



AiF-Forschungsvereinigung  
„Energie- und Umwelttechnik“

2015

# Innovationsreport

## Industrielle Gemeinschaftsforschung

IGF Forschungsvorhabensnummer: 17659 N

### **Experimentelle Untersuchung der Effizienz von RLT-Filtern als Grundlage für praxisorientierte Prüfmethode(n) sowie für die Weiterentwicklung der Filter durch Modellierung des Filtrationsverhaltens**

Laufzeit: 01.01.2013 – 30.09.2015

#### Beteiligte Forschungsstelle(n):

Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.  
Bereich Luftreinhaltung & Prozessaerosole

Universität Duisburg-Essen  
Lehrstuhl für Nanopartikel-Prozeßtechnologie

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

Bereich Industrielle  
Gemeinschaftsforschung  
[www.iuta.de/igf](http://www.iuta.de/igf)

# Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

***Experimentelle Untersuchung der Effizienz von RLT-Filtern als Grundlage für praxisorientierte Prüfmethode sowie für die Weiterentwicklung der Filter durch Modellierung des Filtrationsverhaltens***

der Forschungsstellen

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

Das IGF-Vorhaben 17659 N der Forschungsvereinigung  
Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. – IUTA wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Duisburg, 15.02.2016

Ort, Datum

Dr.-Ing. Stefan Haep

Name und Unterschrift des Projektleiters  
an der Forschungsstelle 1

Duisburg, 12.02.2016

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. Frank Schmidt

Name und Unterschrift des Projektleiters  
an der Forschungsstelle 2

## Inhaltsverzeichnis

1	Forschungsthema .....	3
2	Zusammenfassung.....	3
3	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung .....	4
3.1	Ausgangssituation .....	4
3.2	Problemstellung.....	4
4	Forschungsziel / Lösungsweg / Ergebnisse .....	5
4.1	Bestimmung der Anfangsfiltereffizienzen nach EN 779 sowie der Minimaleffizienzen am Medium.....	7
4.2	Bestimmung der Minimaleffizienz mithilfe von Isopropanolnebel bzw. -dampf am Filtermedium .....	14
4.3	Beladung mit Ruß und Bestimmung der DEHS-Effizienz am Normprüf- stand nach EN 779 .....	16
4.4	Untersuchung weiterer alternativer Entladungsmethoden (Klimawechsel- test, Tensidlösung) am Filtermedium.....	20
4.5	Beladung von RLT-Filtern mit Außenluft sowie mit Umluft im Realbetrieb von Lüftungsanlagen und Bestimmung der Effizienz .....	22
4.6	Bestimmung der Effizienz an in Lüftungsanlagen eingebauten RLT- Filtern mit Außenluft.....	27
4.7	Bestimmung von Effizienz und Druckverlust an beladenen RLT-Filtern am Normprüfstand bei konstanter Temperatur und Luftfeuchten zwischen 70 % und 90 %.....	33
4.8	Beladung von RLT-Filtern mit ASHRAE-Staub und A2 am Normprüf- stand und Bestimmung der Effizienz .....	38
4.9	Bewertung der unterschiedlichen Neutralisierungs- und Beladungsmethoden.....	42
4.10	Begleitende Modellierung zur Änderung von Druckverlust und Filter- effizienz mit zunehmender Beladung an Tiefenfiltern .....	57
4.11	Theoretische Untersuchungen zum Einfluss plissierter Strukturen auf das Strömungsfeld und den Druckverlust bei RLT-Filtern.....	69
5	Fazit .....	98
6	Gegenüberstellung von Projektziel und erreichten Ergebnissen .....	100
7	Erzielter wirtschaftlicher und wissenschaftlich-technischer Nutzen.....	102
8	Darstellung der Verwendung der Zuwendung unter besonderer Berück- sichtigung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	102
9	Fortgeschriebener, aktualisierter Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	104
10	Literatur.....	106

## **1 Forschungsthema**

**Experimentelle Untersuchung der Effizienz von RLT-Filtern als Grundlage für praxisorientierte Prüfmethode sowie für die Weiterentwicklung der Filter durch Modellierung des Filtrationsverhaltens**

## **2 Zusammenfassung**

Hauptziel des Projektes war es, Vorschläge für eine Prüfprozedur für Filter der allgemeinen Raumluftechnik zu entwickeln, die die Leistungskenngrößen der Filter im Realbetrieb besser abbildet als es bei der Prüfung gemäß der aktualisierten DIN EN 779 der Fall ist.

Zu diesem Zweck wurden Taschenfilter aus Synthetikfasern sowie Taschen- und Kassettenfilter aus Glasfasern in unterschiedlichen Lüftungsanlagen eingesetzt, turnusmäßig ausgebaut und im Labor normkonform geprüft. Die Effizienz und der Druckverlust dieser im Realbetrieb gealterten Filter wurden mit den Daten der normkonformen Prüfung verglichen. Die dabei vorgesehene Beladung der Filter mit ASHRAE-Staub führte zu einer deutlichen Überbewertung der Effizienz im Vergleich zum Realbetrieb. Auch der Druckverlust stieg bei gleichen Staubmassen stärker an als bei den Filtern aus den Lüftungsanlagen. Bei einer alternativen Beladung mit A2-Staub ergab sich in der Regel eine gute Übereinstimmung mit der Druckverluständerung im Realbetrieb. Die Veränderung der Abscheideeffizienz führte gegenüber dem Realbetrieb zwar meist auch zur Überbewertung, die Diskrepanz war allerdings geringer als beim ASHRAE-Staub. Im Falle von Elektretfiltern nahm die Effizienz bei der A2-Beladung anders als im Realbetrieb nicht ab. Bei Elektretfiltern ist es sinnvoll, die A2-Beladung am vorher elektrisch neutralisierten Filter vorzunehmen. Eine Beaufschlagung mit Ruß stellt eine Alternative zur Isopropanolbehandlung dar, um die nachlassende Elektretwirkung bei Realeinsatz abzubilden.

Die experimentellen Arbeiten wurden durch die Modellierung relevanter Transportprozesse ergänzt. Die Ergebnisse der Simulationen zeigten u. a. bis in welche Tiefe unterschiedliche Partikeldurchmesser ins Filtervlies dringen.

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse können durch den Projektleiter der FS 2 unmittelbar in das entsprechende Normungsgremium eingebracht 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**

Partikelfilter für die allgemeine Raumluftechnik (RLT-Filter) sind aktuell nach DIN EN 779:2012 (deutsche Fassung der EN 779:2012) zu prüfen. Die mit dieser überarbeiteten Fassung der Norm eingeführten zusätzlichen Kriterien zur Klassierung von Filtern der Filterklassen F7 bis F9 auf Basis der Bestimmung des Mindestwirkungsgrades, hat erneut eine Diskussion über die Praxisrelevanz bzw. Verwertbarkeit der im Labor ermittelten Wirkungsgrade von Filtern entfacht. Bei den Prüfungen nach Norm handelt es sich lediglich um vergleichende Messungen und die ermittelten Filtrationscharakteristiken sind deshalb nur bedingt zur quantitativen Vorhersage für den Einsatz im realen Betrieb geeignet. Die Übertragbarkeit der im Labor ermittelten Daten von Filtern auf den Realbetrieb ist nur sehr eingeschränkt möglich, da sich bspw. die eingesetzten Prüfaerosole hinsichtlich Partikelform, -material und Ladungszustand erheblich von den tatsächlichen Luftverunreinigungen unterscheiden.

#### **3.2 Problemstellung**

Primäres Ziel von Filterprüfungen nach Norm ist die Qualifizierung und Charakterisierung der Filter unter vergleichbaren, d. h. reproduzierbaren Bedingungen. Inwiefern die Prüfergebnisse dabei auch das Abscheidevermögen und den Druckverlust der Filter im Realbetrieb adäquat abbilden, muss kritisch hinterfragt werden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden RLT-Filter aus Synthetik- und Glasfasermaterialien in unterschiedlichen Lüftungsanlagen eingebaut und in regelmäßigen Abständen den Anlagen entnommen. Diese im Realbetrieb über 3 bis 21 Monate gealterten Filter wurden dann in einem normkonformen Prüfstand (Abb. 3.1) einer DEHS-Effizienzmessung bei definierten konstanten Randbedingungen von Feuchte und Temperatur unterzogen. Druckverluste und Wirkungsgrade wurden ermittelt, mit Werten im Neuzustand verglichen und den Ergebnissen der RLT-Filterprüfung nach DIN EN 779:2012 gegenübergestellt.

Im Rahmen von globalen Harmonisierungsbestrebungen wird die EN 779 künftig durch einen im Entwurf befindlichen internationalen Standard (ISO 16890) abgelöst werden. Das in diesem Entwurf vorgesehene, neue Konzept für die Klassierung der Filter repräsentiert die Bemühungen, die im realen Betrieb zu erwartenden Filtrationseigenschaften zumindest besser abzubilden als bisher. Die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes werden nicht nur vor dem Hintergrund der aktuell gültigen

EN 779 interpretiert, sondern auch im Abgleich mit den künftigen Vorgaben der ISO 16890.



**Abb. 3.1: Normprüfstand nach EN 779 an der Forschungsstelle 1**

#### **4 Forschungsziel / Lösungsweg / Ergebnisse**

Ziel des Forschungsvorhabens war es, eine praxisnähere und damit aussagekräftigere Prüfmethode für RLT-Filter zu entwickeln. Dabei wurden auch unterschiedliche Verfahren zur Alterung bzw. Entladung der Filter bewertet. Ziel der Modellierung war es, ein verbessertes Verständnis für die Mechanismen während des Beladungsprozesses zu gewinnen.

Des Weiteren wurden die Effizienzen an in Lüftungsanlagen eingebauten RLT-Filtern mit Außenluft in Anlehnung an DIN EN ISO 29462 bestimmt. Hierbei erfolgte die roh- und reingasseitig Messung der Größen- und Anzahlverteilung mit einem Fast Mobility Particle Sizer (FMPS).

Die in der DIN EN 779:2012 angegebene Methode der Entladung mit Isopropanol wurde mit anderen Behandlungsmethoden (Tenside und Ruß) verglichen.

#### **Prüfungsablauf nach DIN EN 779 für Feinstaubfilter**

- Bestimmung der Anfangsdruckdifferenz als Funktion des Volumenstroms
- Bestimmung des DEHS-Anfangsfraktionsabscheidegrads
- Bestimmung des DEHS-Fraktionsabscheidegrads bei unterschiedlichen Beladungsstufen mit ASHRAE-Staub (30 g, ... ) bis zur Prüfenddruckdifferenz von 450 Pa

- Ermittlung des mittleren Wirkungsgrads bei ASHRAE-Beladung für 0,4 µm-DEHS-Partikel als Klassifizierungskriterium
- Ermittlung des Mindestwirkungsgrads für 0,4 µm-DEHS-Partikel als zusätzliches Klassifizierungskriterium für die Filterklassen F7 bis F9 (Test an Medienproben nach Isopropanolbehandlung) nach DIN EN 779:2012

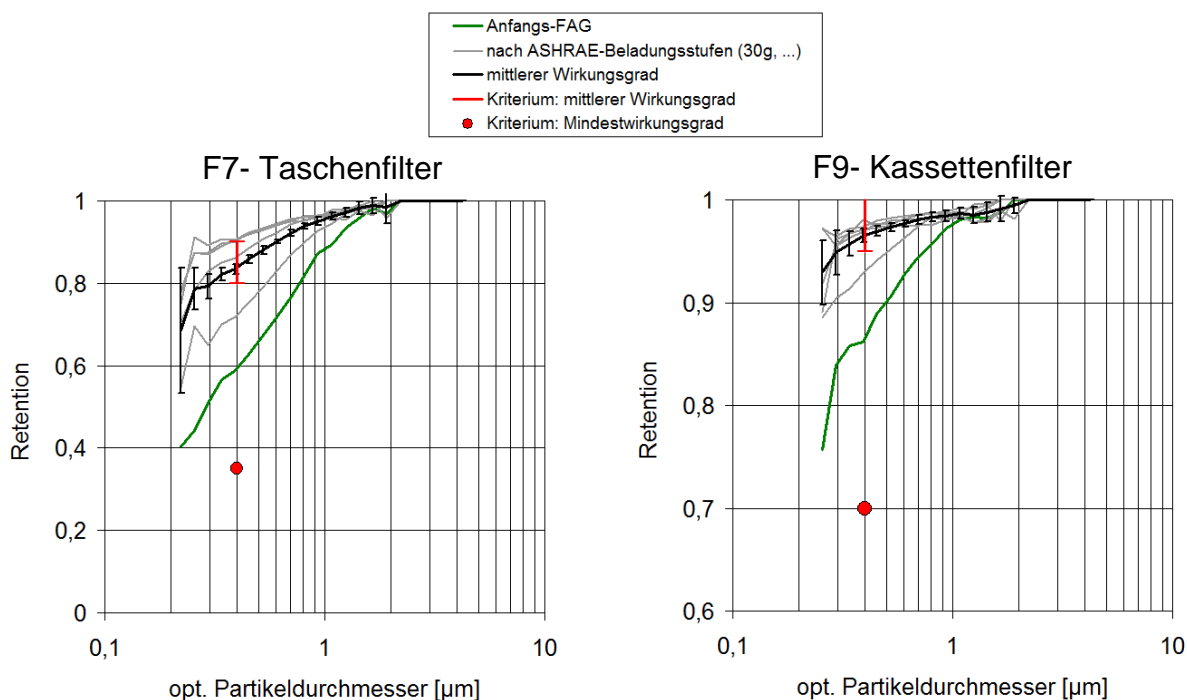
Tab. 1: Klassifizierung von Luftfiltern nach DIN EN 779:2012

Gruppe	Filter-klasse	Prüfend- druck- differenz  Pa	Mittlerer Abscheidegrad ( $A_m$ ) des synthetischen Prüfstaubes  %	Mittlerer Wirkungsgrad ( $E_m$ ) bei Partikeln von 0,4 µm  %	Mindest- Wirkungsgrad <sup>a</sup> bei Partikeln von 0,4 µm  %
Grob	G1	250	$50 \leq A_m < 65$	-	-
	G2	250	$65 \leq A_m < 80$	-	-
	G3	250	$80 \leq A_m < 90$	-	-
	G4	250	$90 \leq A_m$	-	-
Medium	M5	450	-	$40 \leq E_m < 60$	-
	M6	450	-	$60 \leq E_m < 80$	-
Fein	F7	450	-	$80 \leq E_m < 90$	35
	F8	450	-	$90 \leq E_m < 95$	55
	F9	450	-	$95 \leq E_m$	70

<sup>a</sup> Der Mindest-Wirkungsgrad ist der niedrigste Wirkungsgrad, ermittelt aus dem Wirkungsgrad am elektrostatisch neutralisierten Filtermedium, dem Anfangswirkungsgrad und dem niedrigsten Wirkungsgrad, der während des Beladungsvorgangs gemessen wird.

Rot: Neuerungen in der novellierten Fassung von 2012.

Abb. 4.1 zeigt anhand zweier Beispiele die typische Entwicklung des Fraktionsabscheidegrades (Retention) bei zunehmender Beladung mit ASHRAE-Prüfstaub. Beide Filter erfüllen das Kriterium des mittleren Wirkungsgrades. Hinsichtlich des Kriteriums des Mindestwirkungsgrades ist festzustellen, dass der Anfangswirkungsgrad an den konfektionierten Filtern gleichsam auch der niedrigste Wirkungsgrad im Rahmen der dann erfolgten Beladung mit ASHRAE-Staub ist. Zur Vervollständigung der vorgegebenen Prüfprozedur ist noch zu belegen, dass der Anfangswirkungsgrad an unbehandelten Proben des Filtermediums mit demjenigen am konfektionierten Filter übereinstimmt und dass der Wirkungsgrad an den mit Isopropanol behandelten Medienproben bei 0,4 µm dem Klassierungskriterium genügt.



**Abb. 4.1: Klassifizierungskriterien: mittlerer Wirkungsgrad und Mindestwirkungsgrad**

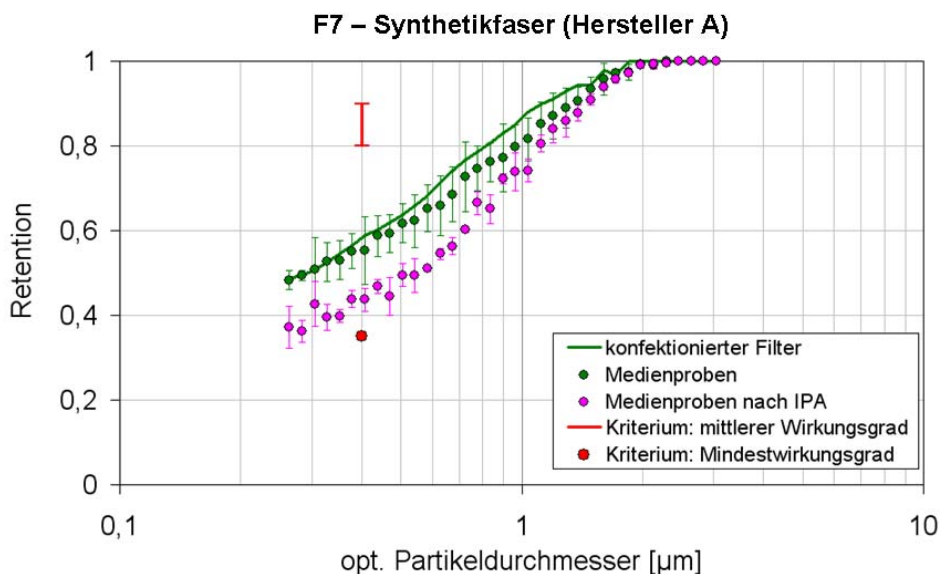
#### 4.1 Bestimmung der Anfangsfiltereffizienzen nach EN 779 sowie der Minmaleffizienzen am Medium

Um den Beitrag der elektrostatischen Abscheidung am Gesamtwirkungsgrad erkennen zu können, wird der Fraktionsabscheidegrad eines neuen, unbehandelten und eines entladenen Filtermediums verglichen. Zur Entladung werden die Medienproben in Isopropanol (IPA) getaucht und getrocknet.

In Abb. 4.2 wird der Fraktionsabscheidegrad eines Mediums mit dem des konfektionierten Filters aus Synthetikfasern verglichen. Im Neuzustand weisen Filter und Medienprobe bei gleicher Anströmgeschwindigkeit eine gute Übereinstimmung auf. Die Annahme, dass die Ergebnisse an den elektrostatisch neutralisierten Medienproben auf die konfektionierten Filter übertragen werden können, erscheint gerechtfertigt.

Nach der Behandlung der Medienproben mit IPA zeigt sich eine erkennbare Verringerung der Retention. Das Synthetikmaterial wird durch das IPA-Bad entladen und verliert seine Elektret Eigenschaften. Eine Abscheidung aufgrund elektrophoretischen Transports ist unterbunden. Das Kriterium des Mindestwirkungsgrades von 35 % für 0,4 µm Partikel wird erfüllt.

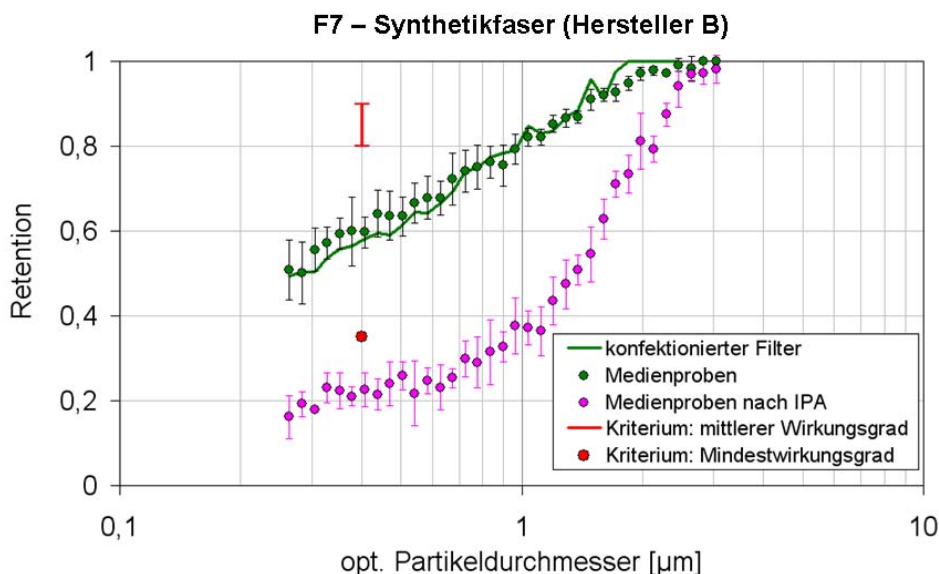




**Abb. 4.2: Konfektionierter Filter und Medienprobe (unbehandelt) / Medienprobe (IPA-behandelt), Hersteller A**

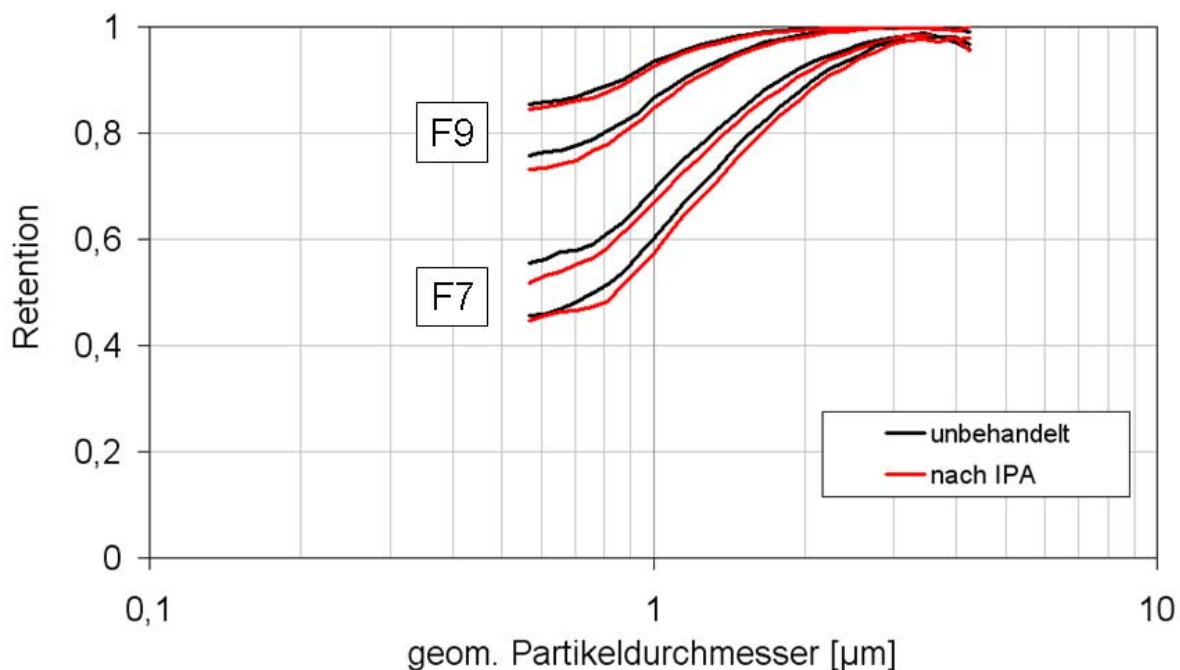
In Abb. 4.3 sind die Ergebnisse der Messungen an Medienproben und am konfektionierten Elektretfilter eines anderen Herstellers dargestellt.

Die Anfangswirkungsgrade des konfektionierten Filters und der Medienproben sind wieder vergleichbar. Nach der Behandlung mit IPA weisen die Medienproben jedoch einen deutlich schlechteren Wirkungsgrad auf. Nach der aktuell gültigen DIN EN 779:2012, wäre dieser Filter nicht mehr als F7 einzustufen. Das Herstellungsdatum des Filters ist allerdings vor Inkrafttreten der Novellierung der Richtlinie.



**Abb. 4.3: Konfektionierter Filter und Medienprobe (unbehandelt) / Medienprobe (IPA-behandelt), Hersteller B**

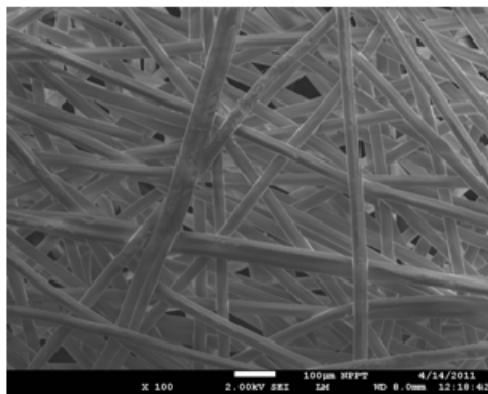
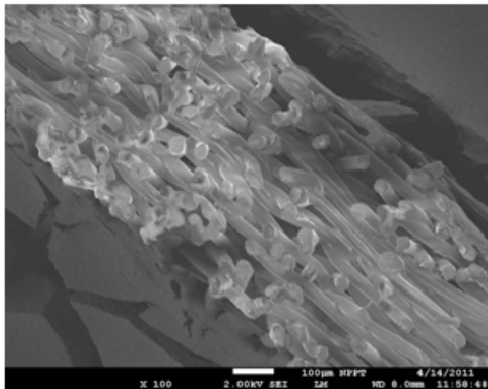
Die DEHS-Fraktionsabscheidegrade vor und nach einer IPA-Behandlung für einige Medienproben aus Glasfasermaterial werden in Abb. 4.4 gezeigt. Für die zwei Filterklassen F7 und F9 wurden Medienproben von jeweils zwei unterschiedlichen Herstellern untersucht. Man erkennt, dass die IPA-Behandlung nur einen geringen, nahezu vernachlässigbaren Einfluss auf die Retention hat.



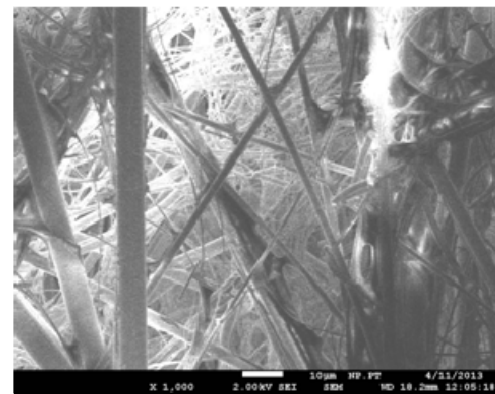
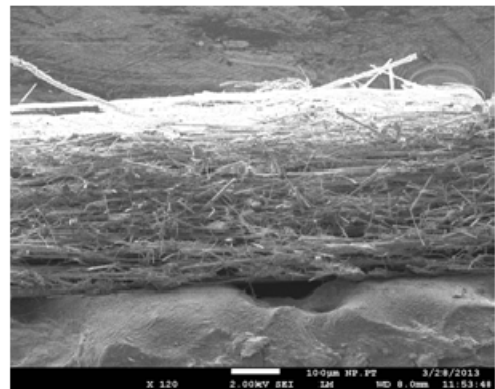
**Abb. 4.4: DEHS-Fraktionsabscheidegrade an Glasfasermedien (unbehandelt / IPA-behandelt)**

Um zu kontrollieren, ob die IPA-Behandlung neben dem erwünschten Entfernen der elektrostatischen Ladungen auch zu einer unerwünschten strukturellen Veränderung der Filtervliese führt, wurden Synthetik- und Glasfaser-Medien rasterelektronenmikroskopisch untersucht. In Abb. 4.5 werden exemplarische REM-Aufnahmen von Filtervliesen im Schnitt und in der Draufsicht gezeigt. Da es kaum möglich ist, den identischen Bildausschnitt vor und nach einer IPA-Behandlung zu betrachten, lässt es sich letztlich nicht einwandfrei beurteilen, ob es zu einer strukturellen Änderung der Fasern bzw. der Faseroberflächen kommt. In der vergleichenden Beurteilung unterschiedlicher Bildausschnitte konnten jedenfalls keine strukturellen Veränderungen aufgrund der IPA-Behandlung festgestellt werden. Es ist daher eher nicht anzunehmen, dass sich durch die IPA-Behandlung die strömungsdynamischen Bedingungen mit entsprechender Auswirkung auf die mechanischen Abscheidebeiträge verändern.

### Synthetikfaser-Medium



### Glasfaser-Medium

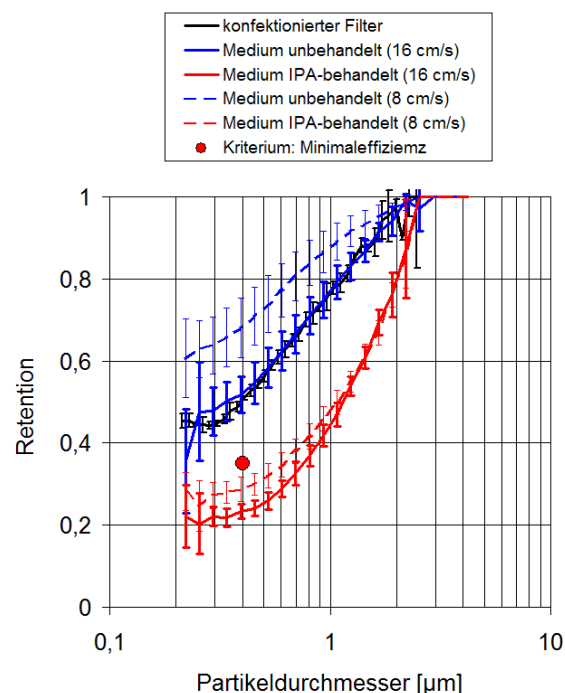


**Abb. 4.5: REM-Aufnahmen Synthetikfaser-Medium und Glasfaser-Medium**

In Abb. 4.6 bis Abb. 4.9 werden Fraktionsabscheidegrade für vier Filtertypen (bzw. für entsprechende Medienproben) gezeigt, die im Rahmen des Projektes auch über längere Zeiträume in unterschiedlichen Lüftungsanlagen eingesetzt worden und hinsichtlich ihres Verhaltens bei Beladung mit ASHRAE- und A2-Staub sowie mit Ruß untersucht worden sind.

