Abbildung 4.9-1: Partikeltrajektorien ($d_p = 0,15 \mu\text{m}$), Faltenhöhe = 150 mm, Faltenbreite = 5 mm	92
Abbildung 4.9-2: Druckverlustzunahme mit zunehmender Beladung ($d_p = 1 \mu\text{m}$, Faltenhöhe = 150 mm, Faltenbreite = 5 mm)	92
Abbildung 4.9-3: Vergleich Druckverlustberechnungen: CFD-Berechnungen mit eigenem Modell und Literaturdaten	93
Abbildung 4.9-4: Vergleich Druckverlustberechnungen: CFD-Berechnungen (trocken, feucht) mit eigenem Modell und Literaturdaten	94
Abbildung 4.10-1: Prüfaufbau nach Wilcox und Poerner [1]	95
Abbildung 4.10-2: Ablauf von Test 6: zyklische Simulation realer Bedingungen.	96

12 Anhang

entfällt