In Abb. 4.6 werden Ergebnisse für einen F7-Taschenfilter aus Synthetikfasermaterial mit einer Elektretwirkung bzw. für die entsprechender Medienproben gezeigt. Entsprechend den Vorgaben der EN 779 wurden die Messungen an den Medienproben nicht nur bei der sich aus dem Nominalvolumenstrom für den konfektionierten Filter mit der realisierten Filterfläche ergebenden nominalen Filtermediumsgeschwindigkeit, sondern auch mit der halben Filtermediumsgeschwindigkeit durchgeführt. Der Fraktionsabscheidegrad für den konfektionierten Filter (schwarze Kurve) beruht auf einer Mittelwertbildung über das Ergebnis an vier Filtern. Die Fraktionsabscheidegrade für die Medienproben basieren auf einer Mittelwertbildung über Messdaten an acht Ronden mit jeweils einer Fläche von 100 cm<sup>2</sup>. Damit wird eine größere Anzahl an Medienproben bzw. eine größere Gesamtfläche zugrunde gelegt als in der

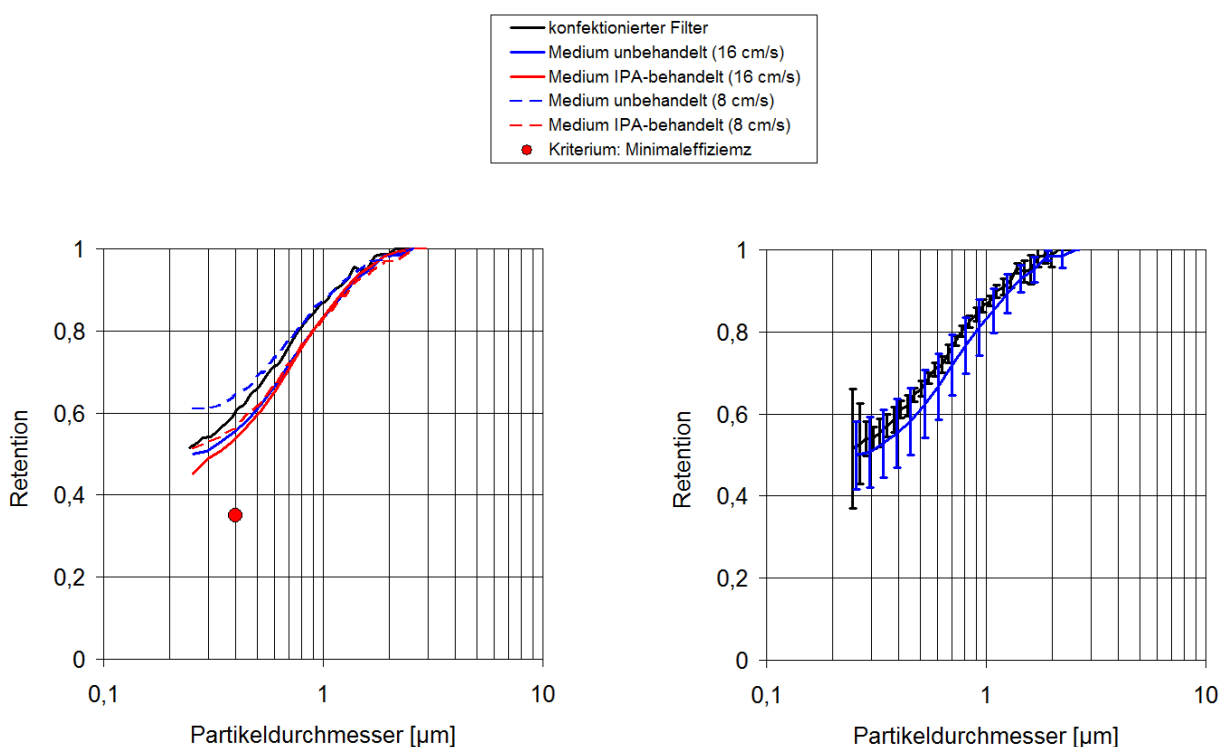
Norm gefordert (min. 3 Proben, min. 600 cm<sup>2</sup>). Das Ergebnis für das unbehandelte Medium bei nominaler Filtermediumsgeschwindigkeit (16 cm/s, blaue durchgezogene Kurve) stimmt gut mit demjenigen für die konfektionierten Filter überein. Wie bereits bei den vorher gezeigten Fallbeispielen für Synthetikfaserfilter mit einer Elektretwirkung, liegt auch in diesem Fall die Retention nach der IPA-Behandlung auf einem deutlich geringeren Niveau. Die Retention liegt unter dem Minimaleffizienz-Kriterium nach EN 779 für einen F7-Filter. Der getestete Synthetikfaserfilter entspricht dieser Filterklasse also eigentlich nicht. Doch auch in diesem Fall lag das Produktionsdatum der Filter vor Inkrafttreten der Novellierung. Das Ergebnis für die unbehandelten Medienproben bei halber Filtermediumsgeschwindigkeit (8 cm/s, blaue gestrichelte Kurve) liegt erwartungsgemäß auf einem höhern Niveau als bei nominaler Geschwindigkeit. Der verweilzeitabhängige elektrophoretische Abscheidebeitrag ist hier stärker ausgeprägt. Aber auch im Vergleich der Kurven für die IPA-behandelten Medienproben lässt sich erkennen, dass für Partikeldurchmesser < 1 µm im Falle der halben Geschwindigkeit eine bessere Retention vorliegt. In diesem Partikeldurchmesserbereich wirkt sich eine verweilzeitbedingt bessere Abscheidung aufgrund von Diffusion aus.



**Abb. 4.6: Konfektionierter Filter und Medienproben (unbehandelt) / Medienprobe (IPA-behandelt), F7, Synthetikfaser mit Elektretwirkung**

In Abb. 4.7 werden Ergebnisse für einen F7-Taschenfilter aus Glasfasern bzw. entsprechende Medienproben gezeigt. Im linken Diagramm wurde aus Gründen der

Anschaulichkeit auf die Darstellung von Fehlerbalken verzichtet. Im rechten Diagramm mit Fehlerbalken erkennt man, dass die Streuung der Ergebnisse an den acht unbehandelten Proben relativ groß ist. Eine passable Übereinstimmung mit dem Ergebnis am konfektionierten Filter ist aber gegeben. Die Unterschiede der Kurven bei den Fallunterscheidungen im rechten Diagramm fallen gegenüber der gezeigten Streuung der Ergebnisse an den Medien kaum ins Gewicht. Wie bereits zuvor gezeigt, ist nach IPA-Behandlung bei Glasfasermedien eine geringfügig schlechtere Retention zu erkennen. Reduziert man die Anströmgeschwindigkeit auf die Hälfte, dann treten die verweilzeitabhängigen Effekte stärker hervor.



**Abb. 4.7: Konfektionierter Filter und Medienproben (unbehandelt) / Medienprobe (IPA-behandelt), F7, Glasfaser**

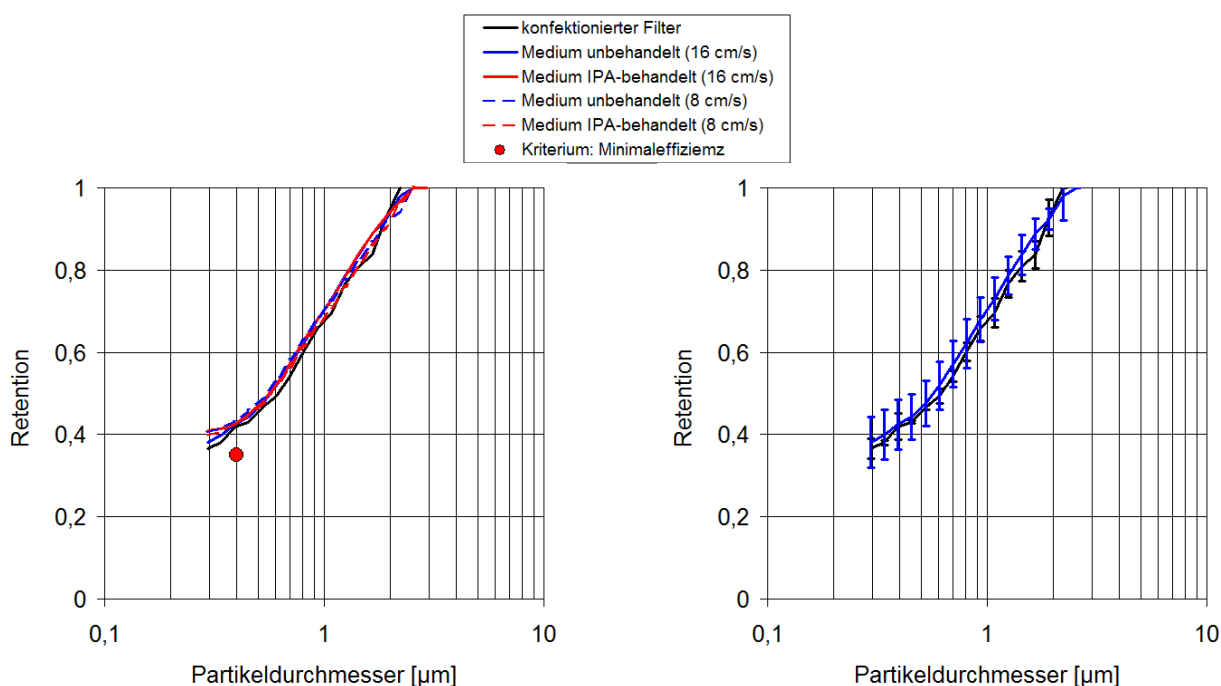
Für einen F7-Taschenfilter-Typ bzw. die Medienproben aus Synthetikfasermaterial ohne Elektretwirkung sind die Ergebnisse in den Diagrammen der Abb. 4.8 aufgetragen. Das Filtermedium hat einen mehrschichtigen Aufbau mit einer Feinstfaser-schicht, deren Faserdurchmesser bei ca. 1 µm liegt.

Im rechten Diagramm erkennt man, dass der Fraktionsabscheidegrad der unbehandelten Medienproben mit dem des konfektionierten Filters korrespondiert.

Im linken Diagramm ergeben sich für die Versuche am unbehandelten und IPA-behandelten sowie die Versuche bei nominaler und halber Mediengeschwindigkeit,

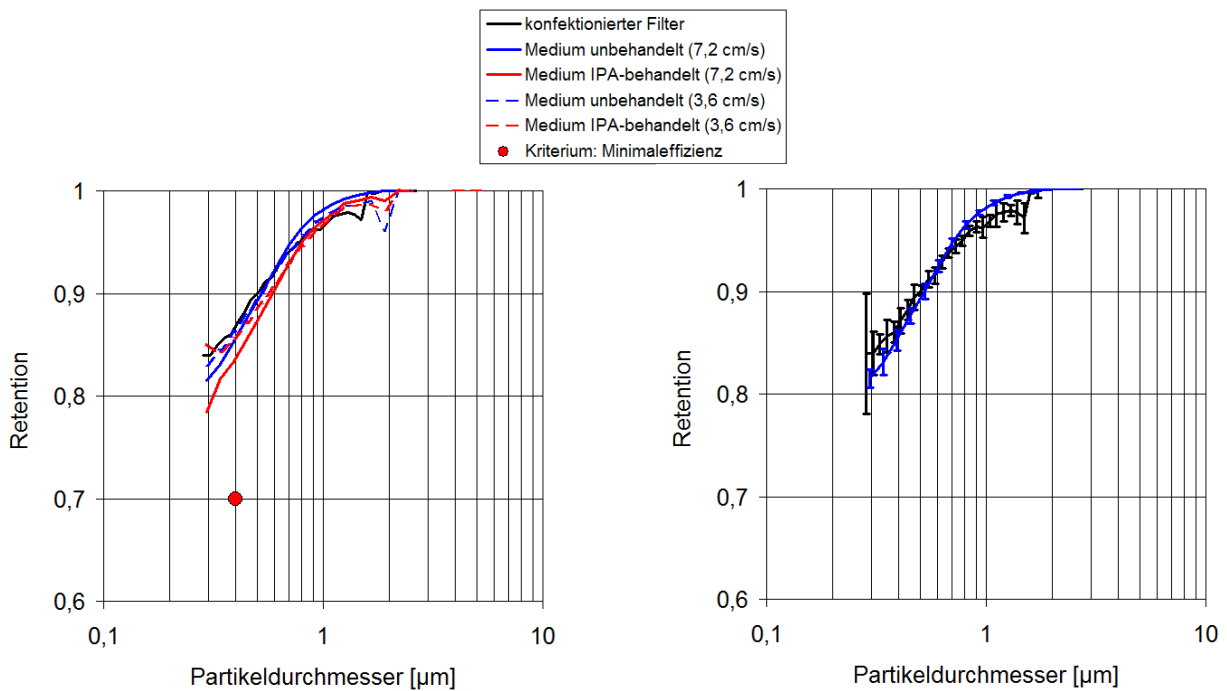
keine erkennbaren Unterschiede. Im betrachteten Partikeldurchmesserbereich liegen offensichtlich keine verweilzeitabhängigen Effekte vor. Die Abscheidung bei diesem Filtermedium in diesem Partikeldurchmesserbereich ergibt sich ausschließlich aufgrund der verweilzeitunabhängigen Interzeption.

Der Wert der Retention für die konfektionierten Filter bei dem Partikeldurchmesser von  $0,4 \mu\text{m}$  liegt bei ca. 0,4 und ist für das IPA-behandelte Medium auf gleichem Niveau. Das Kriterium der Norm hinsichtlich der Minimaleffizienz ist also erfüllt.



**Abb. 4.8: Konfektionierter Filter und Medienproben (unbehandelt) / Medienprobe (IPA-behandelt), F7, Synthetikfaser ohne Elektretwirkung**

In Abb. 4.9 werden die Ergebnisse für einen F9-Glasfaser-Kassettenfilter-Typ bzw. die zugehörigen Medienproben präsentiert. Der Fraktionsabscheidegrad der unbehandelten Medien stimmt gut mit demjenigen der Kassettenfilter überein. Nach IPA-Behandlung liegen die Kurven geringfügig unter denen ohne Behandlung. Bei halber Filtermediengeschwindigkeit ( $3,6 \text{ cm/s}$ ) statt nominaler ( $7,2 \text{ cm/s}$ ) liegen die Kurven marginal höher. Eine Verweilzeitabhängigkeit ist nur in sehr geringem Maße vorhanden. Die Abscheidung in dem betrachteten Partikeldurchmesserbereich ist interzeptionsdominiert.



**Abb. 4.9: Konfektionierter Filter und Medienproben (unbehandelt) / Medienprobe (IPA-behandelt), F9, Glasfaser**

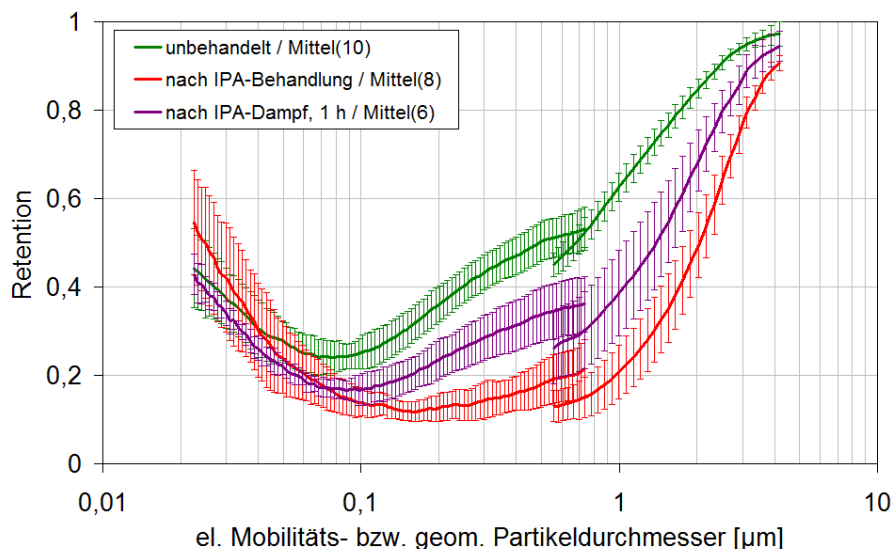
#### 4.2 Bestimmung der Minimaleffizienz mithilfe von Isopropanolnebel bzw. -dampf am Filtermedium

Dass das Eintauchen von Medienproben in ein Isopropanolbad mit anschließender Trocknung zu einer vollständigen elektrischen Neutralisierung von Elektretmedien führt, ist allgemein anerkannt. Die EN 779 sieht hierbei eine mindestens zwei-minütige Einwirkungsdauer des Isopropanols und eine 24-stündige Trocknungszeit vor. Die Trocknungszeit muss verlängert werden, falls die Masse der Probe vom Ausgangsniveau signifikant abweicht. Hinsichtlich der Einwirkung des Isopropanols muss für die erfolgreiche Neutralisierung sichergestellt sein, dass sämtliche Fasern des Vlieses eine Flüssigkeitsbenetzung erfahren haben. Bei der in der Norm vorgesehenen Dauer von zwei Minuten sind die Filtervliese auch in der Tiefe mit IPA getränkt und somit alle Fasern benetzt. Bei Versuchen, bei denen Filtermedien statt sie in ein IPA-Bad zu tauchen mit IPA-Tröpfchen beaufschlagt und anschließend mit Durchströmung in einem Prüfkanal getrocknet wurden, hat sich gezeigt, dass ebenfalls eine komplette elektrische Neutralisierung zu erzielen ist. Hierbei kommt es auf die Beaufschlagungsdauer respektive die Beaufschlagungsmenge an. Da diese aber je nach Medium und Benetzungsverhalten unterschiedlich sein können, stellt die Exposition mit IPA-Nebel keine adäquate Alternative zum IPA-Bad dar.

Die elektrische Neutralisierung eines konfektionierten Filters durch Eintauchen in ein IPA-Bad ist zwar vom Grundsatz her durchführbar, für eine Filterprüfung aber nicht praktikabel. Wie im vorigen Abschnitt aufgezeigt wurde, erscheint die Annahme, dass die Ergebnisse an den Medienproben nach IPA-Behandlung repräsentativ für den gesamten konfektionierten Filter sind, gerechtfertigt. Hierbei muss allerdings sichergestellt sein, dass die effektive Filterfläche des Filters und somit die nominale Filtermediengeschwindigkeit korrekt quantifiziert wird.

In Fachkreisen besteht dennoch das Bestreben, die Filtereffizienz nach elektrischer Neutralisierung am kompletten Filterelement zu ermitteln. Hierzu wurden in der Vergangenheit unterschiedliche Methoden diskutiert. Neben einer Exposition des gesamten Filterelements mit gesättigtem IPA-Dampf wurde auch das Aussetzen der Filter mit Luft bei höheren Temperaturen und Luftfeuchten angedacht (siehe hierzu Abschnitt 4.4). Im Rahmen dieses Projektes stand keine Kammer zur Exposition der Filter mit IPA-Dampf zur Verfügung und es war (nicht zuletzt aus Gründen des Explosionsschutzes) auch nicht möglich, eine solche mit vertretbarem Aufwand anzufertigen und zu betreiben. Daher wurden exemplarisch Versuche angestellt, bei denen in einen vorhandenen Kfz-Innenraumfilterprüfstand bei Durchströmung von Filtermedienproben IPA-Dampf zudosiert wurde. Um das Risiko eines zündfähigen Gemisches zu unterbinden, wurden lediglich IPA-Mengen zudosiert, die zu einer Konzentration deutlich unterhalb der Sättigung führten. Der Fraktionsabscheidegrad nach einer einstündigen Exposition mit IPA-Dampf wird in Abb. 4.10 denjenigen am unbehandelten Medium und nach IPA-Bad gegenübergestellt. Für diesen Versuch wurde bewusst ein Medium ausgewählt, welches nach elektrischer Neutralisierung über eine schlechte Abscheideeffizienz verfügt und eine passable Retention erst durch den elektrophoretischen Abscheidebeitrag erhält. Bei diesem Medium, welches eher im Bereich der Filterklassen M5-M6 angesiedelt ist, stellen sich die Unterschiede in den Fallunterscheidungen ausgeprägter dar. Neben einem optischen Aerosolspektrometer kam, um auch den Bereich der submikronen Partikel zu erfassen, ein SMPS-System zum Einsatz. Zwecks besserer Vergleichbarkeit der Äquivalentdurchmesser wurde der Partikeldurchmesser des optischen Aerosolspektrometers auf den geometrischen umgerechnet. Durch die IPA-Dampf-Exposition hat die Elektretwirkung gegenüber dem Fall des unbehandelten Mediums offensichtlich schon nachgelassen. Eine vollständige elektrische Neutralisierung konnte mit den realisierten Prozessbedingungen bei einer einstündigen Durchströmung noch nicht erreicht werden.





**Abb. 4.10: Fraktionsabscheidegrad an einem Elektretmedium nach Exposition mit IPA-Dampf, im Vergleich zum unbehandelten Zustand des Mediums und zum Zustand nach IPA-Bad**

Die für die Prüfung von RLT-Filtern aktuell noch gültige EN 779:2012 wird, wie bereits erwähnt, künftig durch den bisher noch im Entwurf befindlichen Standard ISO 16890 abgelöst werden. Hinsichtlich der Prüfung von Filterelementen nach elektrischer Neutralisierung ist in diesem Entwurf eine Kammer vorgesehen, in der die Filter über vier Stunden einem gesättigten IPA-Dampf ausgesetzt werden sollen. Sicherheitsrelevante Aspekte im Rahmen des Explosionsschutzes sind bisher nicht berücksichtigt. Ob die Expositionsdauer mit IPA-Dampf ausreicht, um jegliche unterschiedliche Medien vollständig zu neutralisieren, bedarf einer kritischen Überprüfung.

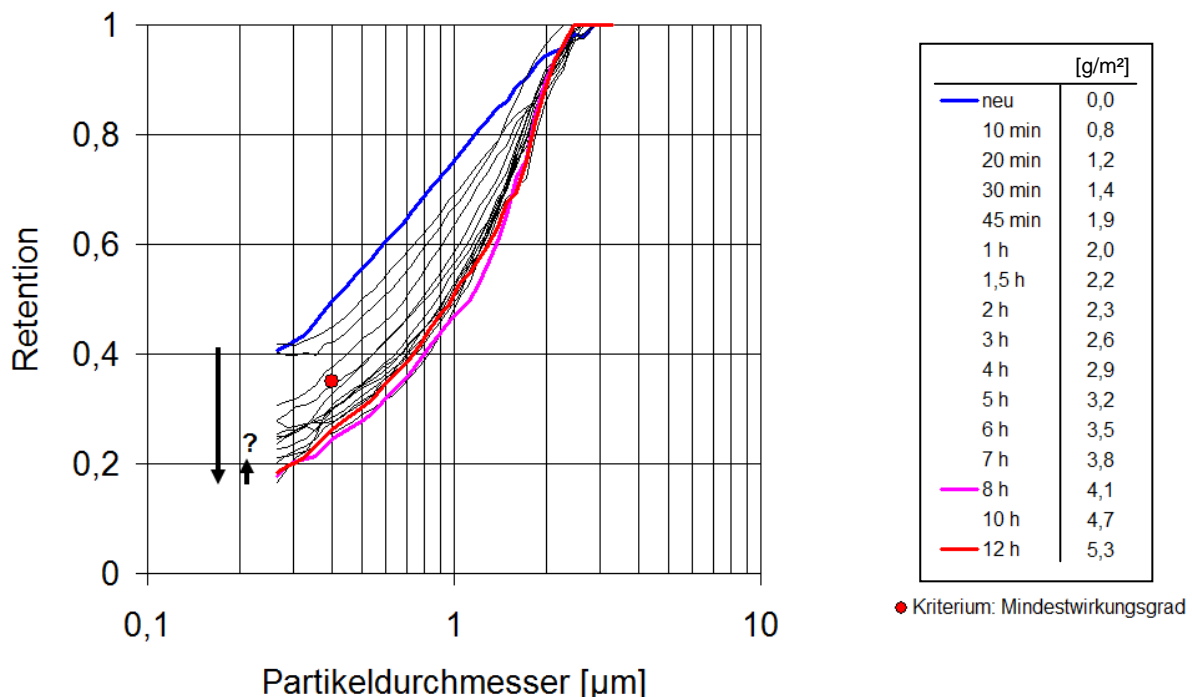
Im Rahmen des befürworteten Forschungsvorhabens "Untersuchung der Wirksamkeit von Filtern der allgemeinen Raumlufttechnik zur Reduzierung von Feinstaubkonzentrationen, insbesondere  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  und  $PM_{10}$ ", welches sich auf den künftigen Standard ISO 16890 bezieht, ist die Anschaffung einer entsprechenden IPA-Kammer und die eingehende Untersuchung der offenen Fragen vorgesehen.

#### 4.3 Beladung mit Ruß und Bestimmung der DEHS-Effizienz am Normprüfstand nach EN 779

Eine Beladung von Elektret-Filtern mit Ruß verringert ebenfalls die Depositionswahrscheinlichkeit von Partikeln aufgrund elektrostatischer Effekte. Abb. 4.11 zeigt die Entwicklung des Fraktionsabscheidegrades eines F7-Synthetikfaser-Taschenfilters (typgleicher Filter wie in Abb. 4.6) bei unterschiedlichen langen Beladungsdauern.

Ausgehend vom Anfangsfraktionsabscheidegrad (blaue Kurve) verschlechtert sich die Abscheideleistung mit zunehmender Beladung kontinuierlich. Schon nach ca. einer Stunde Beaufschlagung mit Ruß, welche einer abgeschiedenen Partikelmasse

von  $2 \text{ g/m}^2$  entsprach, wurde das Kriterium für F7-Filter (Mindestwirkungsgrad 35 % für  $0,4 \mu\text{m}$  Partikel) unterschritten. Nach einer achtstündigen Beaufschlagung mit Ruß (ca.  $4 \text{ g/m}^2$  abgeschiedene Partikelmasse) war der Fraktionsabscheidegrad auf einem Minimalniveau (magentafarbene Kurve). Erst nach zwölf Stunden (rote Kurve) und ca.  $5 \text{ g/m}^2$  scheint sich die Abscheideleistung aufgrund der deponierten Partikel wieder geringfügig verbessert zu haben. Der Druckverlust des Filters bei einem Volumenstrom von  $3400 \text{ m}^3/\text{h}$  ist während der Rußbeaufschlagung über die zwölf Stunden von  $95 \text{ Pa}$  auf  $100 \text{ Pa}$  angestiegen.



**Abb. 4.11: Entwicklung des Fraktionsabscheidegrades eines F7-Synthetikfaser-Taschenfilters mit Elektretwirkung bei Beaufschlagung mit Ruß**

Der Fraktionsabscheidegrad eines F7-Glasfaser-Taschenfilters (typgleicher Filter wie in Abb. 4.7) wird in Abb. 4.12 dargestellt. Die Beaufschlagung mit Rußpartikeln erfolgte über einen Zeitraum von insgesamt 4 Stunden (die auf die Fläche bezogene abgeschiedene Masse im Endstadium betrug  $2,7 \text{ g/m}^2$ ). Eine nachlassende Elektretwirkung wurde erwartungsgemäß nicht beobachtet. Die Verbesserung der Abscheideeffizienz durch bereits abgeschiedene Partikel ist bei der vierstündigen Beladung nicht zu erkennen.

Der ebenfalls untersuchte F7-Synthetikfaser-Taschenfilter ohne Elektretwirkung, der aber mit einer Feinstfaserschicht ausgestattet ist (typgleicher Filter wie in Abb. 4.8) weist eine signifikant abweichende Entwicklung der Abscheideeffizienz auf. Aus-

gehend von einer Minimaleffizienz im Neuzustand steigt die Effizienz kontinuierlich an (Abb. 4.13).

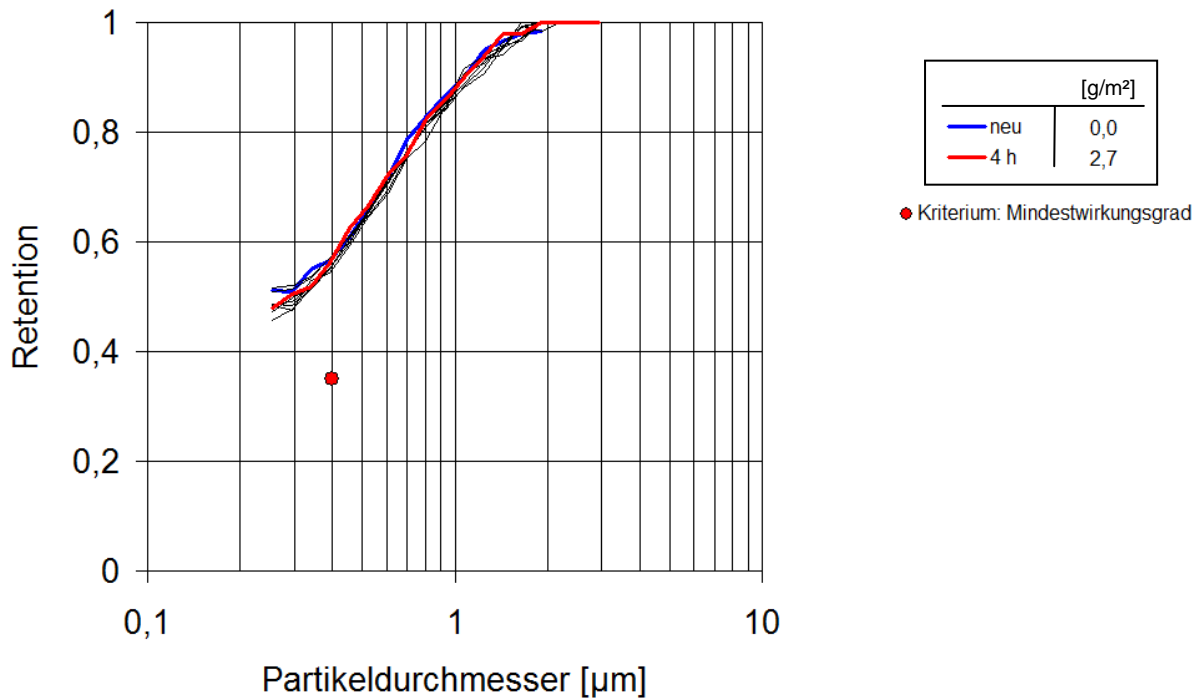


Abb. 4.12: Entwicklung des Fraktionsabscheidegrades eines F7-Glasfaser-Taschenfilters bei Beaufschlagung mit Ruß

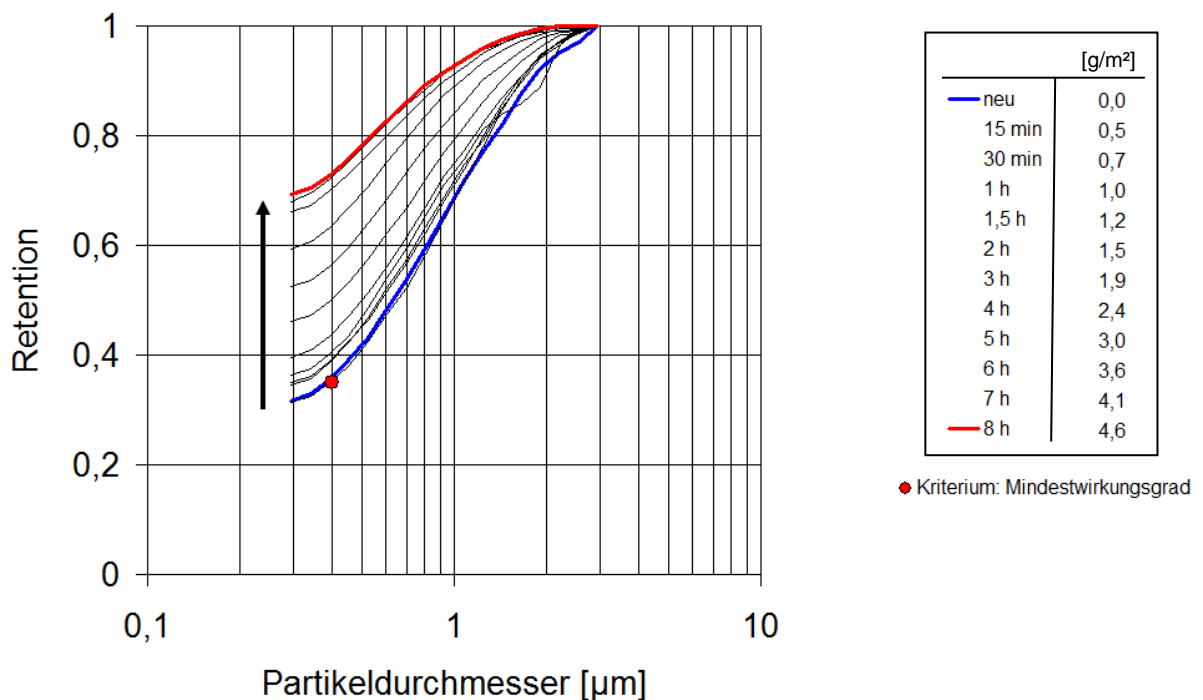
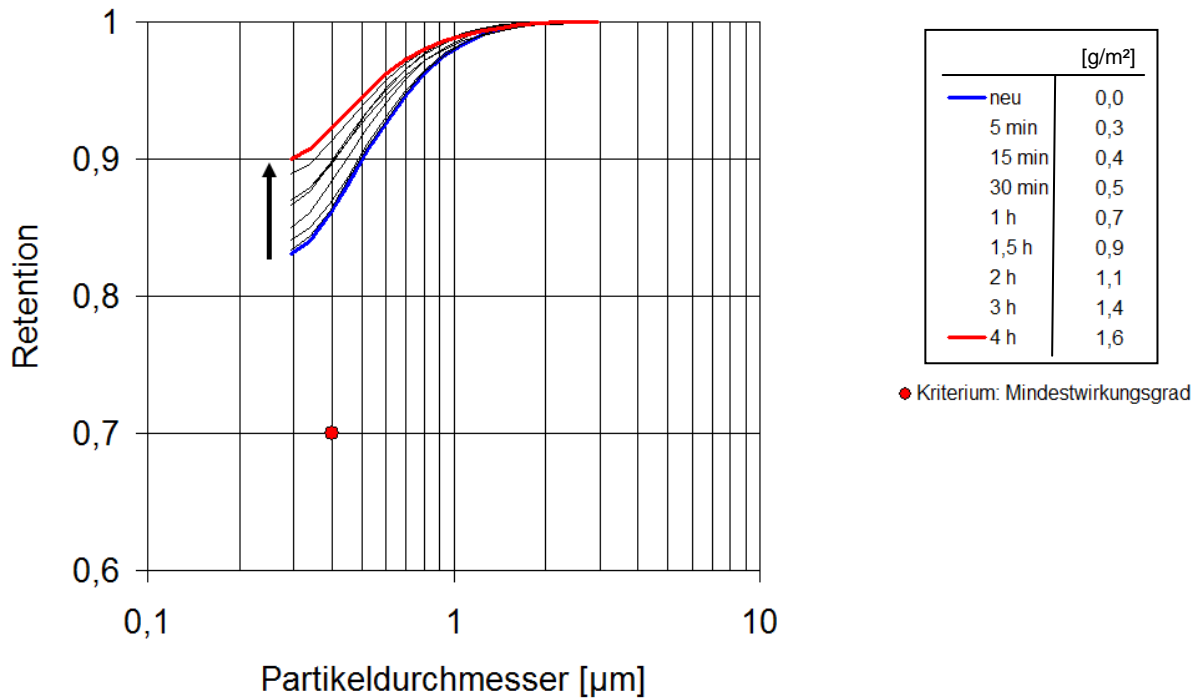


Abb. 4.13: Entwicklung des Fraktionsabscheidegrades eines F7-Synthetikfaser-Taschenfilters ohne Elektretwirkung mit Feinstfaserschicht bei Beaufschlagung mit Ruß

Eine kontinuierliche Steigerung der Effizienz bei einer Beladung mit Ruß zeigen auch die Messergebnisse des F9-Glasfaser-Kassettenfilters (Abb. 4.14; typgleicher Filter wie in Abb. 4.9).



**Abb. 4.14: Entwicklung des Fraktionsabscheidegrades eines F9-Glasfaser-Kassettenfilters bei Beaufschlagung mit Ruß**

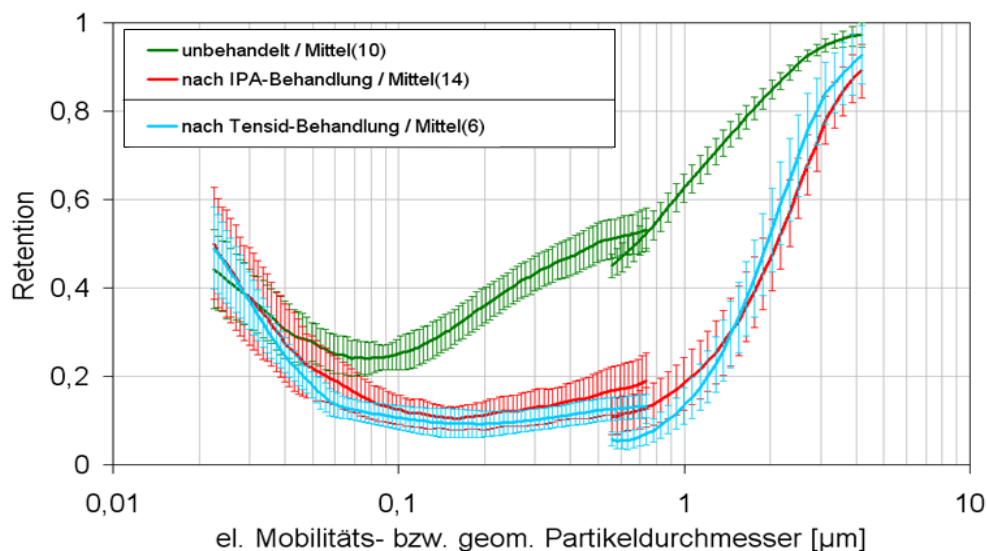
Zusammenfassend zeigen die experimentellen Ergebnisse mit Dieselruß als Beladungs-aerosol, dass nachlassende Elektreteffekte sehr gut nachvollzogen werden können. Eine Beladungsdauer von 8 Stunden (bei dem in dieser Versuchsreihe verwendeten Rußgenerator) ist allerdings für Routinemessungen sicherlich zu lang und daher eher unpraktikabel.

Bei zwei der untersuchten Filtertypen ohne Elektretwirkung wurden Rußbeladungsstadien erreicht, bei denen sich eine signifikante Verbesserung der Abscheideeffizienz gezeigt hat.

#### 4.4 Untersuchung weiterer alternativer Entladungsmethoden (Klimawechseltest, Tensidlösung) am Filtermedium

Im Folgenden werden weitere Methoden zur Entladung der Elektretfilter dargestellt. Die Wirksamkeit der einzelnen Methoden wird anhand der Fraktionsabscheidegrade beurteilt.

In Abb. 4.15 ist ein Vergleich der DEHS-Fraktionsabscheidegrade von unbehandelten (Neuzustand), im IPA- und im Tensidlösungs-Bad behandelten Medienproben dargestellt. Wie das IPA-Bad, so führt auch das Bad in der Tensidlösung zu einer vollständigen elektrischen Neutralisierung der Medienprobe. Die notwendige Trocknungsdauer ist bei der wässrigen Lösung aber größer als beim leicht flüchtigen IPA. Insbesondere weil nach der Trocknung in signifikantem Umfang Tensidrückstände auf den Faseroberflächen verbleiben, stellt diese Methode keine sinnvolle Alternative zur IPA-Behandlung dar.

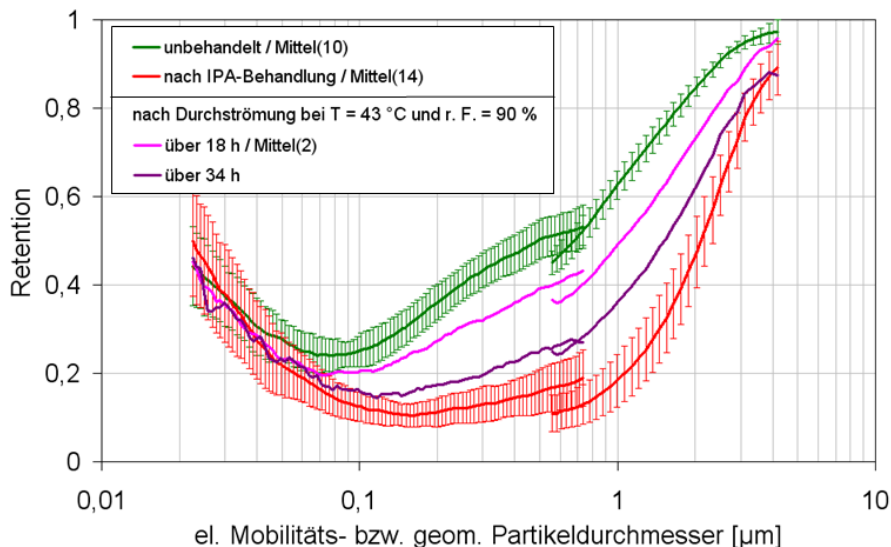


**Abb. 4.15: DEHS-Fraktionsabscheidegrad am Medium (unbehandelt / IPA-behandelt / Tensid-behandelt)**

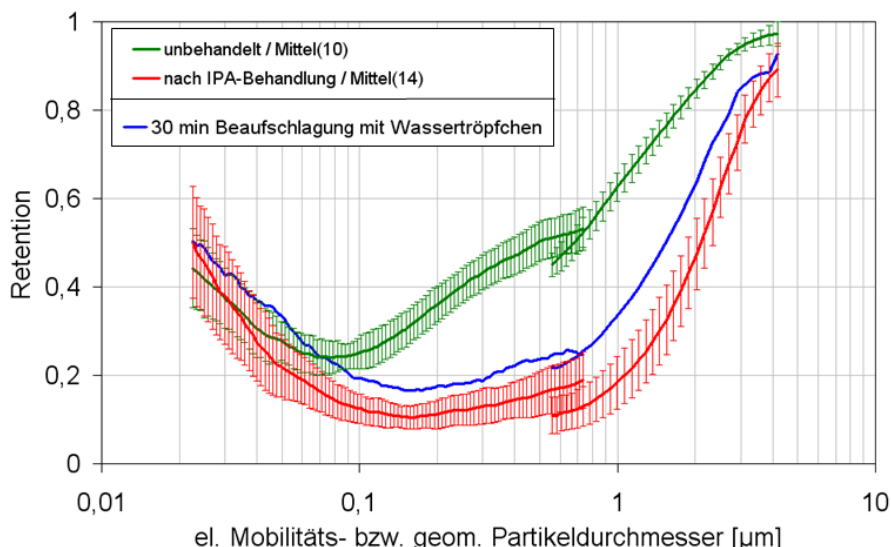
Die Auswirkungen einer Klima-Behandlung sind in Abb. 4.16 dargestellt. Die Medienproben wurden in diesem Fallbeispiel mit Luft bei einer Temperatur von 43 °C und einer relativen Feuchte von 90 % durchströmt. Bereits nach einer Durchströmungsdauer von 18 Stunden tritt eine sichtbare Verschlechterung der Abscheidung auf, was auf eine Teilentladung schließen lässt. Nach 34 Stunden nähert sich die Kurve des Fraktionsabscheidegrades dem der IPA-behandelten Filtermedien an.

Auch eine Beaufschlagung mit Wassertröpfchen führt zur elektrostatischen Neutralisierung. In Abb. 4.17 wird der Fraktionsabscheidegrad nach einer 30-minütigen Beaufschlagung mit Wassertröpfchen und anschließender Trocknung denjenigen am unbehandelten um am IPA-behandelten Medium gegenübergestellt. Die Abscheide-

effizienz ist annähernd auf das gleiche Niveau gesunken, wie bei der Neutralisierung durch das IPA-Bad. Aufgrund der längeren notwendigen Trocknungsdauer stellt eine Beaufschlagung mit Wassertropfen oder auch ein Tauchen der Medienproben in ein Wasserbad aus Anwendersicht keine technisch sinnvolle Alternative zur Neutralisierung mit IPA dar.



**Abb. 4.16: DEHS-Fraktionsabscheidegrad am Medium (unbehandelt / IPA-behandelt / klimabehandelt)**



**Abb. 4.17: DEHS-Fraktionsabscheidegrad am Medium (unbehandelt / IPA-behandelt / Beaufschlagung mit Wassertropfen)**

Hinsichtlich des Nachlassens der Elektretwirkung kann aber festgehalten werden, dass es unter Bedingungen, denen ein Filter auch im Realeinsatz ausgesetzt sein kann, innerhalb kurzer Zeit zu einer signifikanten Verschlechterung der Abscheideleistung kommen kann.

#### **4.5 Beladung von RLT-Filtern mit Außenluft sowie mit Umluft im Realbetrieb von Lüftungsanlagen und Bestimmung der Effizienz**

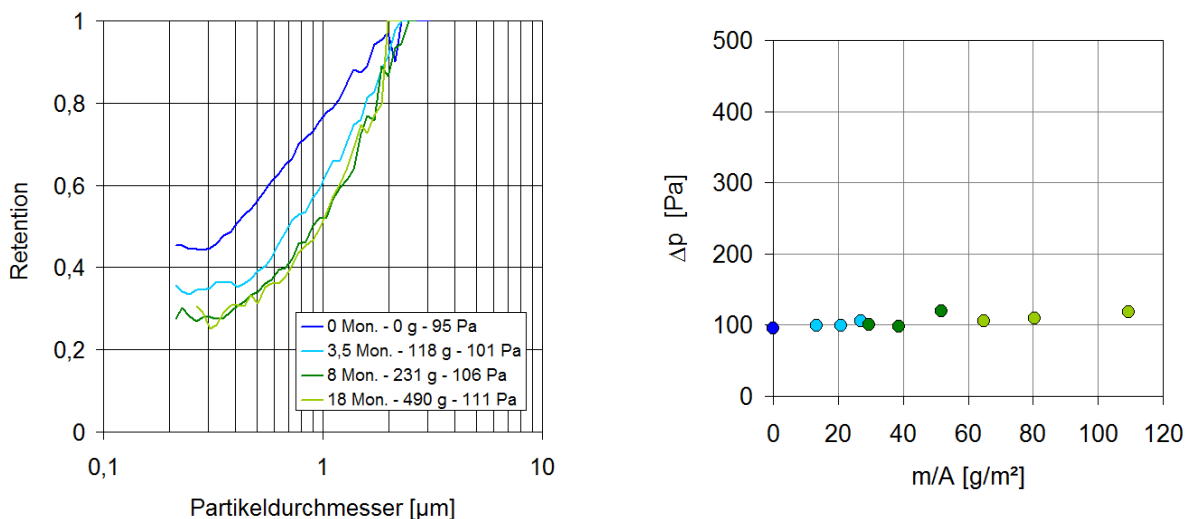
Verschiedene RLT-Filter (Taschen- und Kassettenfilter, Synthetik- und Glasfaser) wurden in unterschiedlichen Lüftungsanlagen an der Universität Duisburg-Essen und am IUTA eingebaut und in regelmäßigen Abständen den Anlagen entnommen. Die entnommenen Filter wurden in einem normkonformen Prüfstand hinsichtlich ihres Druckverlustes und ihrer Abscheideeffizienz untersucht.

Die hier betrachteten Filter sind typgleich zu denen, für die in Abschnitt 4.1 eine Gegenüberstellung von Fraktionsabscheidegraden am konfektionierten Filter und am unbehandelten und IPA-behandelten Medium präsentiert wurde (Abb. 4.6 bis Abb. 4.9).

Die nachfolgenden Abb. 4.18 bis Abb. 4.21 zeigen jeweils im linken Diagramm die Effizienzen nach den in den Legenden angegebenen Zeitintervallen. In den rechten Diagrammen ist der Druckverlust als Funktion der abgeschiedenen Staubmasse bezogen auf die Filterfläche aufgetragen.

Abb. 4.18 zeigt die Ergebnisse für den F7-Taschenfilter aus Synthetikfasermaterial mit Elektretwirkung. Untersucht wurden in diesem Fall drei von sechzehn Filtern, die in der ersten von zwei Filterstufen eines Frischluftzuges eingesetzt waren. Sie wurden also ohne Vorfiltration mit Außenluft beaufschlagt. Im linken Diagramm wird der Fraktionsabscheidegrad als Mittelwert über die drei Filter dargestellt. Aus Gründen der Anschaulichkeit wird auf die Darstellung der Fehlerbalken verzichtet. Die Abscheideeffizienz hat schon nach 3,5 Monaten deutlich abgenommen. Nach 8 Monaten ist eine weitere Verschlechterung zu verzeichnen. Selbst nach 18 Monaten zeigt sich noch keine Verbesserung aufgrund der deponierten Partikel, die Effizienz ist noch immer auf dem gleichen, niedrigen Niveau. Die in der Legende angegebenen abgeschiedenen Massen sind die nicht auf die Filterflächen bezogenen Mittelwerte über die drei betrachteten Filter. Die Druckverlustwerte in der Legende sind ebenfalls die Mittelwerte. Im rechten Diagramm sind ausgehend von einem Wert von 95 Pa bei 3400 m<sup>3</sup>/h im Anfangsstadium (Streuung über die drei Filter ca. ± 1 Pa) die Druckverlustdaten für die drei Filter separat aufgetragen. Die Farbgebung der Datenpunkte korrespondiert mit der Farbgebung für die Beladungsstadien in Monaten (siehe linkes Diagramm). Man erkennt, dass die abgeschiedenen Massen auf den drei Filtern sehr unterschiedlich waren. Dies ist vermutlich auf eine ungleichförmige Anströmsituation dieser drei Filter in der Filterstufe zurückzuführen. Der Druckverlust ist während der 18 Monate Einsatzdauer bei einem der Filter im Maximum von 95 Pa auf ca. 120 Pa angestiegen. Bei Beaufschlagung mit dem Teststaub ASHRAE nach DIN EN 779 beträgt der maximale Druckverlust 450 Pa;

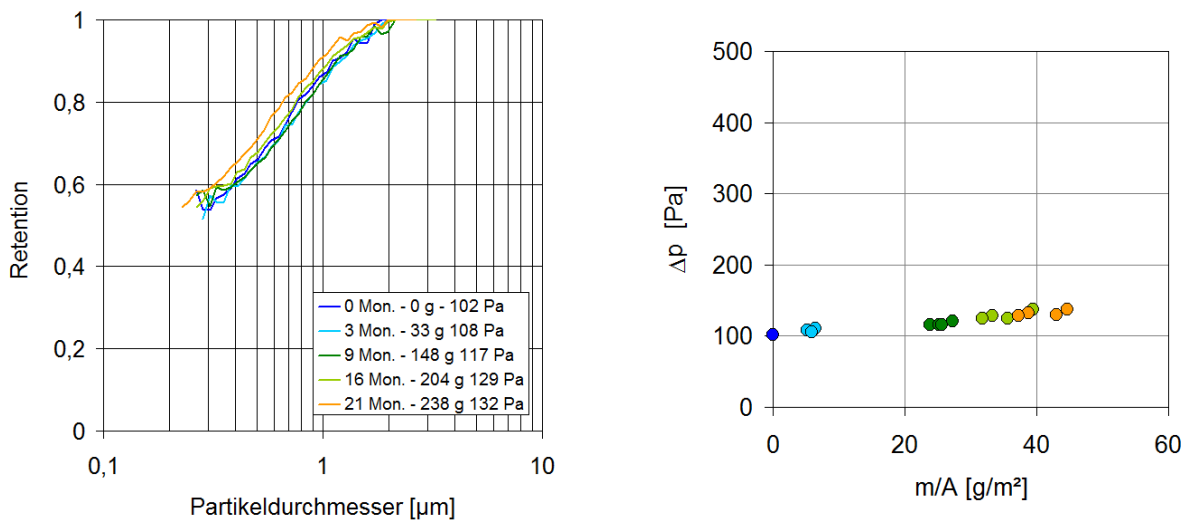
daher hier die Skalierung der y-Achse bis 500 Pa. Die Druckverlustentwicklung der Filter aus dem Einsatz in der Lüftungsanlage wird im Abschnitt 4.9 den Beladungskurven bei Beaufschlagung mit ASHRAE- und A2-Staub gegenübergestellt und im Detail diskutiert.



**Abb. 4.18: F7-Taschenfilter (Synthetikfaser mit Elektretwirkung)**  
**links: Effizienzen bei Beladung mit Außenluft**  
**rechts: Druckverlust als Funktion der Staubmasse bezogen auf die Filterfläche**

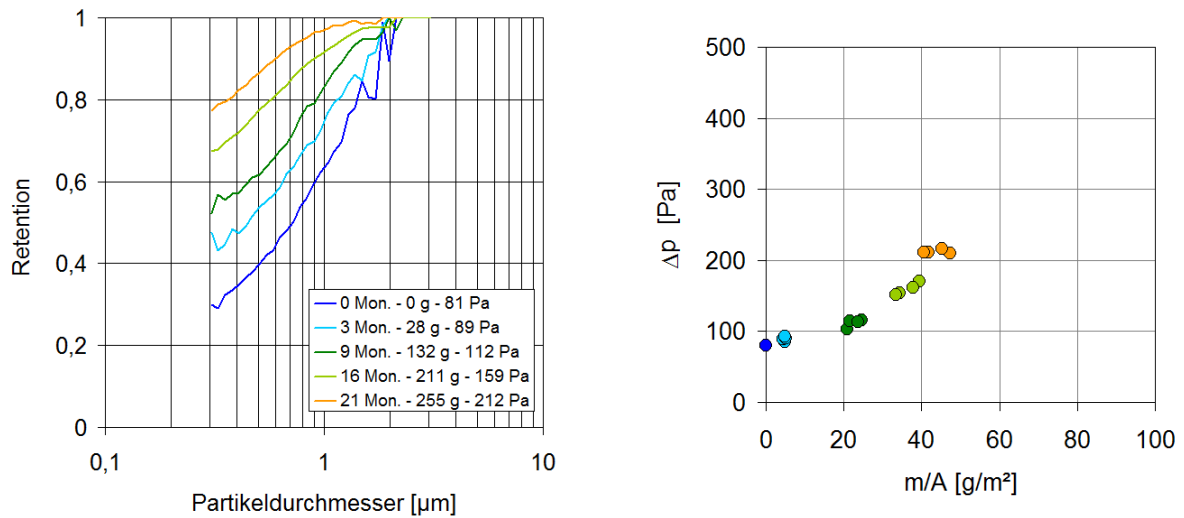
Abb. 4.19 zeigt die Ergebnisse für den F7-Taschenfilter aus Glasfasermaterial. Hier wurden alle vier Filter der zweiten Filterstufe einer kleineren Lüftungsanlage untersucht. In der ersten Filterstufe befanden sich G4-Filter. Diese F7-Filter wurden mit vorgefilterter Außenluft beaufschlagt. Der Einsatz in der Lüftungsanlage erfolgte hier über einen Zeitraum von 21 Monaten. Während die Fraktionsabscheidegrade bis zu einer Einsatzdauer von 16 Monaten kaum voneinander zu differenzieren sind, scheint sich nach 21 Monaten eine geringfügig bessere Abscheideeffizienz ergeben zu haben. Der Druckverlust bei 3400 m<sup>3</sup>/h, der im Mittel über die vier Filter im Anfangsstadium bei 102 Pa (Streuung ± 2 Pa) lag, liegt nach 21 Monaten im Mittel bei 132 Pa. Der Druckverlust eines der vier Filter war auf 137 Pa angestiegen. Die individuell auf den Filtern abgeschiedenen Massen streuen deutlich weniger, als im Falle der in Abb. 4.18 betrachteten Filter, was auf eine gleichförmigere Anströmung schließen lässt. Die abgeschiedenen Massen sind aufgrund der Vorfiltration deutlich geringer als bei jenen Filtern.





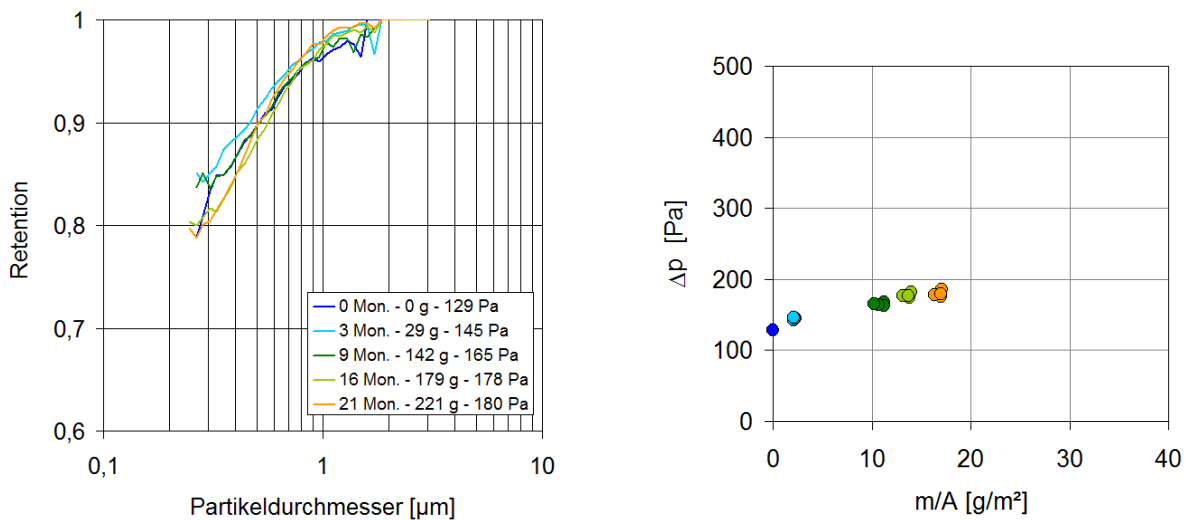
**Abb. 4.19: F7-Taschenfilter (Glasfaser)**  
**links: Effizienzen bei Beladung mit Außenluft**  
**rechts: Druckverlust als Funktion der Staubmasse bezogen auf die Filterfläche**

Relativ neu auf dem Markt sind Filter aus Synthetikfasern mit einer Feinstfaser-schicht. In Abb. 4.20 sind im linken Diagramm erneut Fraktionsabscheidegrade von F7-Taschenfiltern dargestellt. Die vier untersuchten Filter, welche keine Elektret-wirkung aufweisen, sind aus der zweiten Filterstufe einer kleineren Lüftungsanlage mit einer G4-Vorfiltration. Sie waren 21 Monate im Realeinsatz. Mit zunehmender Einsatzdauer ergibt sich eine signifikante kontinuierliche Verbesserung des Frakti-onsabscheidegrades. Die Effizienz bei einem Partikeldurchmesser von  $0,4 \mu\text{m}$  steigt von einem Anfangswert von 0,35 auf 0,8 nach 21 Monaten Einsatzdauer an. Der Druckverlust bei den Filtern mit der Feinstfaserschicht steigt im Vergleich zu dem bei den Filtern aus Glasfasern oder denen aus Elektretmedien stärker an. Bei einem Nennvolumenstrom von  $3400 \text{ m}^3/\text{h}$  beträgt der Druckverlust im Neuzustand 81 Pa (Streuung  $\pm 2 \text{ Pa}$ ) im Mittel und nach 21 Monaten 212 Pa.



**Abb. 4.20: F7-Taschenfilter (Synthetikfasermaterial mit Feinstfasern ohne Elektretwirkung)**  
**links: Effizienzen bei Beladung mit Außenluft**  
**rechts: Druckverlust als Funktion der Staubmasse bezogen auf die Filterfläche**

Der Fraktionsabscheidegrad und der Druckverlust der F9-Kassettenfilter aus Glasfasermedium in verschiedenen Realbeladungsstadien wird in Abb. 4.21 gezeigt. Die effektive Filterfläche dieser Kassettenfilter beträgt ca. 13 m<sup>2</sup> und ist damit mehr als doppelt so groß als die der drei bisher betrachteten Taschenfiltertypen, die alle eine effektive Filterfläche von ca. 5,8 m<sup>2</sup> aufwiesen. Die F9-Kassettenfilter waren ebenfalls in der zweiten Filterstufe einer kleineren Lüftungsanlage mit einer G4-Vorfiltration eingebaut. Die Unterschiede des Fraktionsabscheidegrads im linken Diagramm sind sehr gering, etwa in der Größenordnung der Streuung der Ergebnisse für die vier Filter. Auf die Darstellung der Fehlerbalken wurde auch hier aus Gründen der Anschaulichkeit verzichtet. Der Druckverlust der Filter beim Nennvolumenstrom ist von ursprünglich 129 Pa auf 180 Pa angestiegen.



**Abb. 4.21: F9-Kassettenfilter (Glasfaser)**  
**links: Effizienzen bei Beladung mit Außenluft**  
**rechts: Druckverlust als Funktion der Staubmasse bezogen auf die Filterfläche**

Im Rahmen des Projektes sind eine Reihe weiterer Synthetik-Taschenfilter der Filterklassen F7, F8 und F9 mit Elektretwirkung in verschiedene Lüftungsanlagen eingebaut worden. Die nachlassenden Elektreteigenschaften der Filter bereits bei kurzer Nutzungsdauer haben sich in jeder betrachteten Lüftungsanlage gezeigt.

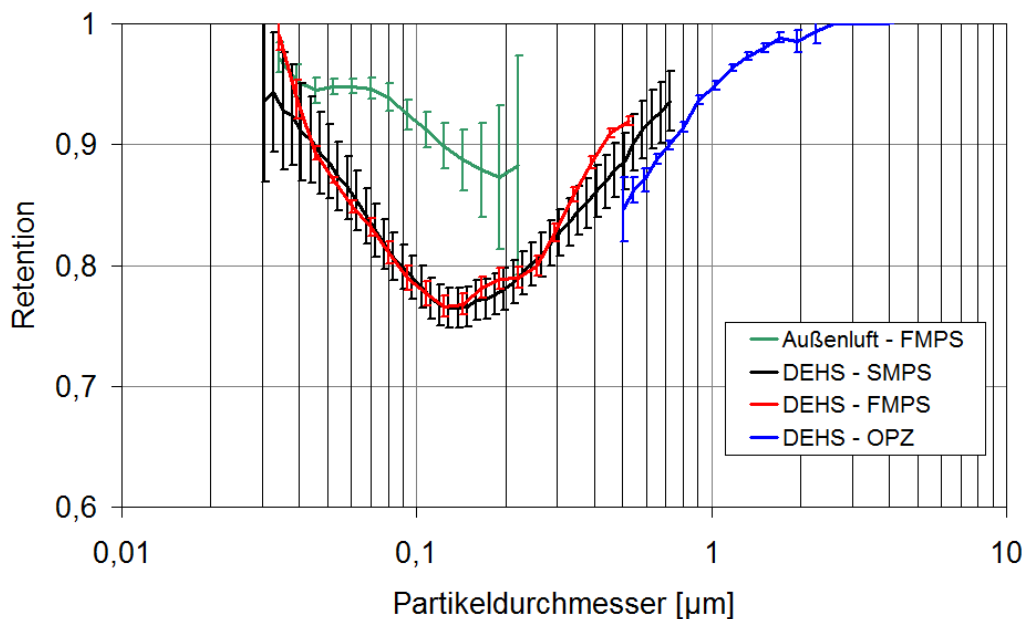
In einer weiteren Versuchsreihe sind F9-Kassettenfilter aus Glasfasern in den Umluftzügen einer größeren Lüftungsanlage eingebaut worden. Bei sehr konstanten Klimabedingungen wurden diese Kassettenfilter lediglich mit der in der umgewälzten Luft enthaltenen Partikelfracht beaufschlagt. Bei einer Einsatzdauer von 30 Monaten wurde ein Anstieg des Druckverlustes von bis zu lediglich 15 Pa gemessen. Die Fraktionsabscheidegrade hatten sich nach dieser Zeit gegenüber dem Anfangszustand nicht relevant verändert.

#### **4.6 Bestimmung der Effizienz an in Lüftungsanlagen eingebauten RLT-Filtern mit Außenluft**

In Abb. 4.22 wird der Fraktionsabscheidegrad einer in-situ-Messung mit Außenluft mit Ergebnissen, die im Labor unter Verwendung von DEHS-Partikeln erzielt wurden, verglichen. Diese Gegenüberstellung erfolgt für einen F9-Kassettenfilter aus einem Glasfasermedium.

Zur Bestimmung der Fraktionsabscheidegrade mit DEHS wurden drei unterschiedliche Messsysteme verwendet. Für Partikeldurchmesser größer als 0,2 µm wurde entsprechend der EN 779-Prüfung ein optischer Partikelzähler (OPZ) verwendet. Der ermittelte Fraktionsabscheidegrad wird durch die blaue Kurve in Abb. 4.22 repräsentiert. Hierbei wurde der optische auf einen geometrischen Partikeldurchmesser umgerechnet. Für den Bereich kleinerer Partikeldurchmesser kamen sowohl ein SMPS- (schwarze Kurve) als auch ein FMPS-System (rote Kurve) zum Einsatz. Bei den ermittelten Partikelgrößen dieser Messgeräte handelt es sich um elektrische Mobilitätsäquivalent-Durchmesser. Diese entsprechen bei den DEHS-Partikeln den geometrischen Durchmessern.

Das FMPS-System ist aufgrund seines Messprinzips anders als das SMPS-System dazu in der Lage, Partikelkonzentration bzw. Größenverteilung auch bei sehr instationären Gegebenheiten abzubilden. Bei der hier vorliegenden zeitlich konstanten Bereitstellung eines DEHS-Aerosols im Prüfkanal (rote Kurve) erhält man erwartungsgemäß eine recht gute Übereinstimmung mit den SMPS-Messergebnissen (schwarze Kurve). Während die Ergebnisse der DEHS-Fraktionsabscheidegrade, die mit den verschiedenen Messsystemen ermittelt wurden, eine gute Übereinstimmung aufweisen, ergibt sich für die in-situ-Messung (grüne Kurve) ein abweichender Verlauf. Die Übereinstimmung ist hier im Partikelgrößenbereich von 0,03 µm bis 0,20 µm nicht überzeugend.

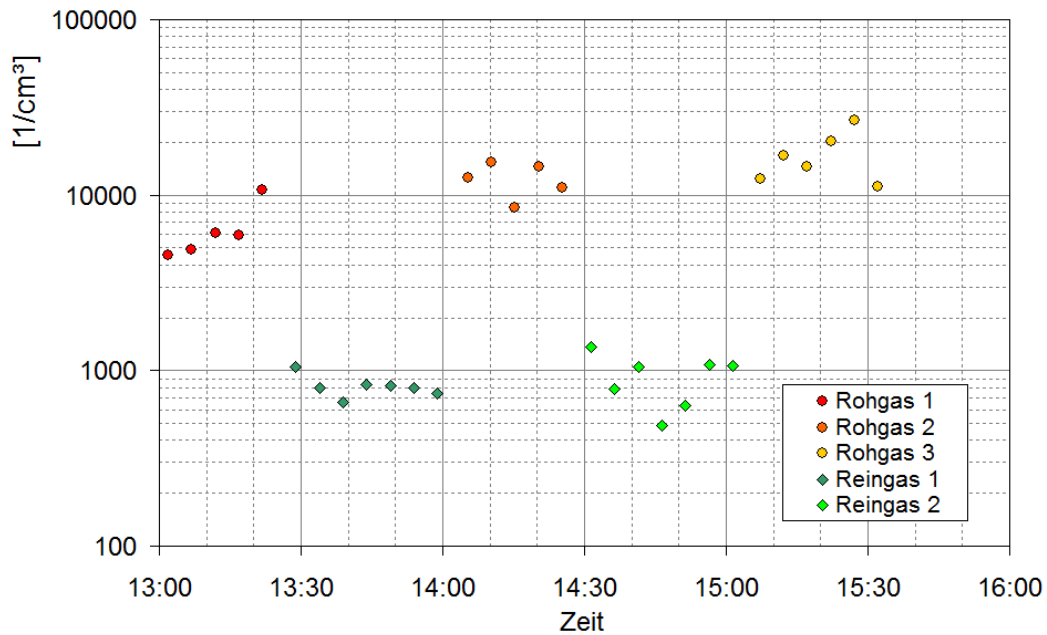


**Abb. 4.22: F9-Kassettenfilter (Glasfaser)**  
**Vergleich in-situ-Messung an Realanlage mit Labormessungen**

Erklärungsansätze: Da es im Rahmen der in-situ-Messung aus baulichen Gründen nicht möglich war, ausreichende Vor- und Nachlaufstrecken bezogen auf die gesamte Filterstufe zu realisieren, erfolgte die Probenahme mittig vor bzw. hinter einem der Filterelemente. Zur Kontrolle des auf diesen Filter entfallenden Volumensstroms bei einer etwaigen ungleichförmigen Anströmung der gesamten Filterwand wurde das Geschwindigkeitsprofil anströmseitig vor diesem einzelnen Filter vermessen. Der Volumensstrom zum Zeitpunkt der Messung betrug ca. 2550 m<sup>3</sup>/h und dieser Wert wurde auch am EN 779-Normprüfkanal im Labor gewählt. Wie stationär dieser Betriebszustand allerdings war, wurde nicht überprüft. Es stellt sich des Weiteren die Frage, wie repräsentativ die gewählte roh- und reingasseitigen Aerosolprobenahme sein konnte, insbesondere da nur ein FMPS-System zur Verfügung stand und somit keine gleichzeitige roh- und reingasseitige Messung möglich war. Um eine ausreichende Zählstatistik zu erzielen, war es notwendig, je eine fünfminütige rohgasseitige Messung vor und nach einer zehnminütigen reingasseitigen Messung vorzunehmen.

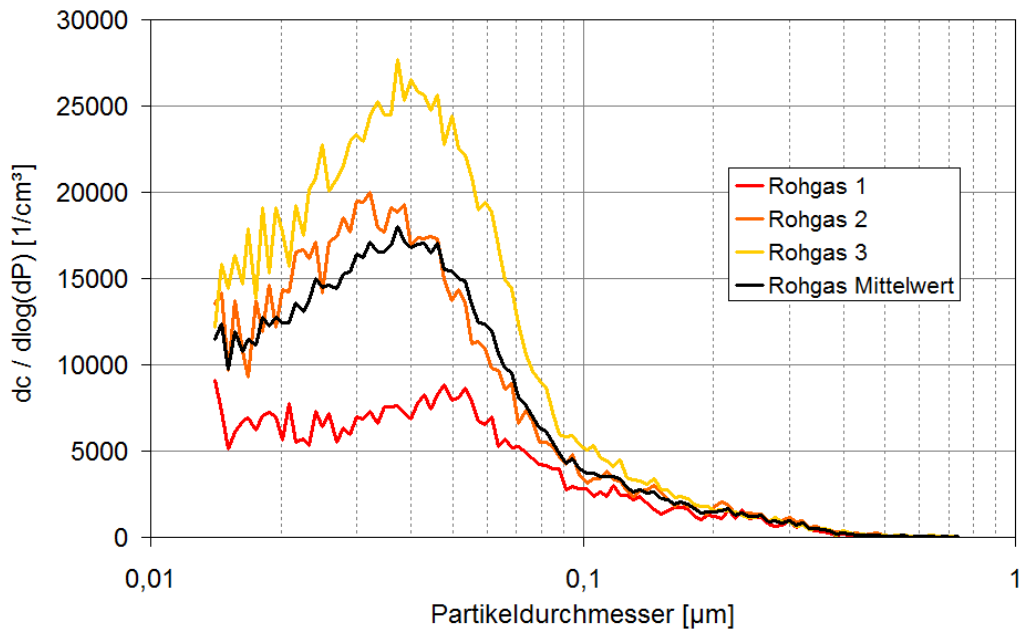
Um diese Probleme hinsichtlich eines etwaig nicht stationären Betriebs der Anlage und einer gegebenenfalls nicht repräsentativen Probenahme zu eliminieren und dennoch Messergebnisse zum Fraktionsabscheidegrad bei Exposition des Filters mit Außenluft zu erzielen, wurden Messungen mit ungefilterter Außenluft am Normprüfkanal vorgenommen. In Abb. 4.23 werden die rohgas- und reingasseitige Gesamtanzahlkonzentrationen bei einer Außenluftexposition des Filters über einen Zeitraum

von ca. zweieinhalb Stunden dargestellt. Man erkennt, dass sowohl die Rohgas- als auch die Reingaskonzentrationen signifikanten Schwankungen unterliegen. Die Messergebnisse wurden mit einem SMPS-System ermittelt. Die Nachteile des SMPS-Systems bei einem instationären Einsatzfall werden durch eine Reihenmessung über einen längeren Zeitraum und anschließende Mittelwertbildung für die Ermittlung des Fraktionsabscheidegrades kompensiert.

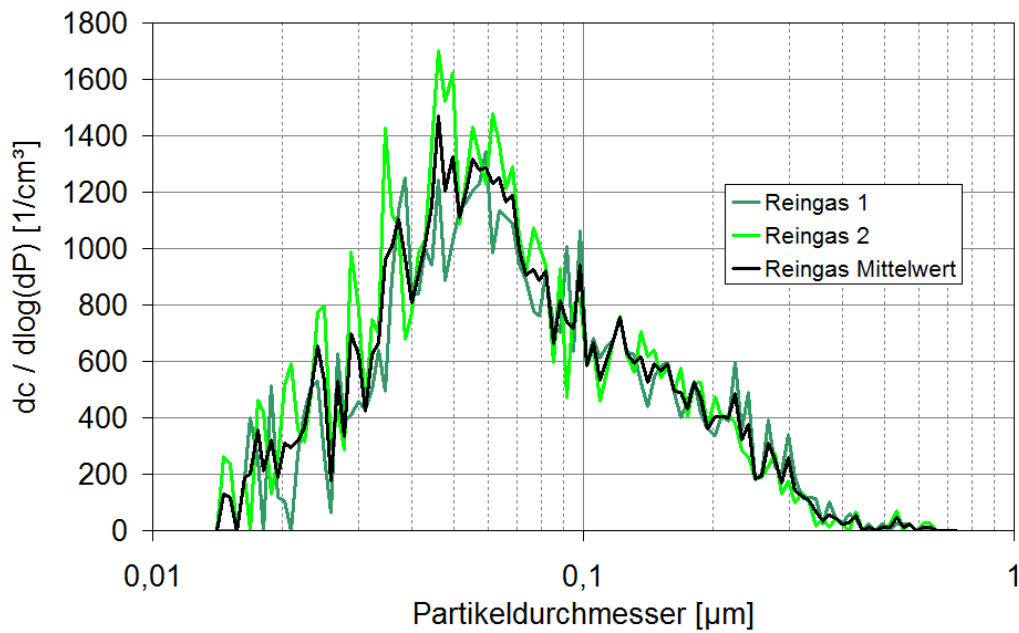


**Abb. 4.23: F9-Kassettenfilter (Glasfaser)  
rohgas- und reingasseitige Gesamtanzahlkonzentrationen (SMPS-Messung)  
bei einer Außenluftexposition des Filters im Normprüfkanal nach EN 779**

In Abb. 4.24 und Abb. 4.25 werden die Partikelverteilungen für die drei jeweils gemittelten Rohgasmessreihen bzw. die zwei Reingasmessreihen und die jeweilige Mittelung über die gesamten Messzyklen dargestellt. Während die Rohgasverteilungen in den drei Messzyklen deutliche Unterschiede aufweisen, sind die Reingasverteilungen in den beiden Messzyklen sehr ähnlich.

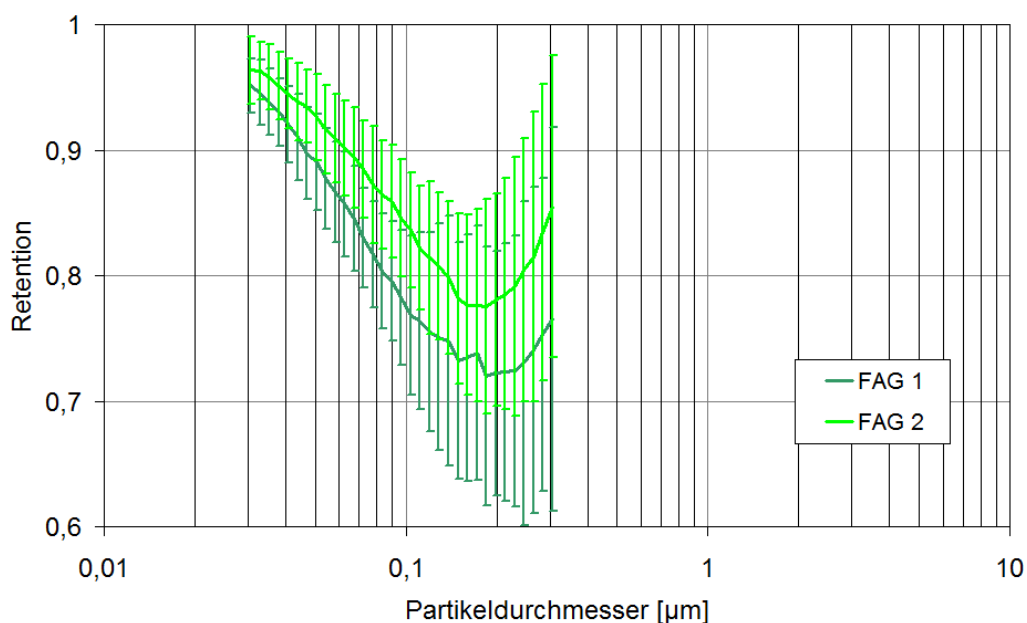


**Abb. 4.24: F9-Kassettenfilter (Glasfaser)**  
**Rohgasverteilungen**  
bei einer Außenluftexposition des Filters im Normprüfkanal nach EN 779



**Abb. 4.25: F9-Kassettenfilter (Glasfaser)**  
**Reingasverteilungen**  
bei einer Außenluftexposition des Filters im Normprüfkanal nach EN 779

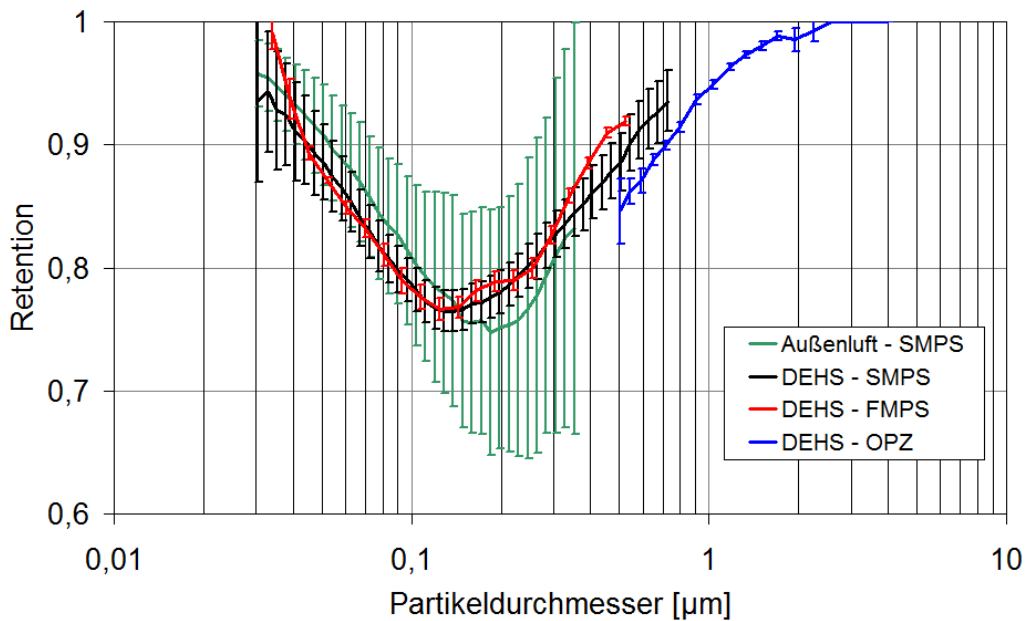
Berechnet man die Fraktionsabscheidegrade für den ersten und den zweiten Reingasmesszyklus und den angrenzenden Rohgasmesszyklen separat, ergeben sich die in Abb. 4.26 gezeigten Kurvenverläufe. Man erkennt, dass eine hohe Messunsicherheit gegeben ist. Die beiden separat gebildeten Fraktionsabscheidegrade liegen hierbei aber auf einem voneinander erkennbar unterschiedlichen Niveau. Der Filter hat über die Expositionsdauer zwischen diesen beiden Fällen sicherlich keine Änderung seiner Abscheideeffizienz erfahren. Demzufolge erstreckt sich die Mittelwertbildung, wenn man beide Fälle separat betrachtet, offensichtlich noch nicht über eine ausreichend große Datenmenge bzw. eine ausreichend große Zeitdauer.



**Abb. 4.26: F9-Kassettenfilter (Glasfaser)  
Fraktionsabscheidegrade  
bei einer Außenluftexposition des Filters im Normprüfkanal nach EN 779**

In Abb. 4.27 wird der Mittelwert über die beiden bisher separat betrachteten Zeiträume im Vergleich zu den DEHS-Fraktionsabscheidegraden gezeigt. Die Messunsicherheit bei der Messung mit Außenluft ist zwar groß, die Übereinstimmung des abgebildeten Fraktionsabscheidegrades mit denjenigen bei Verwendung von DEHS als Prüfaerosol ist jedoch sehr gut.





**Abb. 4.27: F9-Kassettenfilter (Glasfaser)  
Fraktionsabscheidegrad  
bei einer Außenluftexposition des Filters im Normprüfkanal nach EN 779  
im Vergleich zu DEHS- Fraktionsabscheidegraden**

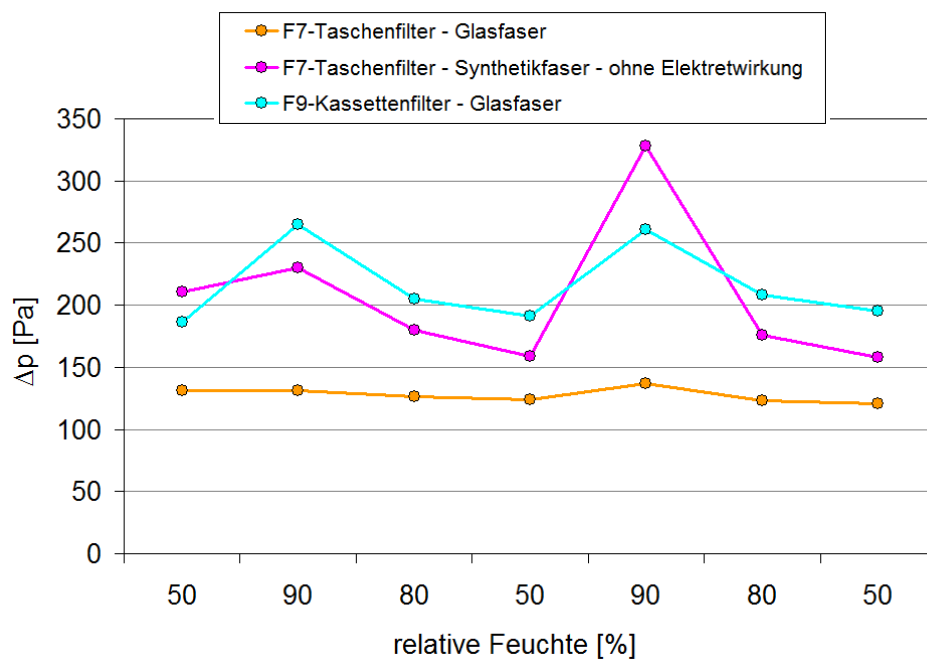
Abschließend ist festzuhalten, dass die unter Laborbedingungen gewonnenen Ergebnisse unter Verwendung von DEHS als Prüfaerosol als repräsentativ für die Abscheideeffizienz von Luftfiltern bei einer Exposition mit Außenluft angenommen werden dürfen. Die vermeintliche Unstimmigkeit zu der eigentlichen in-situ-Messung wird durch die immanenten Probleme einer solchen verursacht.

#### **4.7 Bestimmung von Effizienz und Druckverlust an beladenen RLT-Filtern am Normprüfstand bei konstanter Temperatur und Luftfeuchten zwischen 70 % und 90 %**

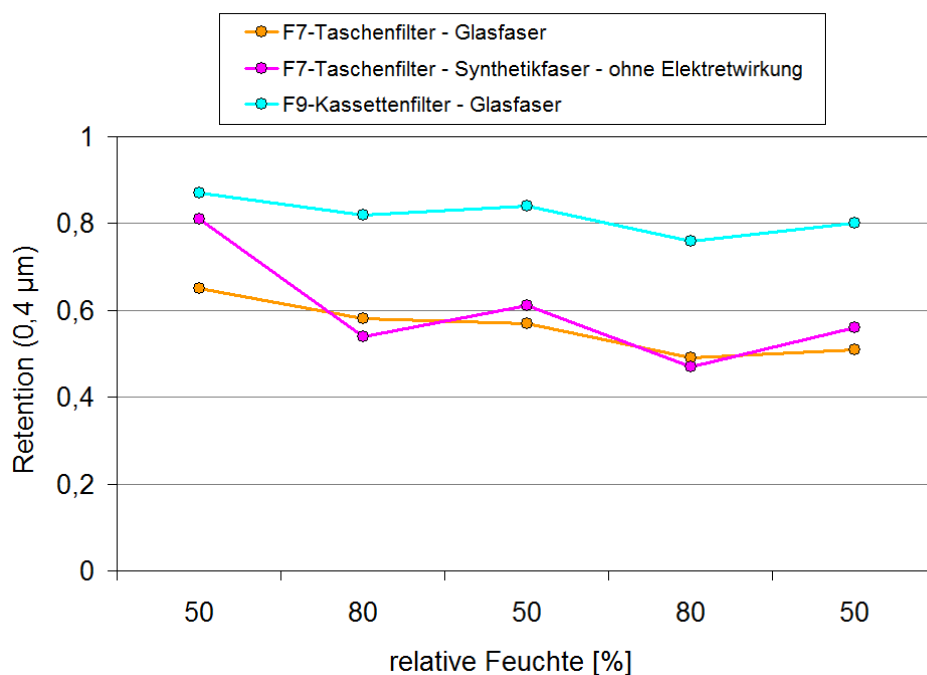
In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Luftfeuchte auf die Abscheideeffizienz und den Druckverlust an mit Außenluft beladenen Filtern dargestellt. Alle drei hier betrachteten Filtertypen sind vor diesen Versuchen über einen Zeitraum von 21 Monaten in Lüftungsanlagen mit einer G4-Vorfiltration am Standort Duisburg verwendet worden.

In Abb. 4.28 wird gezeigt, wie sich der Druckverlust bei einem Volumenstrom von 3400 m<sup>3</sup>/h und einer Temperatur von ca. 20 °C als Funktion der relativen Luftfeuchte ändert. Bei Versuchsbeginn wurden die Filter im EN 779-Prüfkanal, der um die notwendigen klimatechnischen Komponenten erweitert wurde, bei einer relativen Feuchte von 50 % durchströmt. Die rel. Feuchte wurde dann auf 90 % erhöht und schrittweise weiter geändert. Während die Filter im ersten Durchlauf nur für wenige Minuten bei der Feuchte von 90 % durchströmt wurden, betrug die Durchströmungszeit im zweiten Durchlauf jeweils ca. eine halbe Stunde. Erst nach dieser Zeit hatte sich ein gesichert stabiler Gleichgewichtszustand hinsichtlich des Druckverlustes eingestellt. Bei allen drei Filtertypen zeigt sich qualitativ ein gleichartiges Verhalten. Bei der relativen Feuchte von 90 % steigt der Druckverlust an. Wird die Feuchte dann auf 80 % und 50 % reduziert, sinkt der Druckverlust. Je nach Filtertyp ist der Druckverlust wieder ungefähr auf dem Ursprungsniveau oder teilweise auch darunter. Der grundsätzliche Effekt des Ansteigens und dann wieder Abfallens ist auch im zweiten Durchlauf gegeben. Neue typgleiche Filter ohne vorherigen Einsatz in einer Lüftungstechnischen Anlage zeigen bei Variation der Feuchte keine relevanten Druckverluständerungen. Der Effekt der Druckverluständerung hängt also offensichtlich von den abgeschiedenen Partikeln ab.

Die Variation der relativen Feuchte hat auch Auswirkungen auf die Effizienz der Filter. In Abb. 4.29 wird die Retention der Filter bei 0,4 µm DEHS-Partikeln und Variation der Feuchte gezeigt. Um etwaige Kondensationseffekte bei der Effizienzmessung zu vermeiden, wurde diese nicht bei 90 % relativer Feuchte, sondern nur bei 50 % und 80 % durchgeführt. Es zeigt sich, dass die Retention bei 80 % Feuchte in allen Fällen geringer ist. 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. Hierbei sinkt die Retention allerdings noch weiter ab.



**Abb. 4.28: Druckverlust an beladenen Filtern bei Variation der relativen Feuchte**

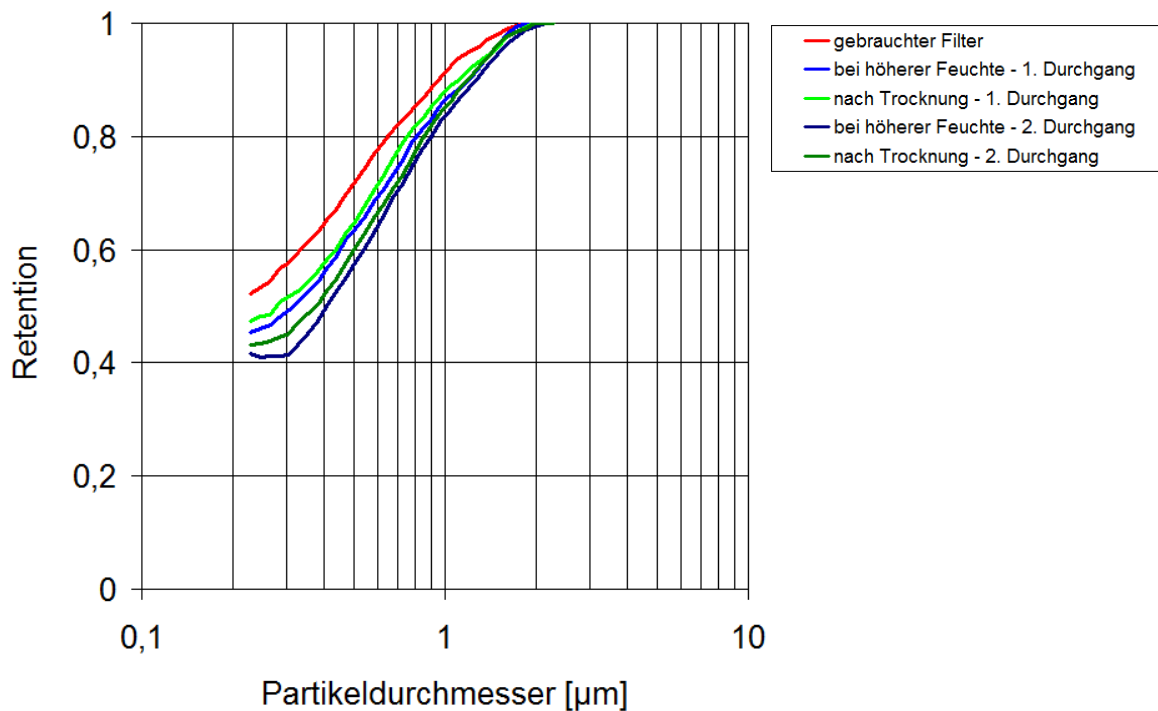


**Abb. 4.29: 0,4 μm-Effizienz an beladenen Filtern bei Variation der relativen Feuchte**

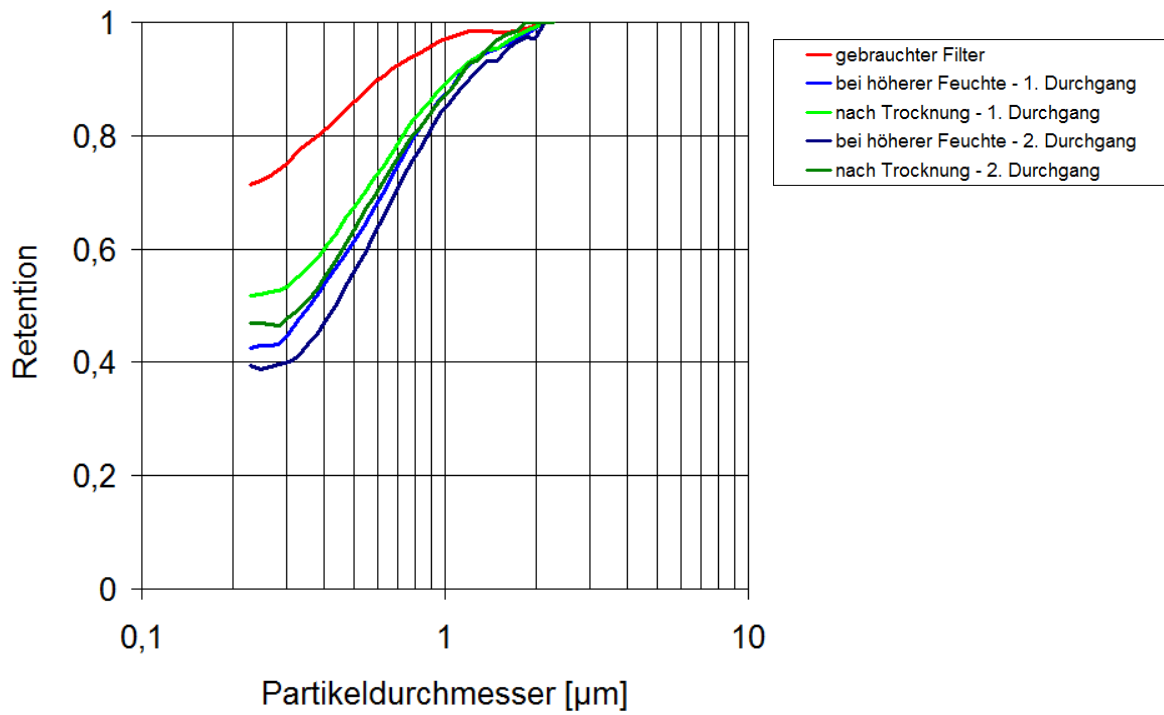
In Abb. 4.30 bis Abb. 4.32 werden die Fraktionsabscheidegrade in den unterschiedlichen Zuständen hinsichtlich der relativen Feuchte für die drei Filtertypen dargestellt. Das bereits bei dem diskreten Partikeldurchmesser von 0,4 μm zu erkennende Verhalten zeigt sich über den gesamten betrachteten Durchmesserbereich. Wie aus-

geprägt die Verminderung der Retention ist, ist offenbar abhängig vom Filtertypus bzw. vom verwendeten Filtermedium. Bei dem F7-Taschenfilter aus dem Synthetikfasermaterial ohne Elektretwirkung, dessen Filtervlies eine Schicht aus Feinstfasern beinhaltet, ist gegenüber dem F7-Taschenfilter aus dem Glasfasermaterial eine stärkere Verminderung der Retention festzustellen.

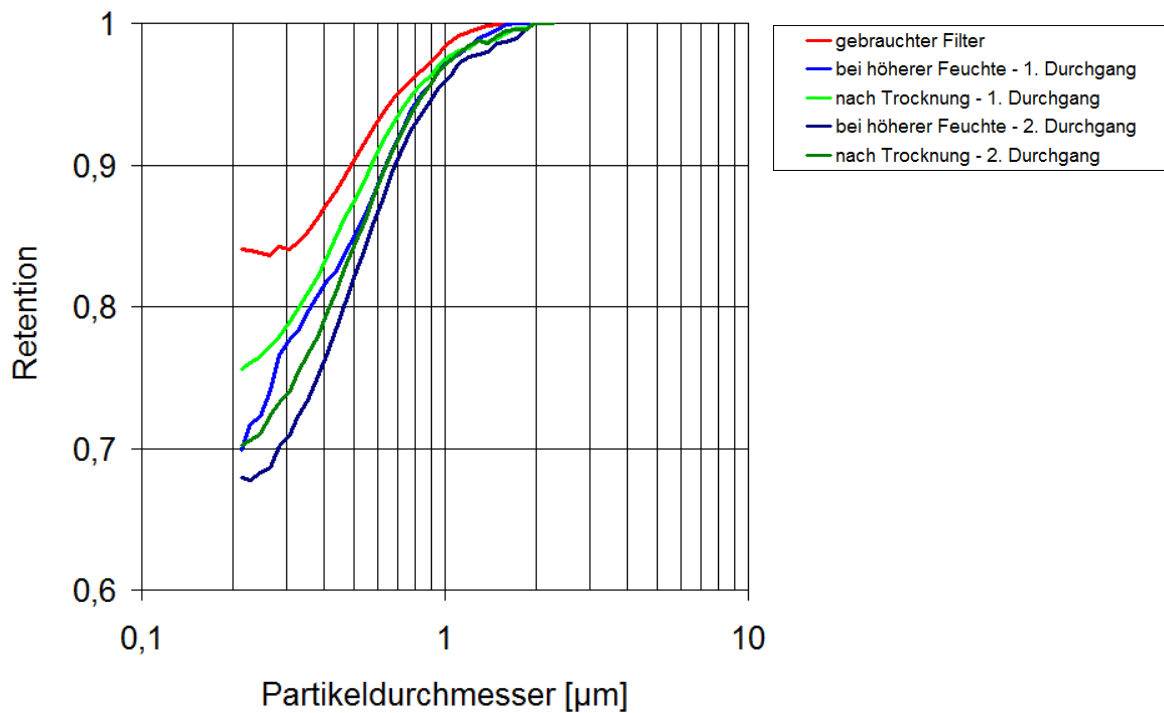
Der gebrauchte Filter aus dem Synthetikfasermaterial wies zu Beginn der Untersuchungen im Prüfstand allerdings eine höhere Retention auf als derjenige aus Glasfasermaterial. Im Neuzustand hatte er aber eine geringere Retention als dieser (Vergleiche hierzu auch Abb. 4.20, Abb. 4.19, in denen die Retention für diese beiden Filtertypen in verschiedenen Außenluft-Beladungsstadien gezeigt wurde).



**Abb. 4.30: F7-Taschenfilter (Glasfaser)**  
Effizienzen bei Variation der relativen Feuchte



**Abb. 4.31: F7-Taschenfilter (Synthetikfaser - ohne Elektretwirkung)**  
Effizienzen bei Variation der relativen Feuchte



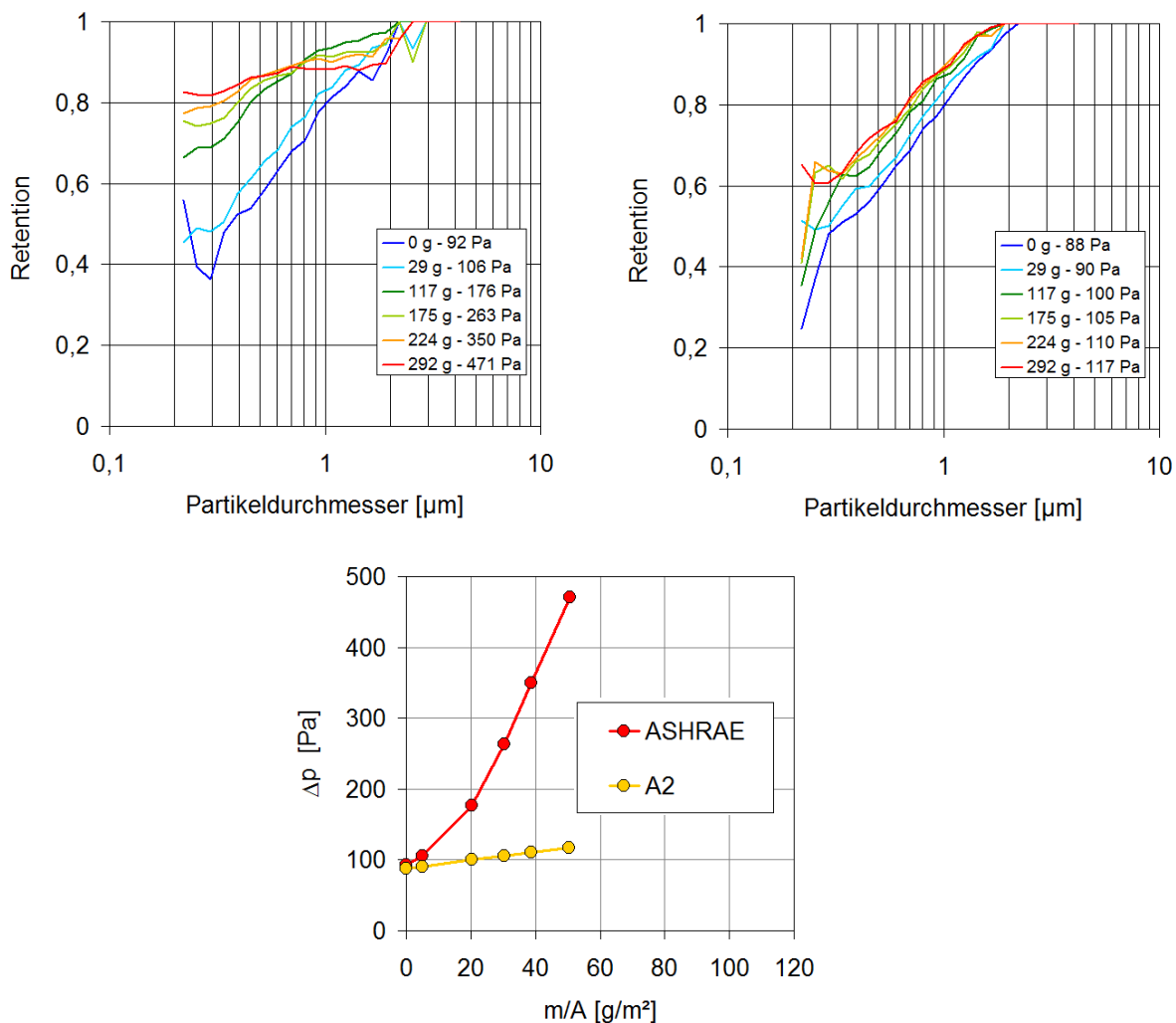
**Abb. 4.32: F9-Kassettenfilter (Glasfaser)**  
Effizienzen bei Variation der relativen Feuchte

Für die sich hinsichtlich des Druckverlustes und der Retention der beladenen Filter darstellende Phänomenologie bei Variation der Feuchte können folgende Hypothesen abgeleitet werden:

Im Filtervlies abgeschiedene Partikel werden umstrukturiert. Aus Salzen bestehende hygroskopische Anteile der abgeschiedenen Partikel gehen bei Überschreiten der jeweiligen Deliqueszenzfeuchte 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. Daraus erklärt sich, dass Druckverlust und Retention gegenüber dem ursprünglichen Zustand auch nach Trocknung anders sind. Detaillierte Untersuchungen zu der im Rahmen dieses Projektes nur angerissenen Phänomenologie werden im IGF-Projekt "Die Effizienz von Luftfiltern bei hohen relativen Feuchten und bei Beaufschlagung mit Wassertröpfchen (Hauptanwendungsbereich Gasturbinen)", AiF-FV Nummer 18292, angestellt.

#### 4.8 Beladung von RLT-Filtern mit ASHRAE-Staub und A2 am Normprüfstand und Bestimmung der Effizienz

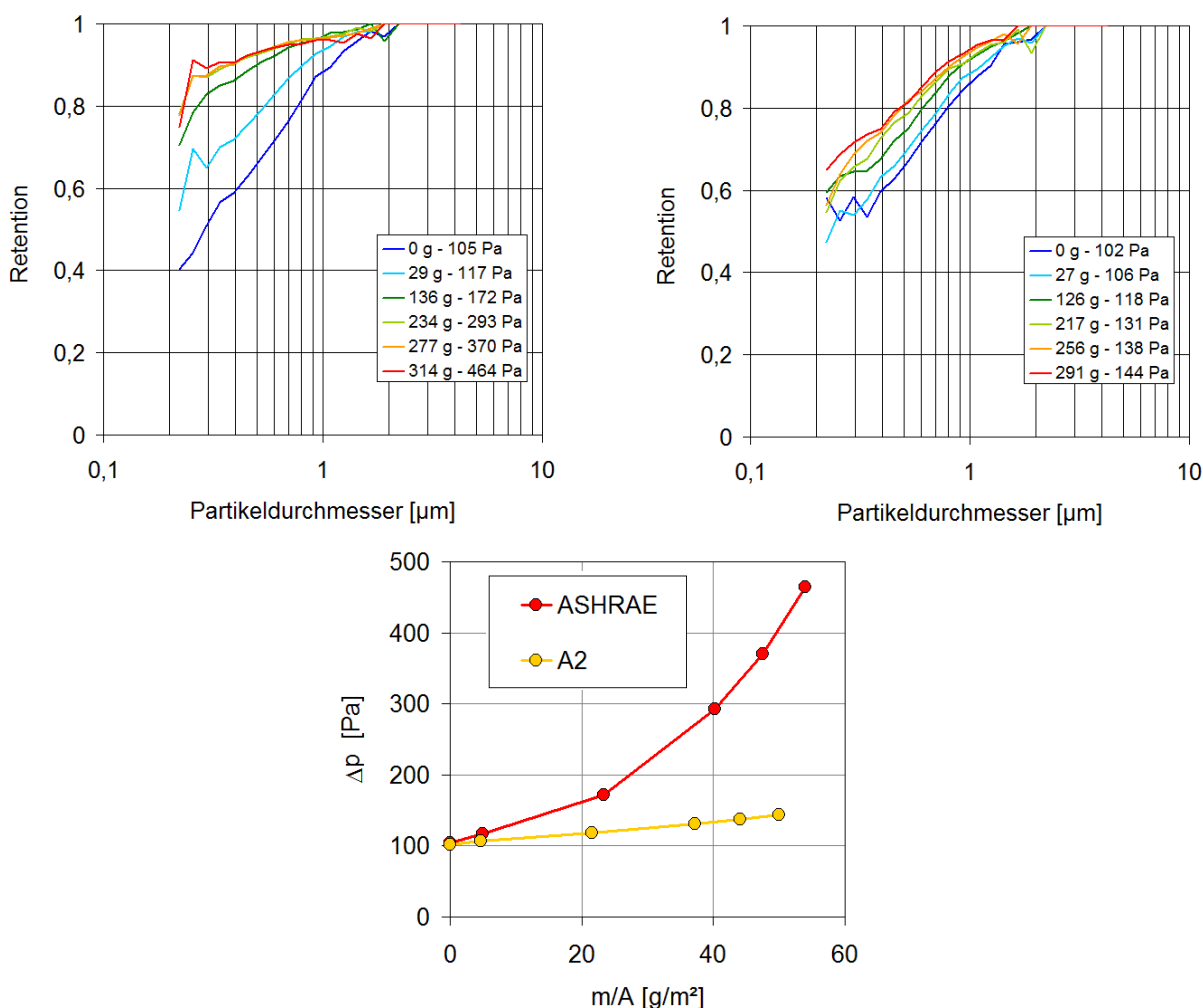
In den vorherigen Abschnitten wurden die Änderungen der Druckverluste und Fraktionsabscheidegrade von Taschenfilter aus Glas- und Synthetikfasern sowie Kassettenfiltern aus Glasfasern vorgestellt, die sich zwischen 3 und 21 Monaten im Realbetrieb befunden hatten (Abb. 4.18 bis Abb. 4.21). In diesem Abschnitt werden die Prüfergebnisse an typgleichen Filtern gezeigt, die am Normprüfstand mit ASHRAE- und A2-Staub beladen wurden. Die Abb. 4.33 bis Abb. 4.36 zeigen jeweils in den oberen beiden Diagrammen die DEHS-Effizienzen in den einzelnen Beladungsstufen und in dem unteren Diagramm den Druckverlust als Funktion der aufgegebenen, auf die Filterfläche bezogenen Staubmassen. Abb. 4.33 zeigt die Ergebnisse für den F7-Taschenfilter aus Synthetikfasern mit Elektretwirkung.



**Abb. 4.33: F7-Taschenfilter (Synthetikfaser mit Elektretwirkung)**  
 oben links: Effizienzen bei Beladung mit ASHRAE-Staub  
 oben rechts: Effizienzen bei Beladung mit A2-Staub  
 unten: Druckverlust als Funktion der Staubmasse bezogen auf die Filterfläche

Ein Filter wurde in einzelnen Beladungsschritten bis zum Enddruckverlust von 471 Pa mit ASHRAE-Staub beladen. Ein weiterer wurde mit A2-Staub beladen, wobei in den einzelnen Beladungsschritten vergleichbare Staubmassen wie beim ASHRAE-Staub realisiert wurden. Die Staubaufgabe erfolgte normkonform mit jeweils 70 mg/m<sup>3</sup>. Im Vergleich der Entwicklung des Fraktionsabscheidegrades mit den beiden unterschiedlichen Beladungsstäuben zeigt sich, dass der ASHRAE-Staub zu einem deutlich stärkeren Anstieg der Abscheideeffizienz führt. Der Druckverlust bei 3400 m<sup>3</sup>/h ist bei der letzten Beladungsstufe im Falle des ASHRAE-Staubes um 379 Pa - im Falle der A2-Beladung lediglich um 29 Pa - gegenüber dem Anfangszustand angestiegen.

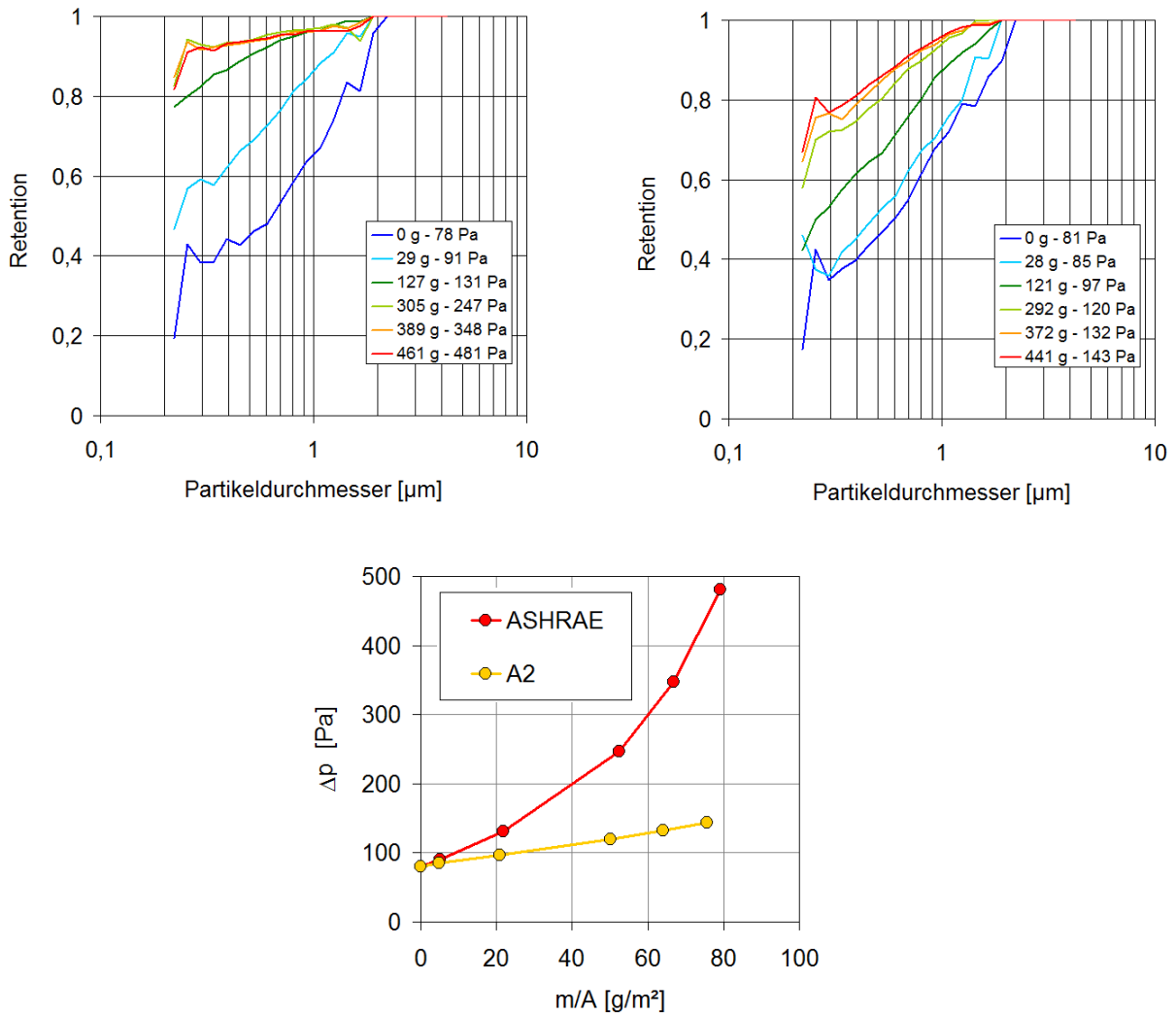
Abb. 4.34 zeigt die Ergebnisse für den F7-Taschenfilter aus Glasfasermaterial. Im Vergleich der Fraktionsabscheidegrade und der Druckverluste bei ASHRAE- und A2-Staubbeladung ergibt sich eine gleichartige Phänomenologie wie für den F7-Taschenfilter aus Synthetikfasermaterial.



**Abb. 4.34: F7-Taschenfilter (Glasfaser)**  
 oben links: Effizienzen bei Beladung mit ASHRAE-Staub  
 oben rechts: Effizienzen bei Beladung mit A2-Staub  
 unten: Druckverlust als Funktion der Staubmasse bezogen auf die Filterfläche

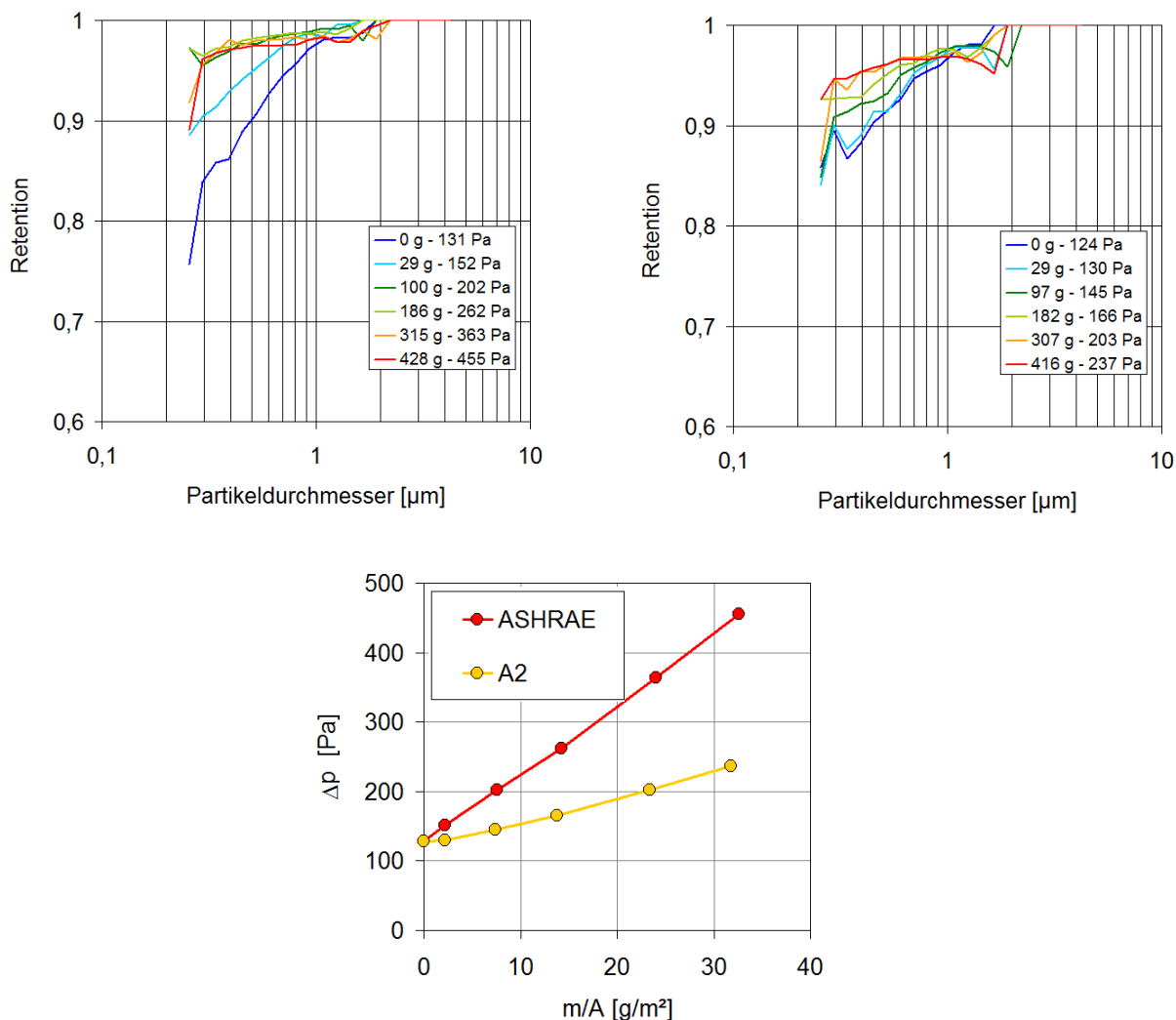


Auch für den F7-Taschenfilter aus Synthetikfasermaterial mit Feinstfasern ohne Elektretwirkung ergibt sich, wie in Abb. 4.35 zu erkennen ist, in der Fallunterscheidung zwischen den Stäuben ein qualitativ vergleichbares Bild.



**Abb. 4.35: F7-Taschenfilter (Synthetikfasermaterial mit Feinstfasern ohne Elektretwirkung)**  
 oben links: Effizienzen bei Beladung mit ASHRAE-Staub  
 oben rechts: Effizienzen bei Beladung mit A2-Staub  
 unten: Druckverlust als Funktion der Staubmasse bezogen auf die Filterfläche

Auch die Beladung von F9-Kassettenfiltern aus Glasfasermaterial zeigt ein vergleichbares Bild. In allen Fällen führt die Auswahl des ASHRAE-Staub für die Beladung zu deutlich höheren Druckverlusten und zu deutlich höheren Fraktionsabscheidungsgraden, als bei den Filtern aus dem Realbetrieb.



**Abb. 4.36: F9-Kassettenfilter (Glasfaser)**  
**oben links: Effizienzen bei Beladung mit ASHRAE-Staub**  
**oben rechts: Effizienzen bei Beladung mit A2-Staub**  
**unten: Druckverlust als Funktion der Staubmasse bezogen auf die Filterfläche**

Im folgenden Abschnitt 4.9 werden weiterführende Vergleiche der Messergebnisse der beiden Beladungsvarianten ASHRAE- und A2-Staub mit den Messergebnissen bei Beladung mit Ruß und denjenigen an den Filtern aus den Lüftungsanlagen vorgestellt.

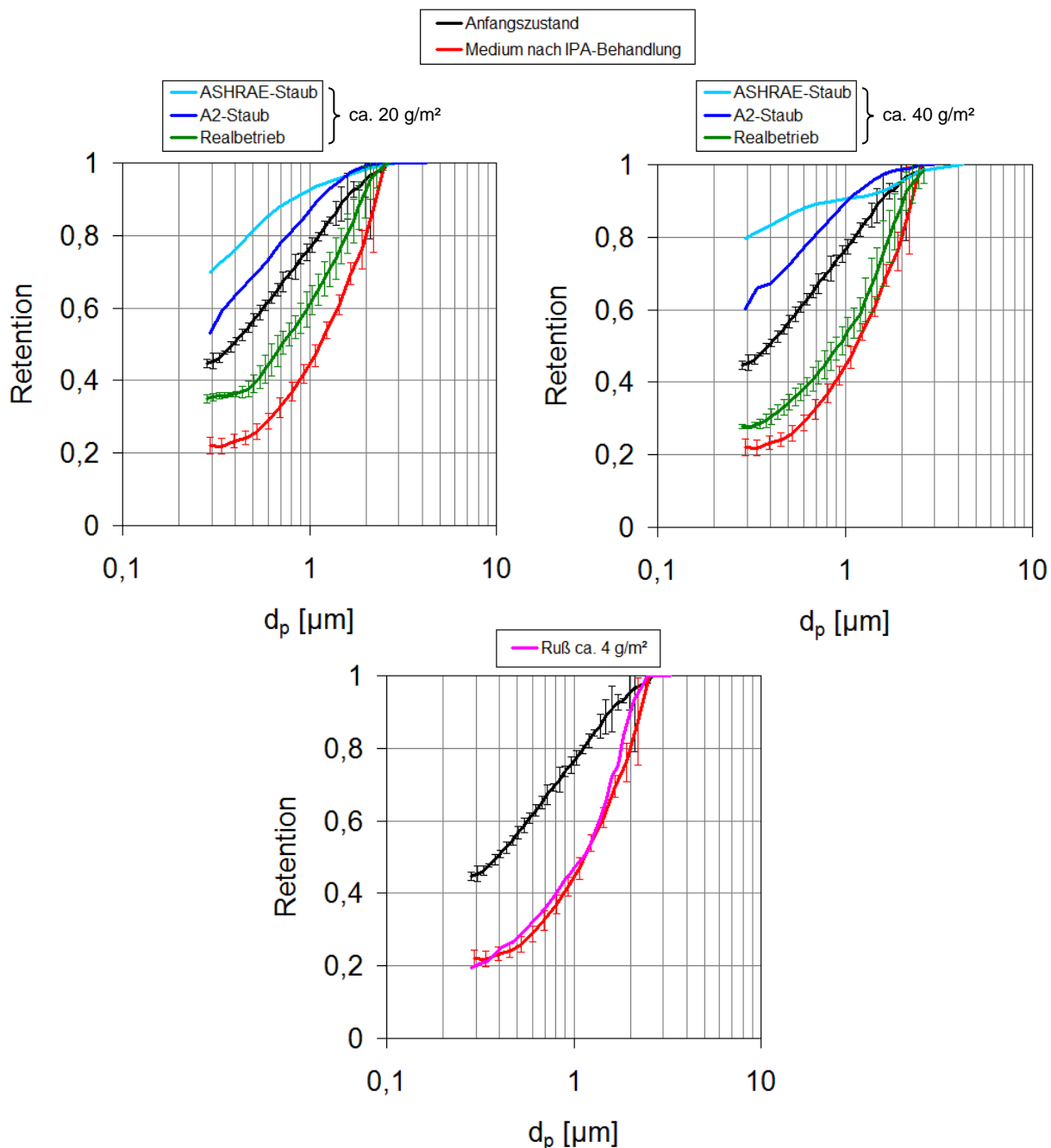
#### **4.9 Bewertung der unterschiedlichen Neutralisierungs- und Beladungsmethoden**

In diesem Abschnitt werden DEHS-Fraktionsabscheidegrade und Druckverluste bei Beladung mit ASHRAE- und A2-Staub mit denjenigen verglichen, die sich nach unterschiedlichen Nutzungsdauern der Filter in Lüftungsanlagen ergeben haben. Als Referenz werden dabei die Abscheideeffizienzen im Neuzustand der Filter und die an Medienproben ermittelten Minimaleffizienzen in die Gegenüberstellung aufgenommen. Ferner wird die Auswirkung der Beladung der Filter mit Rußpartikeln in der vergleichenden Bewertung berücksichtigt.

Die Ergebnisse für einen F7-Taschenfilter aus Synthetikfasern mit Elektretwirkung sind in Abb. 4.37 bis Abb. 4.39 dargestellt. Die beiden oberen Diagramme in Abb. 4.37 zeigen für Beladungen von ca. 20 g/m<sup>2</sup> und ca. 40 g/m<sup>2</sup> die DEHS-Fraktionsabscheidegrade. Die Beladung mit ASHRAE-Staub (hellblaue Kurve) führt zu einer signifikanten Erhöhung der Effizienz im Vergleich zum Neuzustand (schwarze Kurve). Die Beladung mit A2-Staub (dunkelblaue Kurve) führt ebenfalls zu einer Erhöhung der Effizienz, während die Beladung der Filter in der Lüftungsanlage zu einer kontinuierlichen Reduzierung (grüne Kurve) führt, die sich der Minimaleffizienz (rote Kurve) annähert. Im unteren Diagramm erkennt man, dass die Beladung mit ca. 4 g/m<sup>2</sup> Ruß ebenfalls zu einer Effizienz auf dem Niveau der Minimaleffizienz führt.

Die 0,4 µm DEHS-Effizienz als Funktion der auf die Filterfläche bezogenen abgeschiedenen Partikelmasse für die unterschiedlichen Beladungsfälle wird in Abb. 4.38 gezeigt. Ausgehend von einer Retention im Neuzustand bei ca. 0,5 weisen die drei Filter nach 3,5 Monaten (türkise Punkte), 8 Monaten (dunkelgrüne Punkte) und 18 Monaten (hellgrüne Punkte) Nutzungsdauer in der Lüftungsanlage Retentionswerte zwischen 0,27 und 0,38 auf. Die Elektretwirkung der Filter ist innerhalb der ersten 3 Monate Nutzungsdauer in weiten Teilen verloren gegangen. Teilweise wird die Minimaleffizienz für F7-Filter von 0,35 (magentafarbene Linie) unterschritten. Der Retentionswert, der an den IPA-behandelten Proben als Minimaleffizienz ermittelt wurde (rot gestrichelte Linie), beträgt ca. 0,23. Die Filter, die bereits vor Inkrafttreten der EN 779:2012 geliefert wurden, entsprechen somit eigentlich nicht mehr der Filterklasse F7. Die ASHRAE- (rote Kurve) und die A2-Staubbeladung (gelbe Kurve) führen im Vergleich zum Realbetrieb zu unrealistisch hohen Werten. Die Rußbeladung (schwarze Datenpunkte) führt bei ca. 4 g/m<sup>2</sup> zu einer Retention auf dem Niveau der Minimaleffizienz, d. h. auch mit Rußbeaufschlagung ist eine Entladung vergleichbar der Entladung nach IPA-Bad möglich. Erfolgt nach Rußbeladung eine Beladung mit A2-Staub (orange Kurve) ergibt sich ein ähnlicher Kurvenverlauf, wie bei A2-Beladung am Filter im Neuzustand (gelbe Kurve), nur parallel nach unten verschoben, beginnend auf dem Niveau der Minimaleffizienz.

Abb. 4.39 zeigt den Druckverlust als Funktion der auf die Filterfläche bezogenen Partikelmasse für die unterschiedlichen Fälle. Eine Beladung mit ASHRAE-Staub führt auch hinsichtlich des Druckverlustes zu einer signifikanten Über-prognostizierung im Vergleich zum Realbetrieb. Die anderen Beladungsvarianten haben nur einen sehr geringen Druckverlustanstieg zur Folge, der im Bereich der Druckverlustzunahme ist, die sich auch an den Filtern aus dem Realbetrieb darstellt.



**Abb. 4.37: F7-Taschenfilter, Synthetikfaser mit Elektretwirkung, DEHS-Fraktionsabscheidegrad: ASHRAE- und A2-Beladungsstadien, Minimum bei 18 monatigem Realbetrieb sowie bei Ruß-Beladung im Vergleich zum Anfangszustand und zu IPA-behandelten Medienproben**

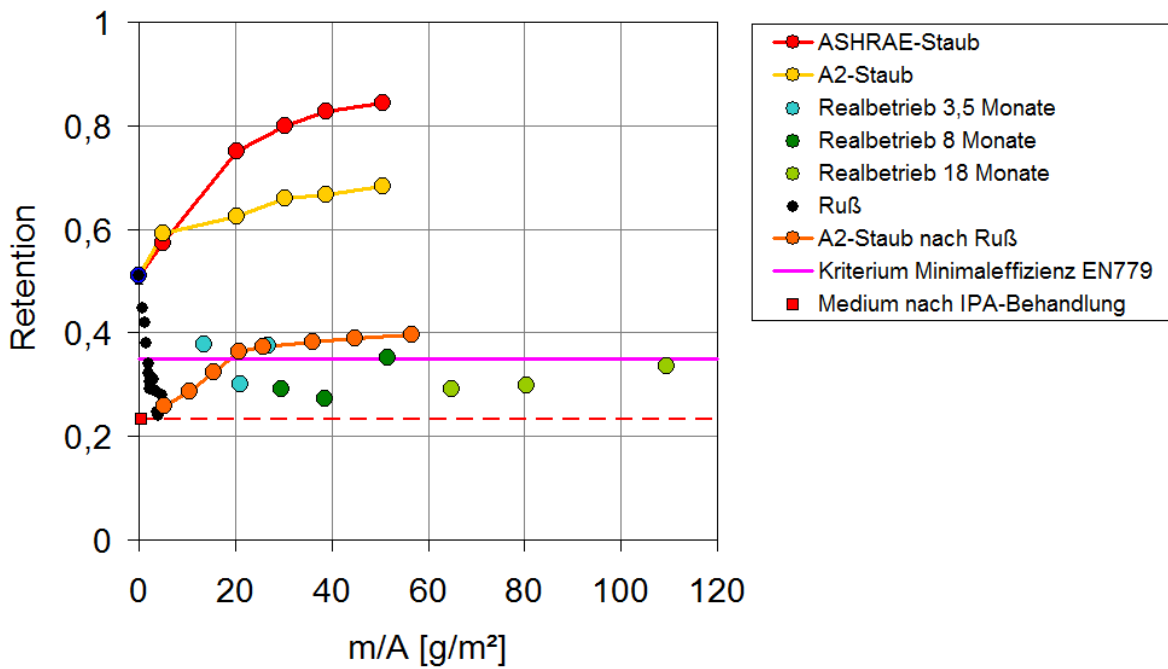


Abb. 4.38: F7-Taschenfilter, Synthetikfaser mit Elektretwirkung, 0,4 µm-DEHS-Effizienz =  $f(\text{Partikelmasse} / \text{Filterfläche})$ : ASHRAE- und A2-Beladung, Realbetrieb sowie Ruß-Beladung

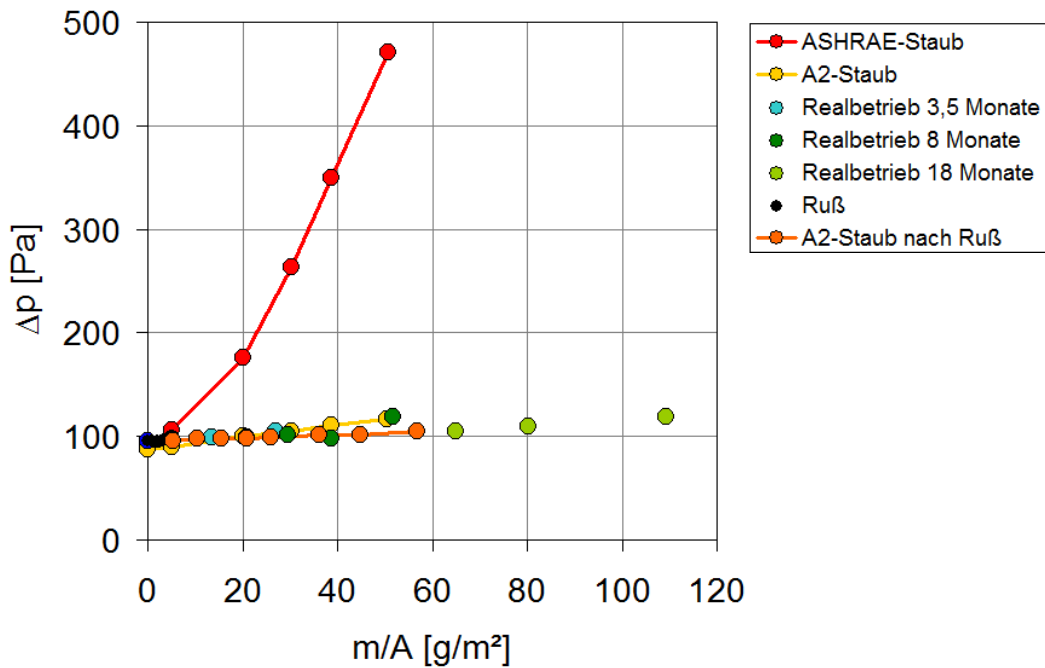
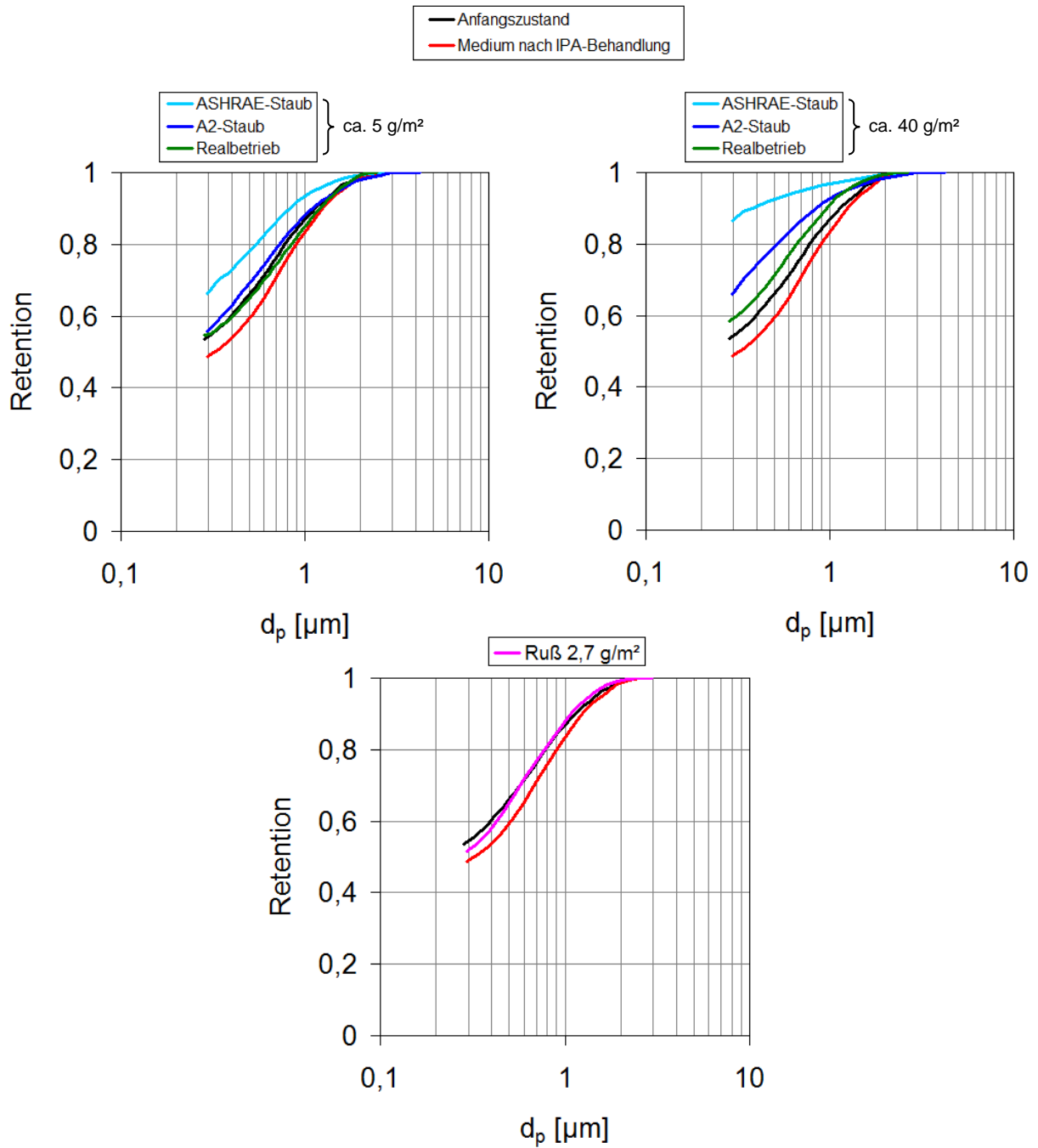


Abb. 4.39: F7-Taschenfilter, Synthetikfaser mit Elektretwirkung,  $\Delta p = f(\text{Partikelmasse} / \text{Filterfläche})$ : ASHRAE- und A2-Beladung, Realbetrieb sowie Ruß-Beladung

In Abb. 4.40 werden die Fraktionsabscheidegrade für einen F7-Glasfaser-Taschenfilter vergleichend gegenübergestellt. In den beiden oberen Diagrammen ist zu erkennen, dass eine Beladung mit ASHRAE-Staub (hellblaue Kurve) bereits bei ca. 5 g/m<sup>2</sup> zu einer Überprognostizierung der Abscheideeffizienz gegenüber der Realbeladung (grüne Kurve) führt. Bei A2-Beladung (dunkelblaue Kurve) ist die Effizienz noch ungefähr auf dem Niveau der Effizienz des Filters im Neuzustand (schwarze Kurve). In dem Beladungsstadium mit ca. 40 g/m<sup>2</sup> hat sich eine geringfügige Verbesserung der Effizienz der Filter aus dem Realbetrieb eingestellt. Hier wird die Effizienz sowohl bei A2- als auch insbesondere bei ASHRAE-Beladung überbewertet. Im unteren Diagramm ist zu erkennen, dass eine Rußbeladung (magentafarbene Kurve) bis ca. 2,7 g/m<sup>2</sup> zu keiner Änderung im Vergleich zum Anfangszustand führt.

In Abb. 4.41 wird die Veränderung der 0,4 µm DEHS-Effizienz mit zunehmender Beladung für die unterschiedlichen Varianten präsentiert. Die Retention der hier betrachteten vier Filter aus dem Realbetrieb liegt nach 3 und 9 Monaten Nutzungsdauer, wie im Anfangszustand, bei ca. 0,6. Nach 16 und 21 Monaten ergibt sich eine geringfügige Verbesserung. Die Retentionswerte der ASHRAE- und der A2-Beladung liegen durchweg höher, wobei auch bei diesem Filtertyp die ASHRAE-Beladung zu einer ausgeprägten Überbewertung führt. Im Falle der Rußbeladung ergibt sich keine Änderung im Vergleich zum Anfangszustand. Die Unterschiede liegen im Bereich der Messunsicherheit.

Wie schon beim vorher betrachteten F7-Synthetikfaserfilter mit Elektretwirkung, führt eine Beladung mit ASHRAE-Staub auch am F7-Glasfaserfilter hinsichtlich des Druckverlustes zu einer signifikanten Überprognostizierung im Vergleich zum Realbetrieb (Abb. 4.42). Der Druckverlust bei Beladung mit A2-Staub korrespondiert hingegen gut mit demjenigen der Filter aus den Lüftungsanlagen.



**Abb. 4.40: F7-Taschenfilter, Glasfaser, DEHS-Fraktionsabscheidegrad: ASHRAE- und A2-Beladungsstadien, Minimum bei 18 monatigem Realbetrieb sowie bei Ruß-Beladung im Vergleich zum Anfangszustand und zu IPA-behandelten Medienproben**

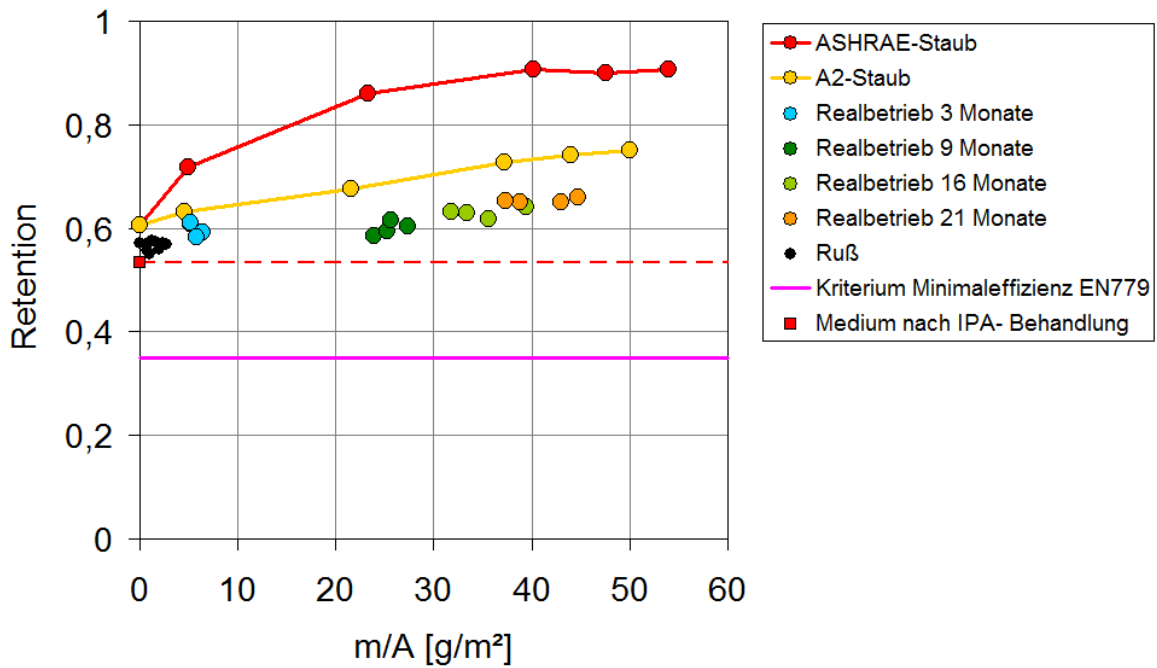


Abb. 4.41: F7-Taschenfilter, Glasfaser,  
 0,4 µm-DEHS-Effizienz = f(Partikelmasse / Filterfläche):  
 ASHRAE- und A2-Beladung, Realbetrieb sowie Ruß-Beladung

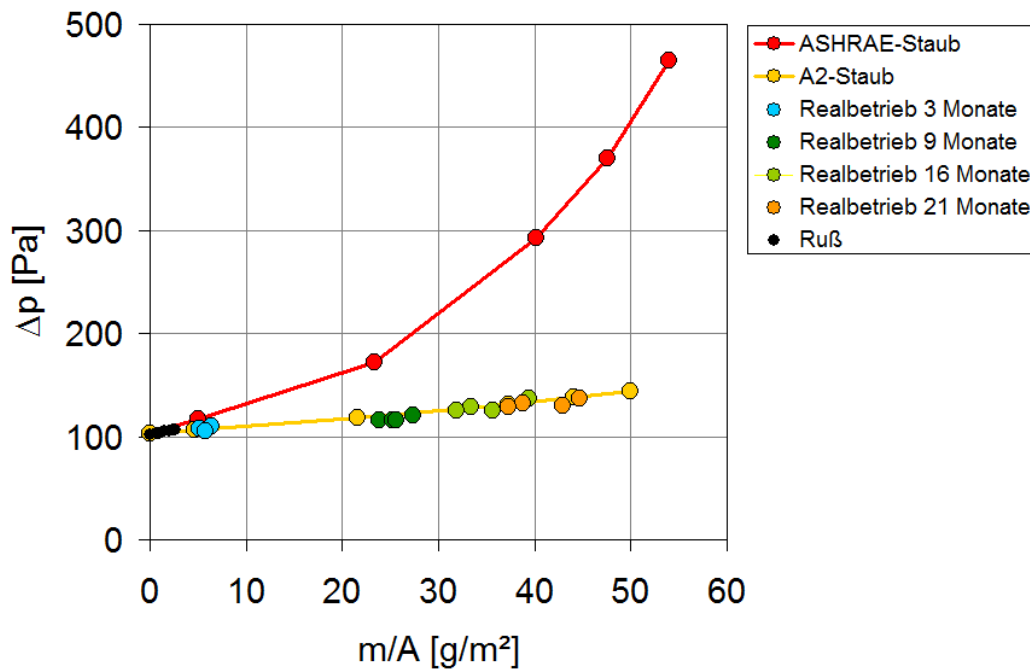


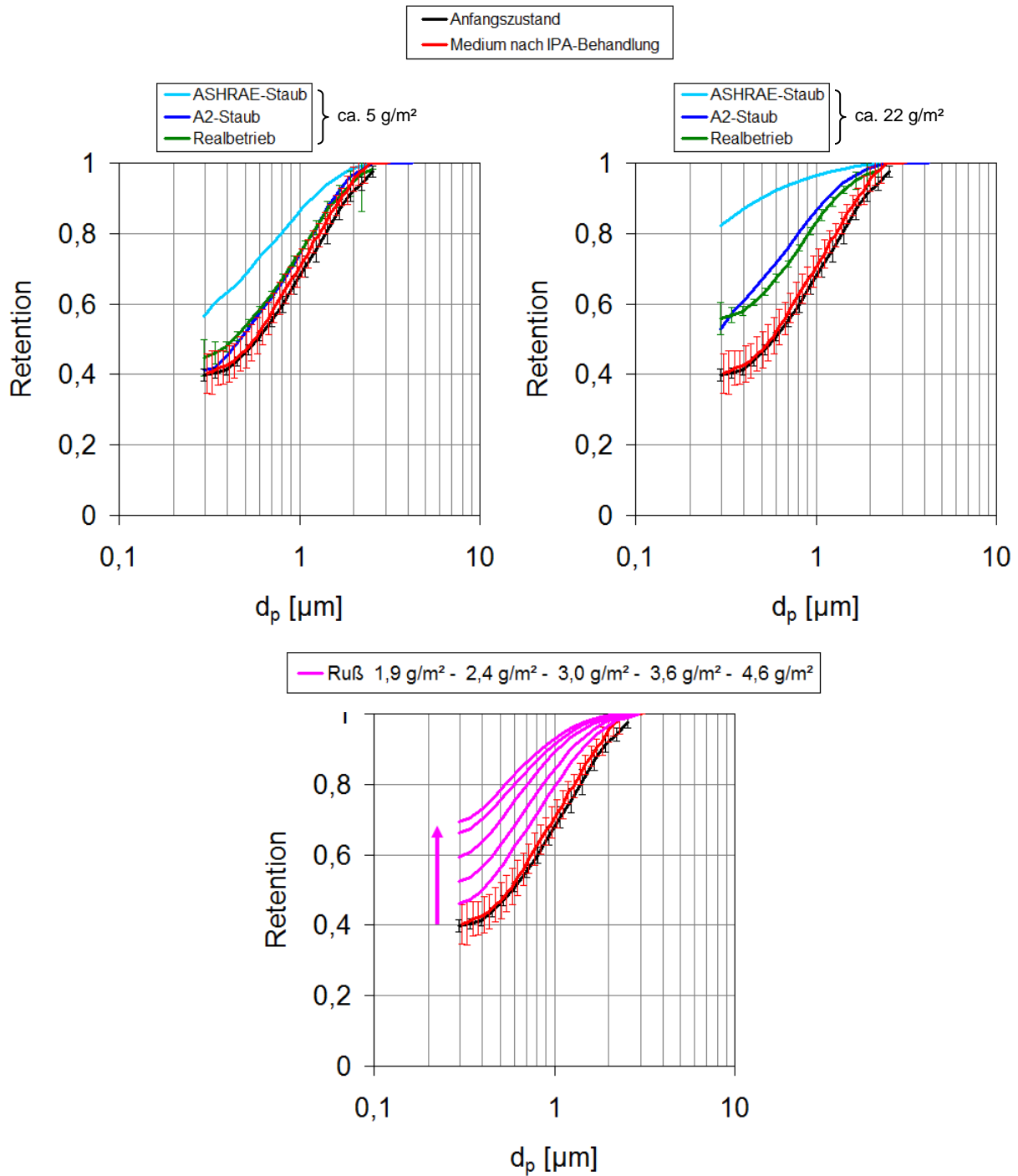
Abb. 4.42: F7-Taschenfilter, Glasfaser,  
 Δp = f(Partikelmasse / Filterfläche):  
 ASHRAE- und A2-Beladung, Realbetrieb sowie Ruß-Beladung



Für F7-Taschenfilter aus Synthetikfasern ohne Elektretwirkung mit einer Feinstfaser-schicht sind in Abb. 4.43 die Fraktionsabscheidegrade für die unterschiedlichen Belastungsvarianten vergleichend gegenübergestellt. Während die Retention bei ASHRAE-Beladung (hellblaue Kurve) in beiden Beladungsstadien (5 g/m<sup>2</sup> und 22 g/m<sup>2</sup>) höher liegt als beim Realbetrieb (grüne Kurve), bildet die A2-Beladung (dunkelblaue Kurve) die sukzessive Änderung gegenüber dem Anfangszustand adäquat ab. Für die Rußbeladung werden im unteren Diagramm DEHS-Fraktion-abscheidegrade in unterschiedlichen Stadien dargestellt. Es ist eine kontinuierliche Verbesserung der Abscheideeffizienz zu verzeichnen.

Abb. 4.44 zeigt die Veränderung der 0,4 µm DEHS-Effizienz mit zunehmender Belastung für diesen Filtertyp. Anders als bei den beiden bisher betrachteten Filtertypen, steigt die Abscheideeffizienz der Filter aus dem Realbetrieb signifikant an. Bei ASHRAE-Beladung wird die Retention im Vergleich zum Realbetrieb auch bei diesem Filtertyp überbewertet. Die A2-Beladung führt hier allerdings nicht zu einer Überprognostizierung. Die Veränderung der Retention ist zunächst in vergleichbarer Größenordnung wie beim Realbetrieb. In späteren Stadien ergibt sich tendenziell eher eine Unterbewertung. Auch die Rußbeladung führt bei diesem Filtertyp zu einer anderen Charakteristik als bei den beiden bisher betrachteten Typen. Hierbei ist anzumerken, dass der für diese Untersuchung verwendete Filter (gleiche Produktionscharge!) eine niedrigere Abscheideeffizienz im Anfangszustand aufwies, als diejenigen, die der ASHRAE- bzw. A2-Beladung unterzogen wurden. Die Retention bei der Rußbeladung steigt sogar noch stärker an als im Fall der ASHRAE-Beladung. Eine Beladung mit A2-Staub (orange Kurve) nach Rußbeladung ergibt einen ähnlichen Kurvenverlauf wie bei A2-Beladung am Filter im Neuzustand (gelbe Kurve), der auf dem Niveau des letzten Rußbeladungsschrittes beginnt.

Auch hinsichtlich des Druckverlustes (Abb. 4.45) ergibt sich im Vergleich der Belastungsvarianten eine andere Phänomenologie als bei den beiden bisher betrachteten Filtertypen. Der Realbetrieb führt hier zu einem starken Druckverlustanstieg, der tendenziell eher mit dem der ASHRAE-Staubbeladung korrespondiert. Die A2-Beladung bewertet den Druckverlust im Vergleich zum Realbetrieb unter. Die Rußbeladung, die bis zu einem Stadium von 4,6 g/m<sup>2</sup> durchgeführt wurde, resultiert in einem steileren Anstieg der Kurve als bei ASHRAE-Beladung und stellt demzufolge eine Überbewertung im Vergleich zum Realbetrieb dar. Erfolgt eine A2-Beladung nach Rußbeladung, ergibt sich eine Druckverlustkurve die parallel zu der Kurve nach oben verschoben ist, die sich bei A2-Beladung ohne vorherige Rußbeladung ergibt.



**Abb. 4.43:** F7-Taschenfilter, Synthetikfaser ohne Elektretwirkung mit Feinstfasern, DEHS-Fraktionsabscheidegrad: ASHRAE- und A2-Beladungsstadien, Minimum bei 18 monatigem Realbetrieb sowie bei Ruß-Beladung im Vergleich zum Anfangszustand und zu IPA-behandelten Medienproben

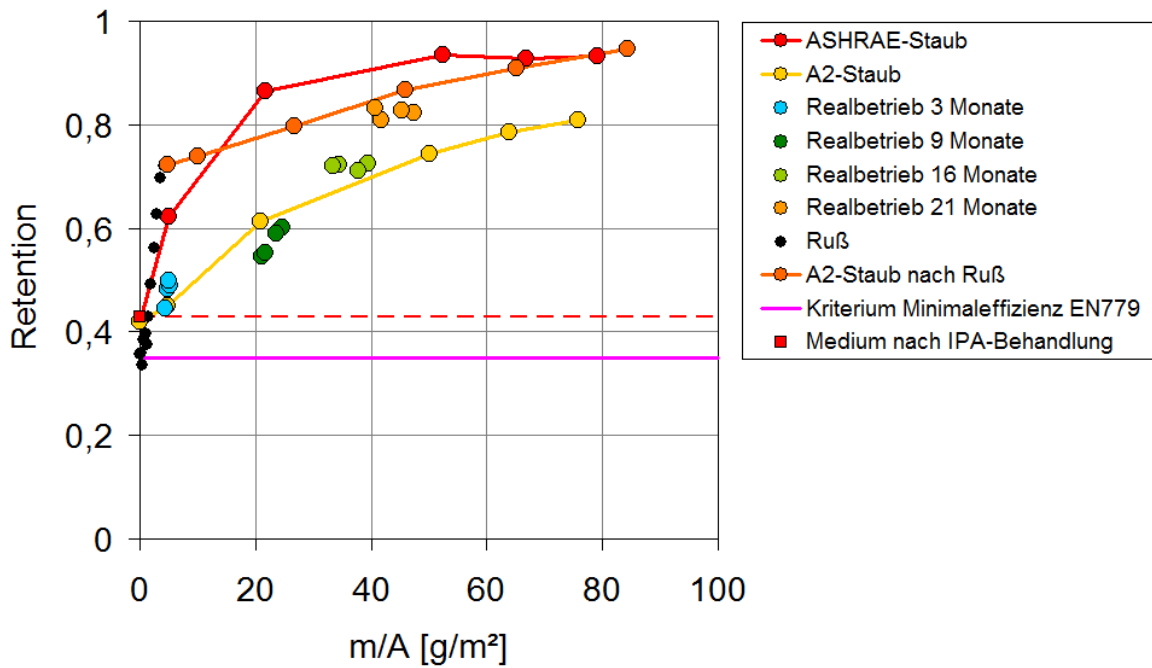


Abb. 4.44: F7-Taschenfilter, Synthetikfaser ohne Elektretwirkung mit Feinstfasern, 0,4 µm-DEHS-Effizienz =  $f(\text{Partikelmasse} / \text{Filterfläche})$ : ASHRAE- und A2-Beladung, Realbetrieb sowie Ruß-Beladung

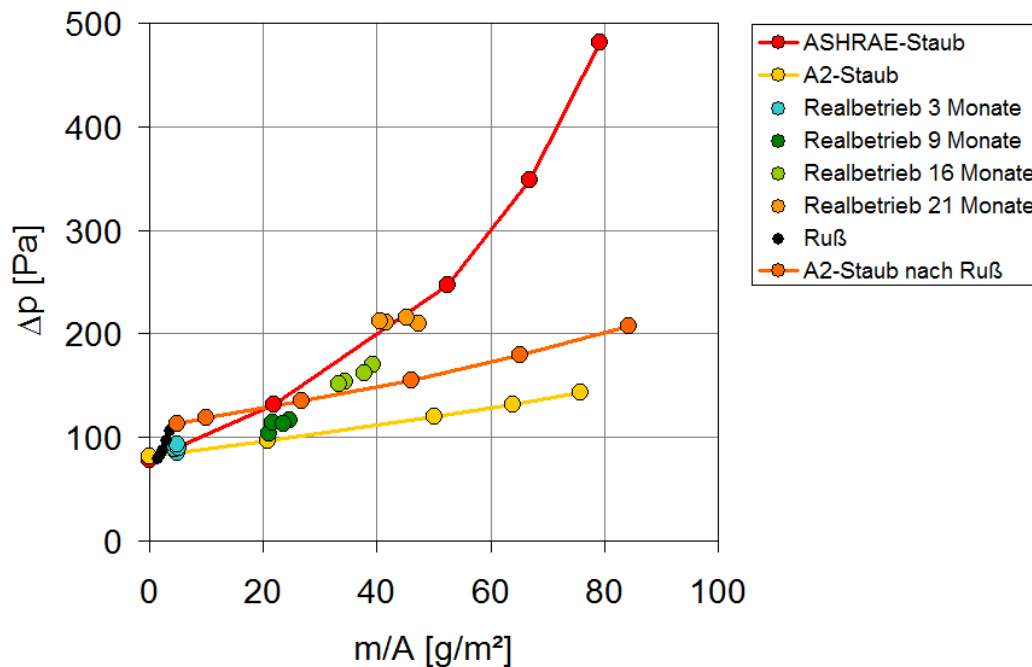


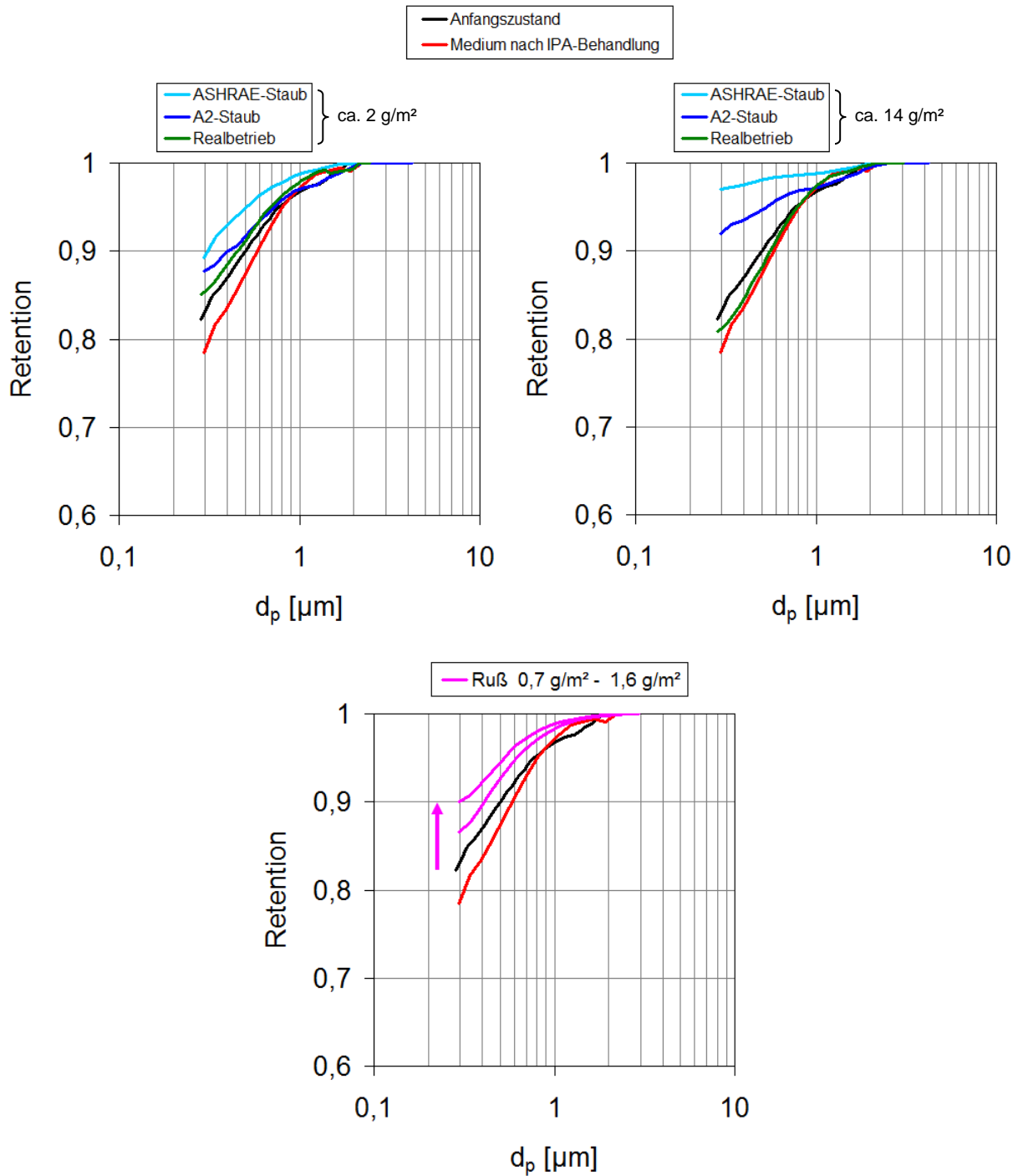
Abb. 4.45: F7-Taschenfilter, Synthetikfaser ohne Elektretwirkung mit Feinstfasern,  $\Delta p = f(\text{Partikelmasse} / \text{Filterfläche})$ : ASHRAE- und A2-Beladung, Realbetrieb sowie Ruß-Beladung

Die Fraktionsabscheidegrade für F9-Kassettenfilter aus Glasfasern sind in Abb. 4.46 vergleichend gegenübergestellt. In beiden Beladungsstadien bei ca. 2 g/m<sup>2</sup> und ca. 14 g/m<sup>2</sup> hat sich die Kurve des DEHS-Fraktionsabscheidegrads bei Realbeladung gegenüber dem Anfangszustand nicht relevant verändert. Unterschiede zwischen der Effizienz im Anfangszustand, der am Medium ermittelten Minimaleffizienz und der Effizienz an den Filtern aus dem Realbetrieb liegen im Bereich der Streuung. Auf Fehlerbalken wurde aus Gründen der Anschaulichkeit verzichtet. Im ersten der beiden Beladungsstadien liegt auch die Retentionskurve der A2-Beladung auf einem vergleichbaren Niveau. Diejenige der ASHRAE-Beladung liegt etwas höher. Im zweiten Beladungsstadium sind sowohl der Fraktionsabscheidegrad der A2-Beladung als auch insbesondere derjenige der ASHRAE -Beladung auf einem höheren Niveau als im Falle des Realbetriebs.

Bei Rußbeladung (unteres Diagramm) ist eine sukzessive Verbesserung im Vergleich zum Anfangszustand zu verzeichnen.

Die Veränderung der 0,4 µm DEHS-Effizienz mit zunehmender Beladung (Abb. 4.47) für diesen Filtertyp zeigt die Überbewertung bei ASHRAE- und A2-Beladung gegenüber dem Realbetrieb auf. Im Falle der Rußbeladung korrespondiert die Steigung mit derjenigen der Kurve der ASHRAE-Beladung. Eine Beladung mit A2-Staub (orange Kurve) nach Rußbeladung ergibt einen parallel nach oben verschobenen Kurvenverlauf gegenüber der Kurve der A2-Beladung am Filter im Neuzustand (gelbe Kurve).

Die Veränderung des Druckverlustes (Abb. 4.48) der Filter aus dem Realbetrieb wird durch die A2-Beladung gut abgebildet. Die ASHRAE-Beladung und insbesondere die Rußbeladung führen zu deutlich steileren Kurvenverläufen. Die Druckverlustkurve bei A2-Beladung nach Rußbeladung ist gegenüber der Kurve, die sich ohne vorherige Rußbeladung ergibt, parallel nach oben verschoben.



**Abb. 4.46: F9-Kassettenfilter, Glasfaser, DEHS-Fraktionsabscheidegrad: ASHRAE- und A2-Beladungsstadien, Minimum bei 18 monatigem Realbetrieb sowie bei Ruß-Beladung im Vergleich zum Anfangszustand und zu IPA-behandelten Medienproben**

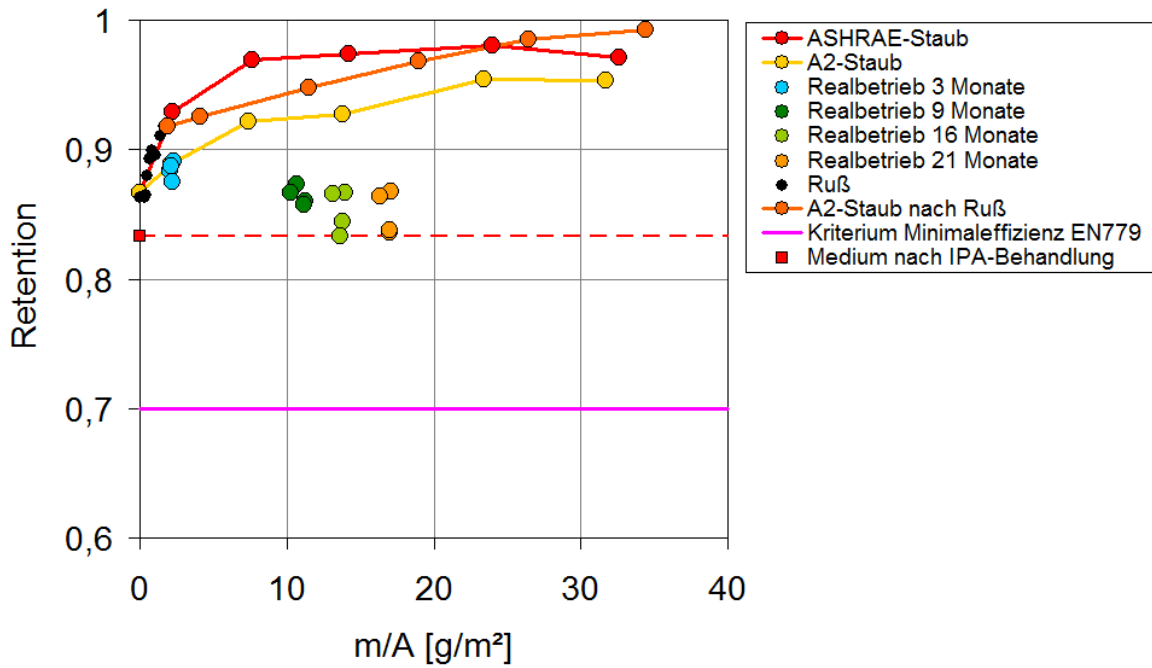


Abb. 4.47: F9-Kassettenfilter, Glasfaser,  
 $0,4 \mu\text{m-DEHS-Effizienz} = f(\text{Partikelmasse} / \text{Filterfläche})$ :  
 ASHRAE- und A2-Beladung, Realbetrieb sowie Ruß-Beladung

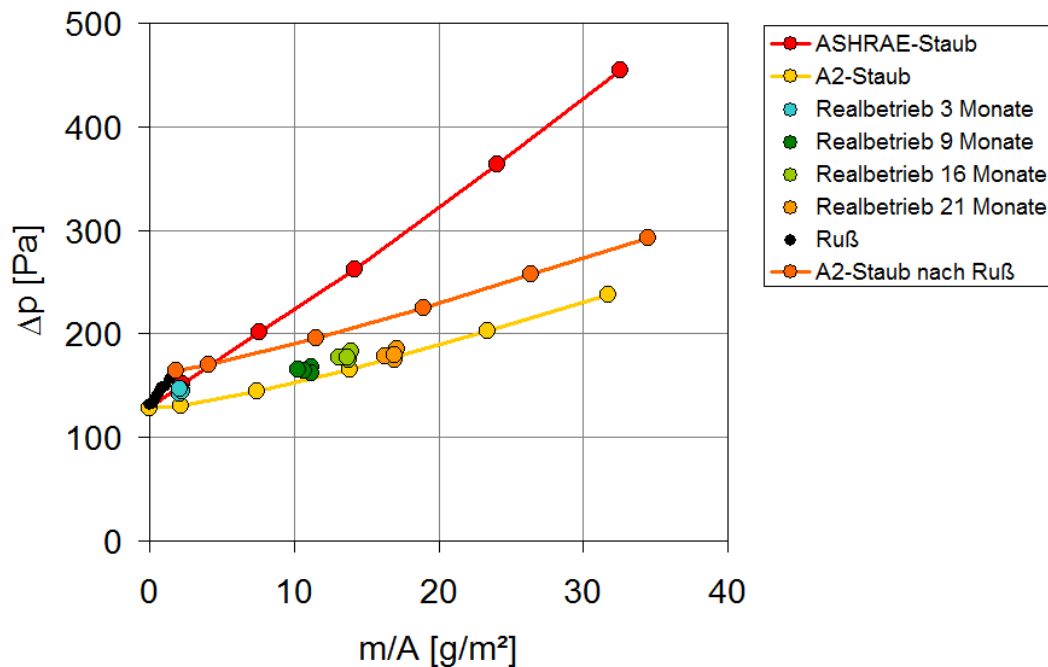


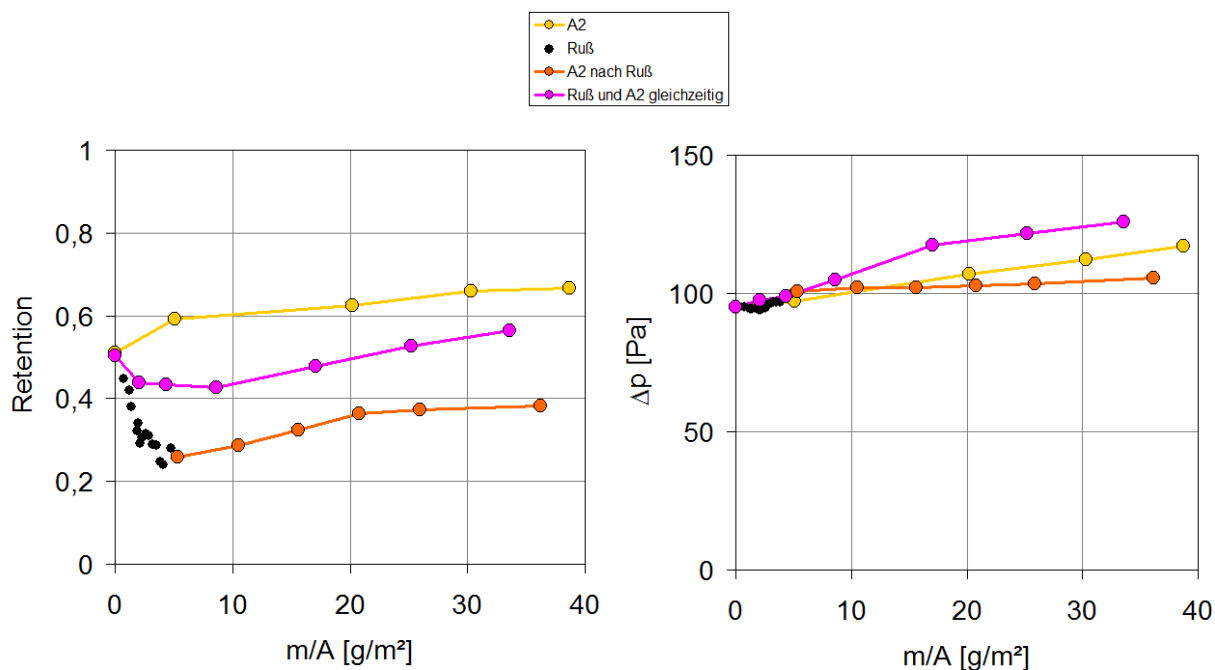
Abb. 4.48: F9-Kassettenfilter, Glasfaser,  
 $\Delta p = f(\text{Partikelmasse} / \text{Filterfläche})$ :  
 ASHRAE- und A2-Beladung, Realbetrieb sowie Ruß-Beladung

Zusätzlich zu der beschriebenen sequentiellen Beaufschlagung der Filter mit Ruß und A2-Staub wurde als weitere Neutralisierungs- und Beladungsmethode die gleichzeitige Aufgabe von Ruß und A2 untersucht. Diese Untersuchung erfolgte an den beiden Filtertypen, die bei der Beaufschlagung ausgeprägtere Änderungen der Filtrationseigenschaften aufwiesen. Dies waren die F7-Taschenfilter aus Synthetikfasermaterial mit Elektreteigenschaften und die F7-Taschenfilter ebenfalls aus Synthetikfasermaterial aber ohne Elektreteigenschaften, die eine Feinstfaserschicht im Vlies beinhalten. In den beiden nachfolgenden Abb. 4.49 und Abb. 4.50 sind jeweils im linken Diagramm die 0,4 µm-DEHS-Effizienz und im rechten der Druckverlust als Funktion der auf die Filterfläche bezogenen Partikelmasse dargestellt. Die Ergebnisse bei zeitgleicher Zudosierung von Ruß und A2 in den Prüfkanal werden denjenigen bei sequentieller gegenübergestellt. Ferner werden zum Vergleich die Ergebnisse bei ausschließlicher A2-Zudosierung gezeigt.

Im linken Diagramm der Abb. 4.49 ist zu erkennen, dass bei zeitgleicher Zudosierung (magentafarbene Kurve) zunächst ein Absinken der Retention von 0,5 auf ca. 0,4 zu verzeichnen ist. Bei der Rußbeladung (schwarze Punkte) sinkt die Retention demgegenüber bis auf ca. 0,25. Für größere Partikelmassen hat die Kurve für die zeitgleiche Zudosierung von Ruß und A2 einen ähnlichen, parallel nach oben verschobenen Verlauf, wie diejenige für A2 nach Ruß (orange Kurve). Sie liegt unterhalb der Kurve für die ausschließliche A2-Beladung (gelbe Kurve), bei der zu Beginn kein Absinken der Retention auftritt. Der Kurvenverlauf bei der zeitgleichen Zudosierung wird durch das Mischungsverhältnis von Ruß und A2 bestimmt. Bei den für den Versuch gewählten Massenkonzentrationen von ca. 2 mg/m<sup>3</sup> Ruß und ca. 7 mg/m<sup>3</sup> A2 kommt es nicht zu einem kompletten Verlust der Elektretwirkung, bevor die zunehmende Beladung wieder zu einer Verbesserung der Abscheideeffizienz führt. Bei ca. 25 g/m<sup>2</sup> Partikelmasse bezogen auf die Filterfläche liegt die 0,4 µm-DEHS-Effizienz wieder auf dem Niveau des Anfangszustandes.

Der Druckverlustanstieg (rechtes Diagramm) bei zeitgleicher Zudosierung ist etwas höher als bei den beiden anderen betrachteten Beladungsvarianten.

An den Elektretfiltern aus dem Realbetrieb wurden auch nach 18-monatiger Einsatzdauer nur sehr moderate Druckverlustanstiege festgestellt (siehe Abb. 4.39). Die Abscheideeffizienz hat sich über die gesamte Betriebszeit nicht wieder auf das Niveau des Anfangszustandes verbessert (siehe Abb. 4.38). Bei dem hier gewählten Mischungsverhältnis der zeitgleichen Zudosierung von Ruß und A2 werden die Ergebnisse aus dem Realbetrieb schlechter abgebildet als bei der sequentiellen Zugabe. Auch mit anderen Mischungsverhältnissen würde man den Verlauf, wie er sich bei dieser darstellt, nicht abbilden.



**Abb. 4.49: F7-Taschenfilter, Synthetikfaser mit Elektretwirkung, Beladungsvarianten: A2, Ruß, A2 nach Ruß sowie Ruß und A2 zeitgleich**  
**Links: 0,4 µm-DEHS-Effizienz = f(Partikelmasse / Filterfläche)**  
**Rechts: Δp = f(Partikelmasse / Filterfläche)**

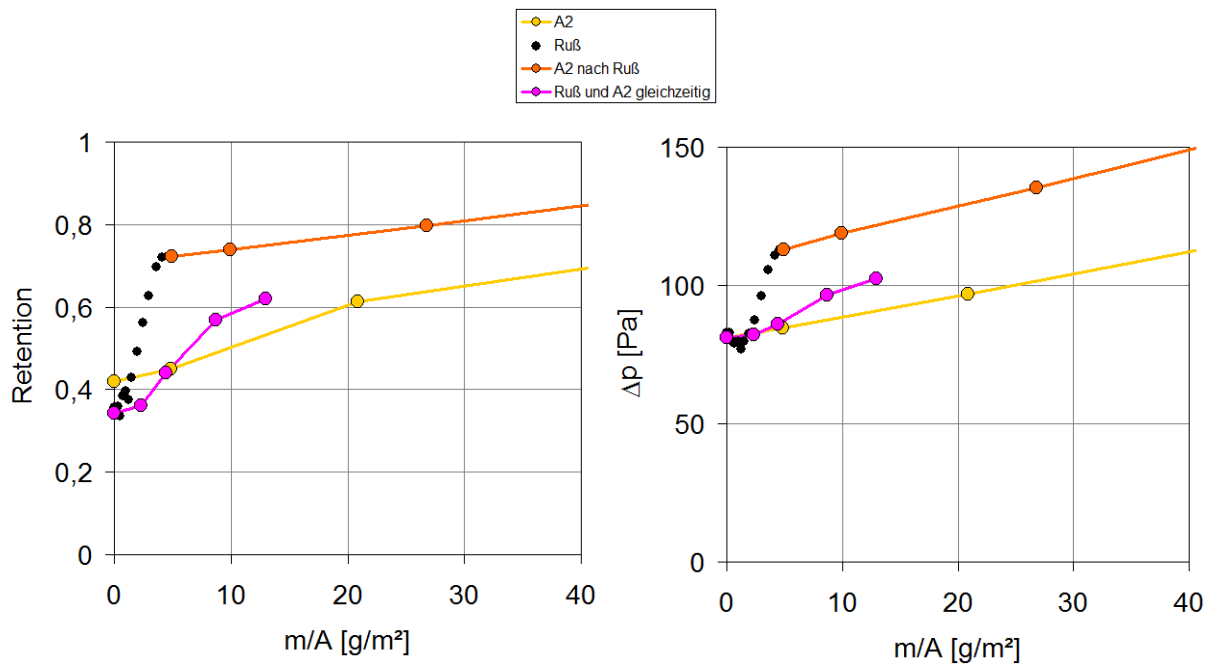
Für den F7-Taschenfilter aus Synthetikfasermaterial ohne Elektreteigenschaften mit Feinstfaserschicht werden die Ergebnisse in Abb. 4.50 gegenübergestellt. Die Filter dieses Typs wiesen trotzdem sie aus derselben Produktionscharge stammten, hinsichtlich ihrer Anfangseffizienz merkliche Unterschiede auf.

Bei der zeitgleichen Beladung mit Ruß und A2 steigen sowohl Retention als auch Druckverlust stärker an als im Falle der ausschließlichen A2-Beladung und geringer als im Falle der sequentiellen Beladung.

Wie bereits beschrieben, wird die Retention im Vergleich zum Realbetrieb bei einer ASHRAE-Beladung überbewertet (siehe Abb. 4.44). Die Retention bei der A2-Beladung ist zunächst in vergleichbarer Größenordnung wie beim Realbetrieb. In späteren Stadien ergibt sich tendenziell eher eine Unterbewertung. Der Druckverlust der Filter aus dem Realbetrieb (siehe Abb. 4.45) korrespondiert tendenziell mit dem der ASHRAE-Beladung während die A2-Beladung im Vergleich zum Realbetrieb zu einer Unterbewertung führte.

Eine sequentielle Beladung mit Ruß und A2 traf die Ergebnisse aus dem Realbetrieb nicht adäquat. Mit einem individuell auf diesen Filtertyp und den Einsatzfall im Realbetrieb abgestimmten Mischungsverhältnis zwischen Ruß und A2 bei zeitgleicher Zudosierung wäre gegebenenfalls eine bessere Übereinstimmung zu erzielen.





**Abb. 4.50: F7-Taschenfilter, Synthetikfaser ohne Elektretwirkung mit Feinstfasern, Beladungsvarianten: A2, Ruß, A2 nach Ruß sowie Ruß und A2 zeitgleich**  
 Links:  $0,4 \mu\text{m-DEHS-Effizienz} = f(\text{Partikelmasse} / \text{Filterfläche})$   
 Rechts:  $\Delta p = f(\text{Partikelmasse} / \text{Filterfläche})$

#### 4.10 Begleitende Modellierung zur Änderung von Druckverlust und Filtereffizienz mit zunehmender Beladung an Tiefenfiltern

Um die Änderung von Druckverlust und Filtereffizienz mit zunehmender Beladung des Filters abzubilden, wurde das einzelfaserbasierte Filtrationsmodell genutzt. Wenn mit diesem Modell auch Filtrationseigenschaften im beladenen Zustand beschrieben werden sollen, muss es erweitert werden. Dabei ist es notwendig, eine Ortsdiskretisierung in Vliesdickenrichtung und eine Diskretisierung in Beladungsstufen vorzunehmen (Abb. 4.51). Hinsichtlich der abgeschiedenen Partikel gibt es dabei zwei grundsätzlich mögliche Ansätze. Es kann entweder die Annahme getroffen werden, dass die Partikel zu einer Vergrößerung der Faserdurchmesser führen, oder man kann die abgeschiedenen Partikel im Sinne eines Dendritenmodells als "neue" Faserfraktion betrachten. Eine Einstufung unterschiedlicher Strukturen abgeschiedener Partikel hat beispielsweise Kanaoka (1998) vorgestellt. Sowohl das Faserwachstums- als auch das Dendritenmodell stellen starke Vereinfachungen der sich real bildenden Partikelstrukturen dar. Welcher dieser beiden Ansätze die Realität besser beschreibt, hängt vom Einzelfall ab. Hierbei ist maßgeblich, welcher Abscheidemechanismus dominiert. Somit sind u. a. das Verhältnis von Partikel- zu Faserdurchmesser, die Stokes- und die Pecletzahl die bestimmenden Größen für die Gestalt der abgeschiedenen Partikel. Im Folgenden werden exemplarisch Ergebnisse vorgestellt, die unter Verwendung des Faserwachstumsmodells berechnet wurden.

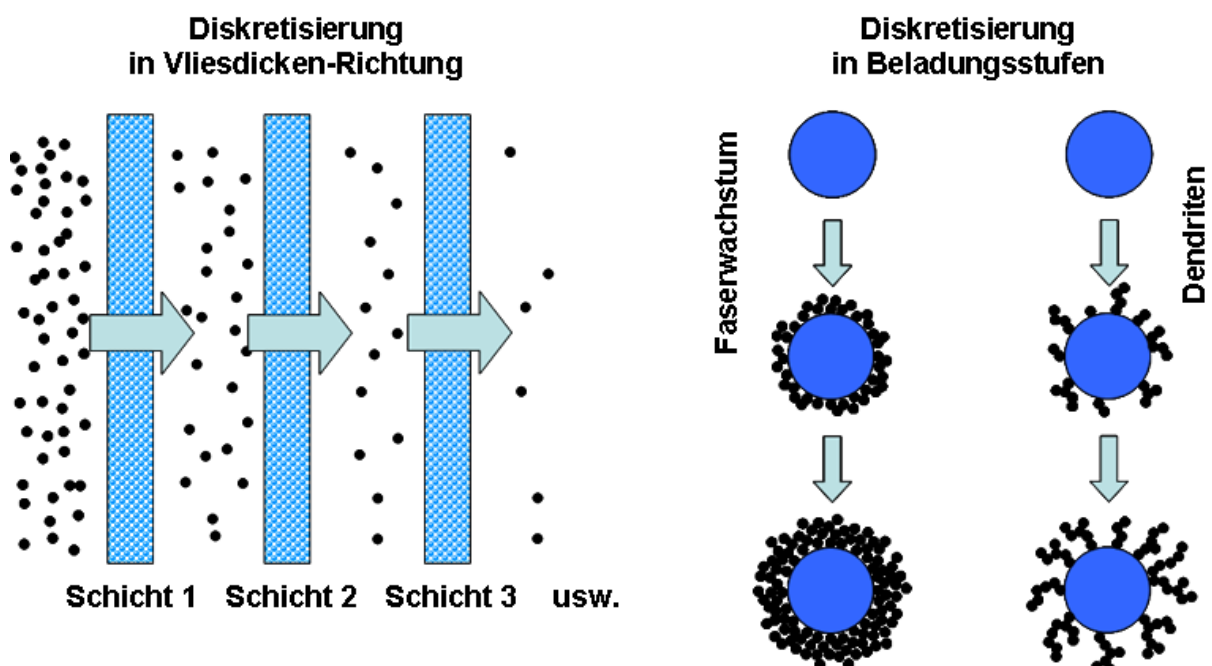


Abb. 4.51: Visualisierung der Vorgehensweise zur Beladungsmodellierung

Bei der Nutzung des einzelfaserbasierten Filtrationsmodells wurden neben der Interzeption und der Abscheidung aufgrund von Diffusion auch die Abscheidung aufgrund elektrophoretischer Transportmechanismen berücksichtigt. Das verwendete Formelwerk wurde aus den entsprechenden Abhandlungen bei Hinds (1999) und Brown (1993) 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  $\lambda$  zum Faser-radius:

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

In den Formeln zur Berechnung des Einzelfaserabscheidegrades durch Interzeption ist  $\alpha$  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  $\mu$  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  $Q$ ,  $\varepsilon_p$  der Dielektrizitätskonstanten des Partikelmaterials und  $\varepsilon_0$  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  $\bar{n}_q$  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  $\mu\text{m}$ .

Die Abscheideeffizienz des Filtervlieses auf Basis der superponierten Einzelfaserabschiedegrade  $\eta_{\Sigma}$  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:

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

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

In Abb. 4.52 wird zunächst ein Vergleich von experimentell ermittelten Fraktionsabscheidegraden für den F7-Taschenfilter aus Synthetikfasern mit Elektretwirkung (bzw. für das entsprechende Filtermedium nach IPA-Behandlung) mit den Berechnungsergebnissen des Modells gezeigt. Der optische Latex-Äquivalentdurchmesser des Anfangsfraktionsabscheidegrades am konfektionierten Taschenfilter (türkise Rechtecke) wurde zum Vergleich mit dem Modell auf den geometrischen Durchmesser (blaue Punkte) der verwendeten DEHS-Tropfen umgerechnet. Selbiges gilt für den Durchmesser des Fraktionsabscheidegrades am IPA-behandelten Filtermedium (orange Rechtecke bzw. rote Punkte).

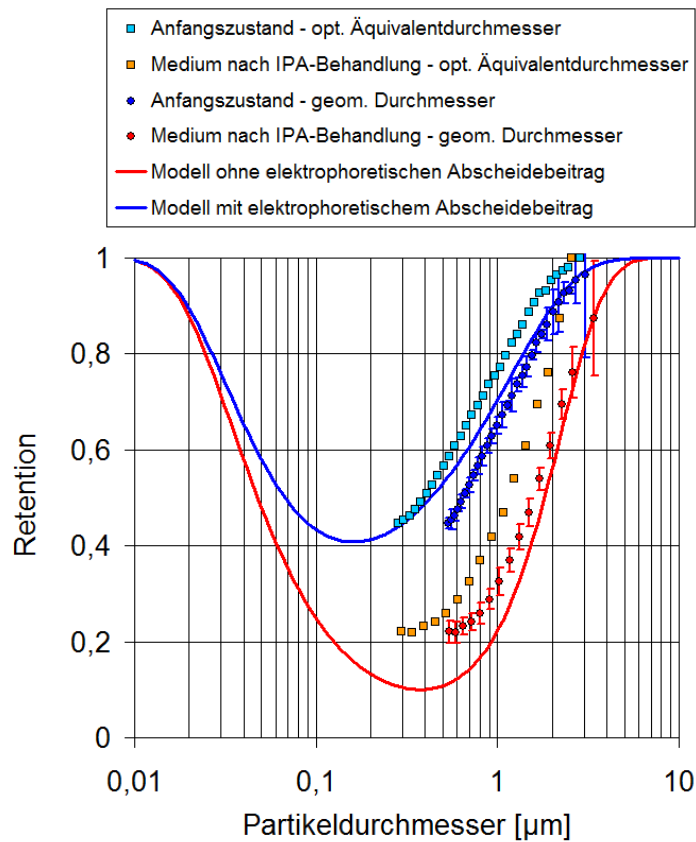
Die Faserdurchmesserverteilung des realen Filtervlieses wurde im Modell vereinfachend durch einen diskreten Faserdurchmesser von  $10\ \mu\text{m}$  angenähert. Die Packungsdichte des Filtervlieses betrug ca. 3 % und die Vliesdicke ca. 6 mm. Basierend auf Messwerten zum makroskopisch detektierbaren, vom Vlies ausgehenden elektrischen Feld wurde eine Faserladung pro Faserlänge von ca.  $5,6 \cdot 10^{-12}\ \text{As/m}$  angenommen.

Für den Fall des IPA-behandelten Mediums wurde im Modell die Abscheidung durch Interzeption und Diffusion zugrunde gelegt. Für den konfektionierten Taschenfilter wurde als zusätzlich wirkender Abscheidemechanismus die Abscheidung durch Polarisation angenommen. Die Berechnungsergebnisse spiegeln den qualitativen Unterschied zwischen den beiden Betrachtungsfällen wider und weisen eine gute quantitative Übereinstimmung mit diesen auf.

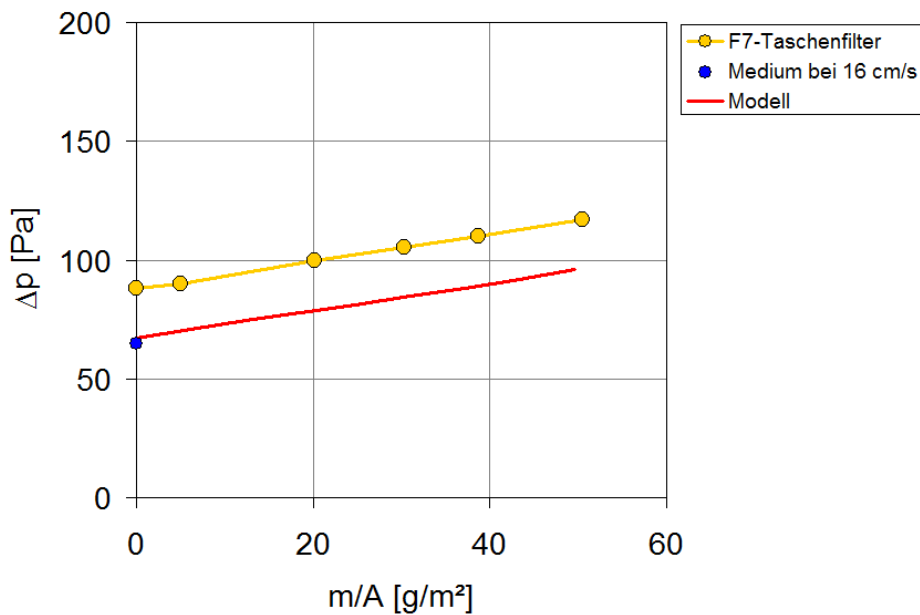
Ein Vergleich von Mess- und Modellierungsergebnissen zum Druckverlust als Funktion der auf die Filterfläche bezogenen Staubmasse bei A2-Beladung wird in Abb. 4.53 gezeigt. Im Rahmen der Modellierung wurde ein über eine logarithmische Normalverteilung beschriebenes Partikelkollektiv (mittlerer geometrischer Durchmesser  $2,5\ \mu\text{m}$ , Standardabweichung 2) angenommen. Zur Beschreibung des Ladungszustandes der bereitstellungsbedingt hoch aufgeladenen A2-Partikel wurde eine mittlere Ladungswahrscheinlichkeit von  $150\ d_p^{1,2}$  (mit  $d_p$  in  $\mu\text{m}$ ) verwendet. Sie wurde für das A2-Partikelkollektiv mithilfe eines Elektroabscheiders experimentell bestimmt. Im Rahmen der Beladungsmodellierung wurde als zusätzlicher Abscheidemechanismus die Abscheidung aufgrund der Coulombkraft berücksichtigt.

Die rote Kurve im Diagramm, welche das Modellierungsergebnis repräsentiert ist gegenüber der am konfektionierten Filter gemessenen A2-Beladungskurve (gelb) parallel nach unten verschoben. Sie beginnt bei einem Wert von 65 Pa, dem Druckverlustwert, der an Filtermedienproben bei gleicher Filtrationsgeschwindigkeit gemessen wurde. Der Offset gegenüber der Druckverlustcharakteristik am konfektionierten Filter ist durch den zusätzlichen Reibungsdruckverlustanteil begründet, der

sich an diesem bei Durchströmung der Taschenstruktur ergibt.



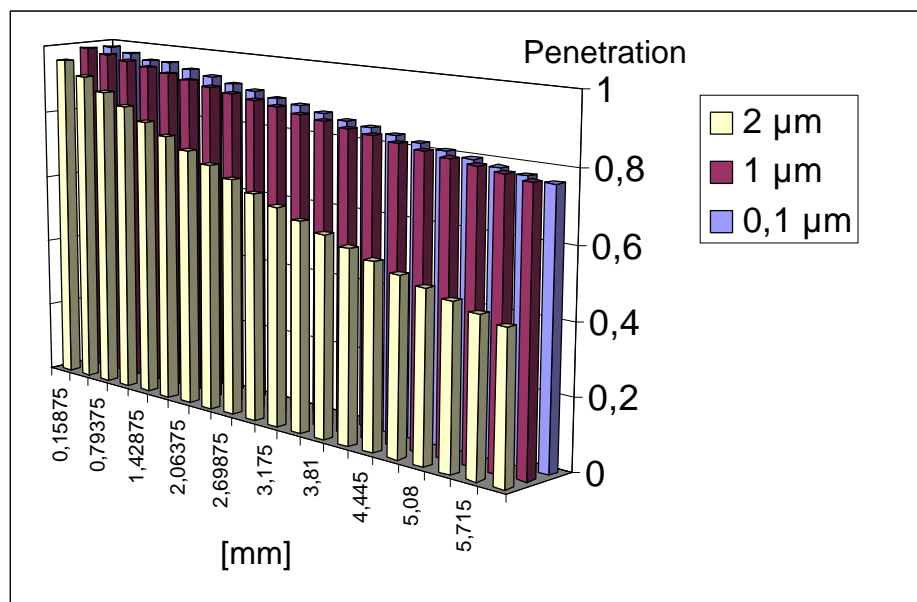
**Abb. 4.52: F7-Taschenfilter, Synthetikfaser mit Elektretwirkung und Medium nach IPA-Behandlung**  
**Vergleich der Fraktionsabscheidegrade: Messergebnisse ⇔ Modell**



**Abb. 4.53: F7-Taschenfilter, Synthetikfaser mit Elektretwirkung, Druckverlust als Funktion der auf die Filterfläche bezogenen Staubmasse, Vergleich: Messergebnis bei A2-Beladung ⇔ Modell**

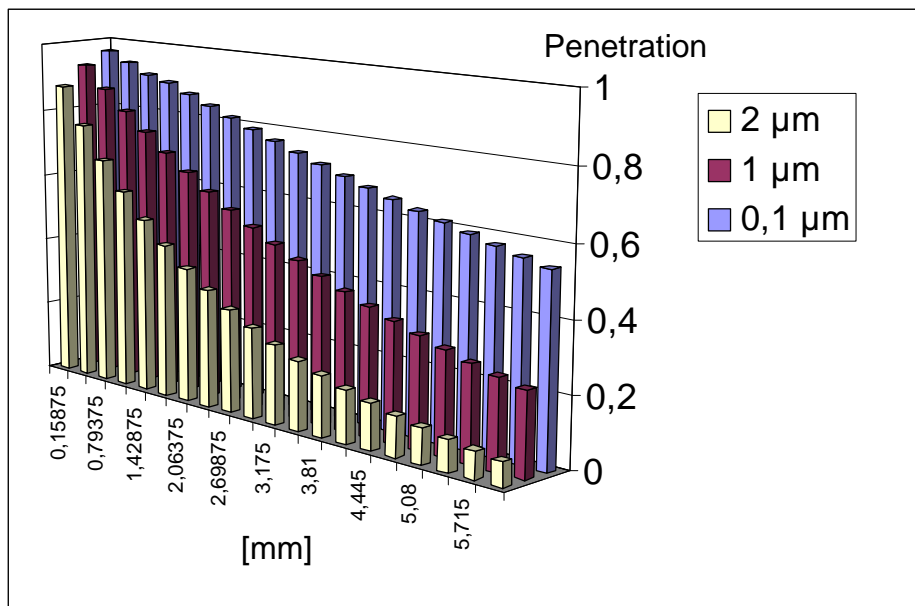
In Abb. 4.54 ist die berechnete Penetration bei Interzeptions- und Diffusionsabscheidung für drei Partikeldurchmesser über der Filtervliesdicke aufgetragen. Für die Modellierung wurde die Vliesdicke in 20 Schichten diskretisiert. Der hier betrachtete Fall korrespondiert mit dem Fall des IPA-behandelten Mediums.

Abb. 4.55 zeigt die gleiche Darstellung bei zusätzlicher Berücksichtigung der Abscheidung durch Polarisation. Dieser Fall korrespondiert also mit dem Fall des unbehandelten konfektionierten Filters im Anfangszustand. Die Abreicherung der Partikel über die Dicke des Filtervlieses ist bei dem gegebenen elektrophoretischen Abscheidebeitrag deutlich ausgeprägter als im Fall der ausschließlich mechanischen Abscheidemechanismen. Dies gilt insbesondere für die Partikeldurchmesser von 1  $\mu\text{m}$  und 2  $\mu\text{m}$  Durchmesser. Über die Tiefe des Filtervlieses ist hier eine deutlich inhomogenere Verteilung der abgeschiedenen Partikelvolumina gegeben.



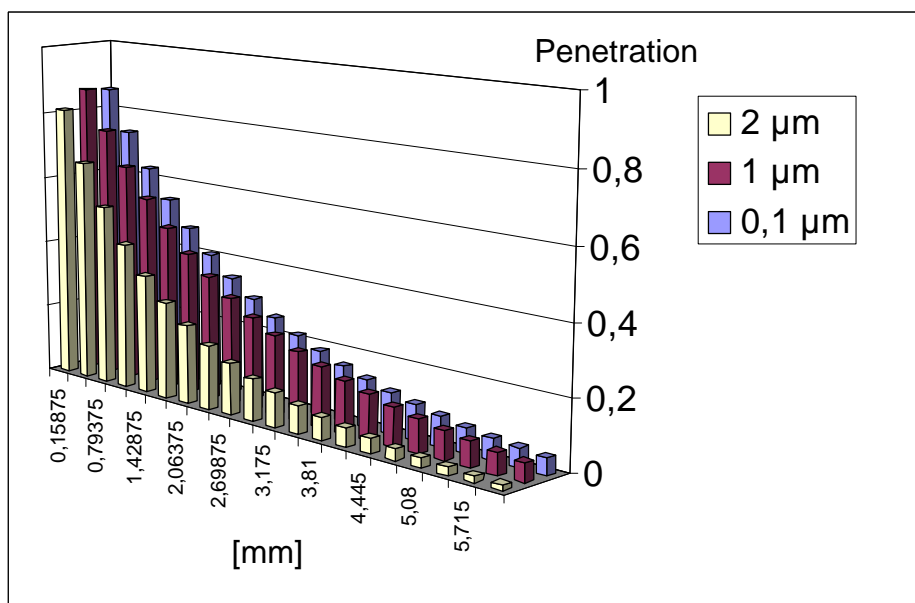
**Abb. 4.54: Eindringtiefe unterschiedlicher Partikeldurchmesser in ein Filtervlies aus Fasern mit einem Durchmesser von 10  $\mu\text{m}$  bei Annahme von Diffusion und Interzeption**





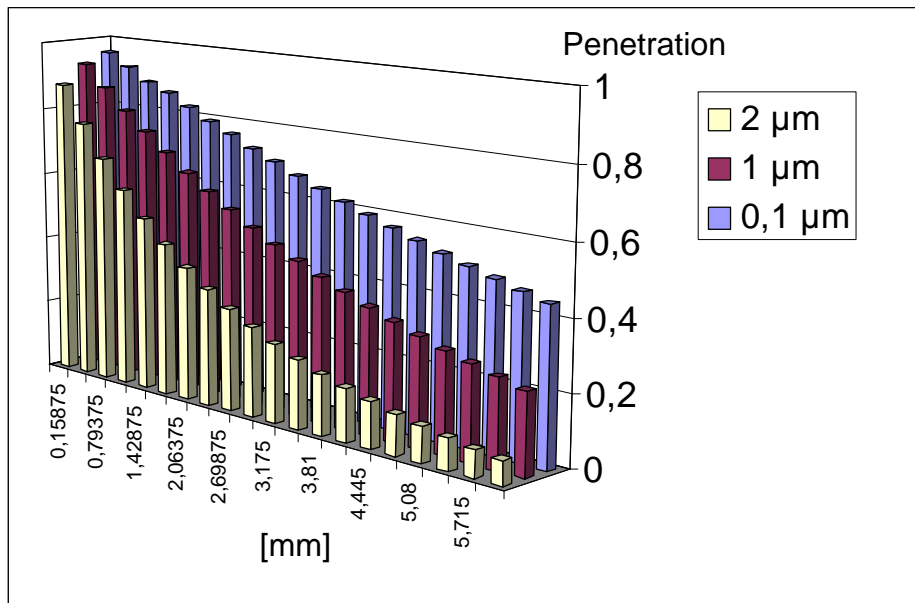
**Abb. 4.55: Eindringtiefe unterschiedlicher Partikeldurchmesser in das Filtervlies, bei Annahme von Diffusion und Interzeption und Polarisationsabscheidung**

Werden im Modell zusätzlich noch Coulombsche Abscheideeffekte bei Verwendung eines hochaufgeladenen Partikelkollektivs berücksichtigt (Abb. 4.56), so erfolgt eine noch deutlichere Abreicherung. Man erkennt, dass schon in den ersten Schichten des Filtervlieses ein Großteil aller drei betrachteten Partikeldurchmesser abgeschieden wird.



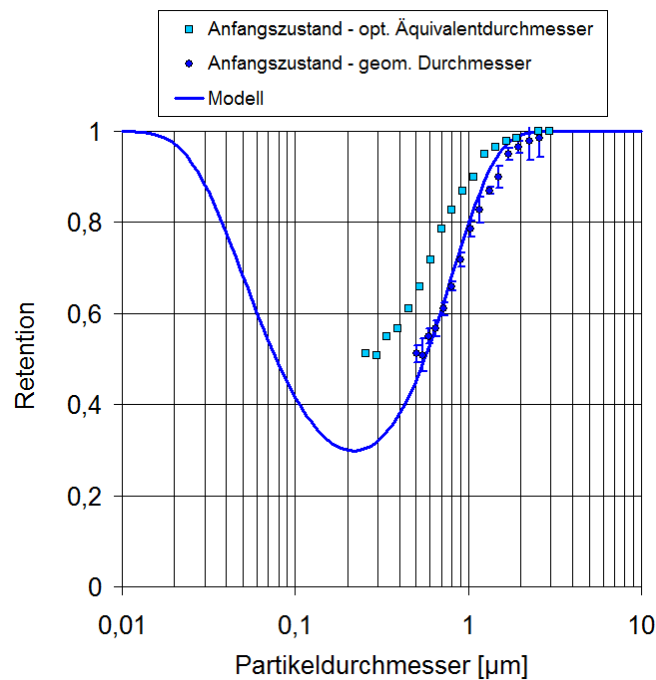
**Abb. 4.56: Eindringtiefe unterschiedlicher Partikeldurchmesser in das Filtervlies, bei Annahme von Diffusion und Interzeption und Polarisations- sowie Coulombabscheidung, für ein hoch aufgeladenes Partikelkollektiv**

Ist das Partikelkollektiv hingegen im Ladungsgleichgewicht, so ergibt sich hin zu größeren Partikeldurchmessern wieder eine etwas höhere Penetration über der Tiefe des Vlieses (Abb. 4.57).



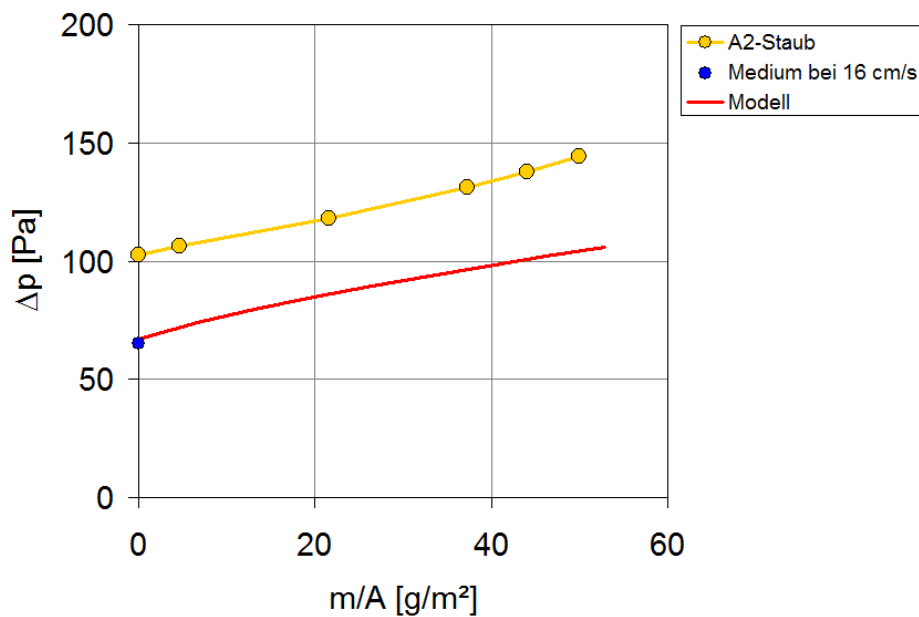
**Abb. 4.57: Eindringtiefe unterschiedlicher Partikeldurchmesser in das Filtervlies, bei Annahme von Diffusion und Interzeption und Polarisations- sowie Coulombabscheidung, für ein Partikelkollektiv im Ladungsgleichgewicht**

Abb. 4.58 zeigt den gemessenen Anfangsfraktionsabscheidegrad des F7-Taschenfilters aus Glasfasern im Vergleich zum Modellierungsergebnis. Nach Umrechnung des optischen Äquivalentdurchmessers auf den geometrischen ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Modell- und experimentellem Ergebnis. Der bei der Modellierung zugrunde gelegte Faserdurchmesser beträgt 2,2 µm, die Packungsdichte 0,4 %.



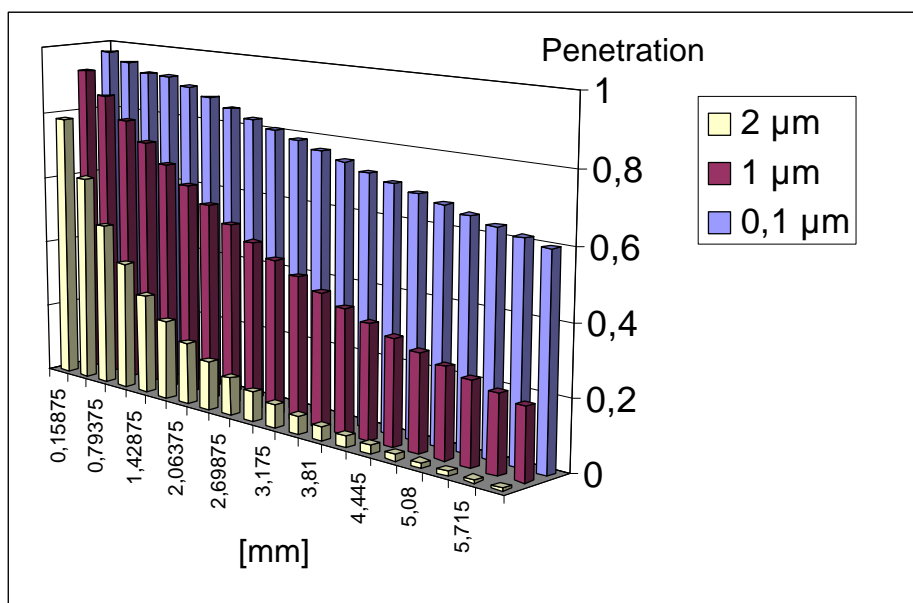
**Abb. 4.58: F7-Taschenfilter, Glasfaser, Vergleich der Fraktionsabscheidegrade: Messergebnis ↔ Modell**

In Abb. 4.59 ist die berechnete Beladungskurve (rot) im Vergleich zur mit dem A2-Staub (gelb) gemessenen zu sehen. Die Steigung der beiden Kurven ist vergleichbar. Aufgrund der bei der Modellierung nicht berücksichtigten zusätzlichen Reibungsdruckverlustanteils bei Durchströmung des konfektionierten Filters ist die Kurve parallel nach unten verschoben.



**Abb. 4.59: F7-Taschenfilter, Glasfaser, Druckverlust als Funktion der auf die Filterfläche bezogenen Staubmasse, Vergleich: Messergebnis bei A2-Beladung ↔ Modell**

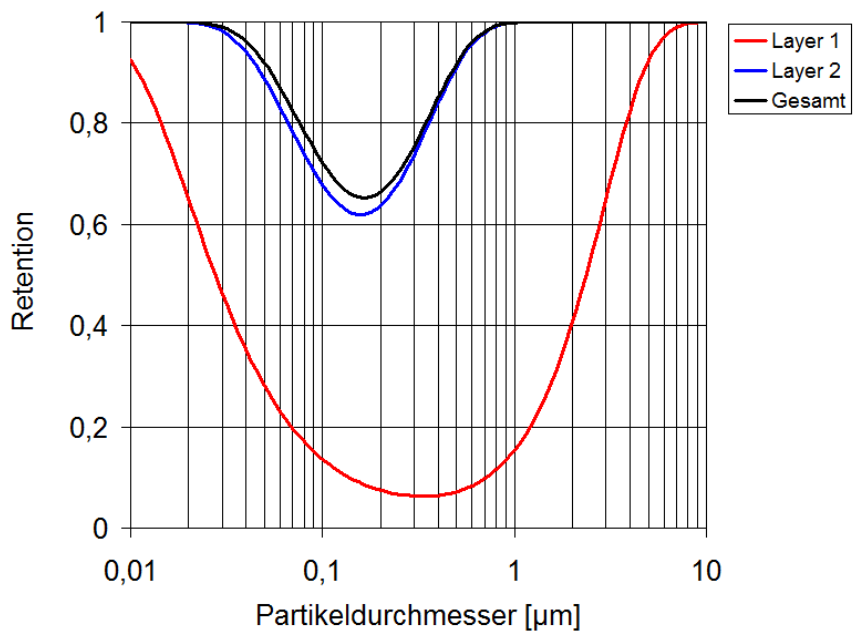
Abb. 4.60 stellt die Penetration über der Dicke des Filtervlieses für den Glasfaserfilter dar. Mit den hier relevanten Abscheidemechanismen Diffusion und Interzeption ergibt sich für den Partikeldurchmesser von  $0,1 \mu\text{m}$  eine lineare Abreicherungscharakteristik. Bei den Partikeldurchmessern von  $1$  und  $2 \mu\text{m}$  nimmt die Verlaufsform eine exponentielle Gestalt an. Partikel mit dem Durchmesser von  $2 \mu\text{m}$  werden überwiegend in den ersten Schichten abgeschieden.



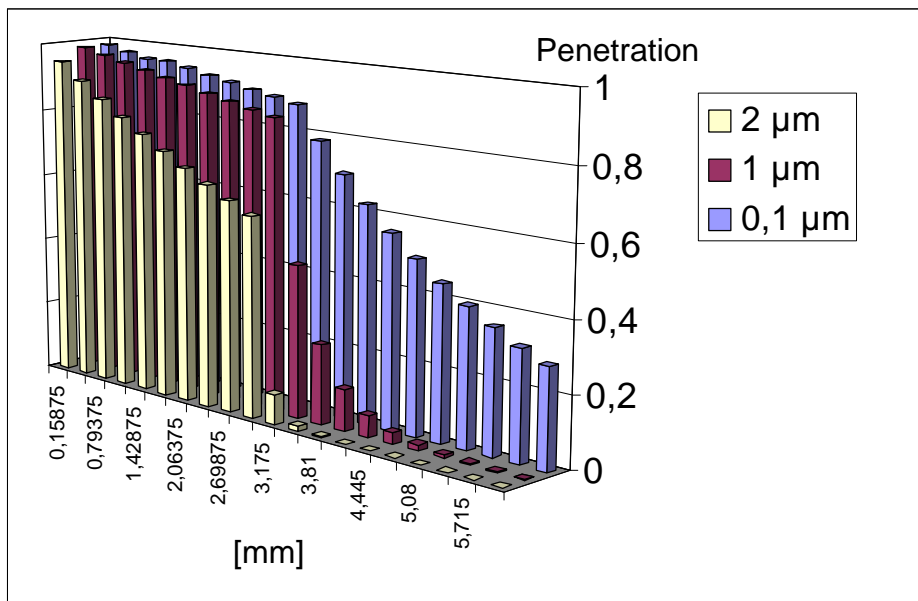
**Abb. 4.60: Eindringtiefe unterschiedlicher Partikeldurchmesser in ein Filtervlies aus Fasern mit einem Durchmesser von  $2,2 \mu\text{m}$ , bei Annahme von Diffusion und Interzeption**

Abb. 4.61 zeigt berechnete Fraktionsabschleidegrade für ein angenommenes Filtervlies, welches aus zwei Layern mit unterschiedlicher Struktur besteht. Layer 1 weist einen Faserdurchmesser von  $10 \mu\text{m}$  und eine Packungsdichte von  $3 \%$  auf, Layer 2 hat einen Faserdurchmesser von  $1 \mu\text{m}$  und eine Packungsdichte von  $0,04 \%$ . Es ist zu erkennen, dass der Gesamtfraktionsabschleidegrad beider Layer (schwarze Kurve) maßgeblich durch den Fraktionsabschleidegrad des zweiten Layers (blaue Kurve) bestimmt wird.

In Abb. 4.62 ist für diesen zweilagigen Aufbau die Penetration als Funktion der Vliesdicke dargestellt. Innerhalb des ersten Layers erfolgt für Partikel von  $0,1 \mu\text{m}$  Durchmesser eine lineare Abreicherung. Im zweiten Layer nimmt sie eine exponentielle Form an. Für die größeren betrachteten Partikeldurchmesser insbesondere bei  $2 \mu\text{m}$  ergibt sich im Übergang vom ersten zum zweiten Layer eine Diskontinuität. Sämtliche Partikel dieses Durchmessers, die den ersten Layer penetriert haben, werden in der ersten Schicht des zweiten Layers abgeschieden.



**Abb. 4.61:** berechneter Fraktionsabscheidegrad eines Filtervlieses mit zwei unterschiedlichen Layern:  
 Layer 1 - Faserdurchmesser 10 µm,  
 Layer 2 - Faserdurchmesser 1 µm



**Abb. 4.62:** Eindringtiefe unterschiedlicher Partikeldurchmesser in das Filtervlies mit zwei unterschiedlichen Layern

#### 4.11 Theoretische Untersuchungen zum Einfluss plissierter Strukturen auf das Strömungsfeld und den Druckverlust bei RLT-Filtern

Hinsichtlich des Einflusses plissierter Strukturen auf das Strömungsfeld und den Druckverlust bei RLT-Filtern wurden numerische Berechnungen (cfd) unter Verwendung der kommerziellen Software ANSYS - FLUENT durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen dienen unter anderem zum Vergleich mit den Annahmen und Ergebnissen eines analytischen Modells (Lücke, Fissan, 1995) zur Vorhersage des Anfangsdruckverlustes der plissierten Strukturen. Dieses bezieht sich auf orthogonal angeströmte Faltenpakete und wird in der Literatur bei einem Faltenhöhen- zu Faltenabstandsverhältnis im Intervall von ca. 10 bis 30 als valide für Filter aus dem Bereich der HEPA- und ULPA- Filtration ausgewiesen. Es galt also zunächst zu untersuchen, inwieweit die im Rahmen dieses Modells getroffenen Annahmen auch für Faltenpakete aus Filtermedien mit deutlich geringeren Strömungswiderständen (respektive deutlich höheren Permeabilitäten), wie sie für RLT-Filter typisch sind, zutreffen.

$$\text{Permeabilität [m}^2\text{]} = \frac{\eta \cdot s \cdot v}{\Delta p}$$

$\eta$  [Pa s] = dyn. Viskosität d. Luft

$s$  [m] = Mediendicke

$v$  [m/s] = mittlere Filtrationsgeschwindigkeit

$\Delta p$  [Pa] = Druckverlust des Mediums bei dieser Geschwindigkeit

Das Modell von Lücke und Fissan führt zu analytisch lösbaren Gleichungen für das Strömungsfeld unter Annahme einer rechteckigen Faltengeometrie, bei der nur die parallel zur Hauptströmungsrichtung verlaufenden Flanken durchströmt werden. Die Geschwindigkeitsverteilungen innerhalb der Faltenstruktur werden mit Hilfe von Polynomansätzen beschrieben, wobei die Anströmung des Filtermediums über die Faltenhöhe als homogen angenommen wird. Der Gesamtdruckverlust setzt sich aus mehreren, voneinander entkoppelten Einzelanteilen zusammen. Neben dem Mediendruckverlust werden ein Anteil aufgrund der Einschnürung bzw. Aufweitung und der Reibungsdruckverlust bei Durchströmung der Gassen der Faltenstruktur berücksichtigt. Der Mediendruckverlust wird über den Ansatz nach Darcy als linear abhängig von der mittleren Filtrationsgeschwindigkeit angesetzt. Der Gassenanteil wird als spezielle Lösung der Navier-Stokes-Gleichung berechnet.

In Abb. 4.63 werden numerische Berechnungsergebnisse hinsichtlich des statischen Druckes bei der Durchströmung von Faltenpaketen (orthogonale Anströmung der plissierten Struktur) mit einer Faltenhöhe von 28 mm und einem Faltenabstand von ca. 3 mm als Farbverlaufsdarstellungen gezeigt. Die Berechnungen wurden mit einem Volumenstrom von 660 m<sup>3</sup>/h durchgeführt, dies entspricht einer aufs Medium bezogenen mittleren Anströmgeschwindigkeit von 3,49 cm/s. Für Panelfilter sind - wenn ausreichend Bauraum in der Tiefe zur Verfügung steht - größere Faltenhöhen und daraus resultierend größere realisierte Filterflächen typisch. Die Faltenhöhe von 28 mm wurde für die Berechnung gewählt, weil sie in einem Bereich liegt, der typisch ist für die in Kassettenfiltern verbauten Faltenpakete. Diese werden in der Kasette dann aber nicht mehr orthogonal sondern schräg angeströmt. Die Abb. 4.63 zeigt den berechneten statischen Druck sowohl für eine angenommene rechteckige als auch für eine dreieckige Faltengeometrie. Im Falle der rechteckigen Geometrie wurden analog zum Modell nach Lücke nur die parallel zur Hauptströmungsrichtung verlaufenden Flanken durchströmt. Im Falle der dreieckigen Falte kommt es dadurch, dass sich die Flanken im Bereich der Spitzen berühren im Zusammenspiel mit einer sinnvollen Diskretisierung der Berechnungszellen, zu einer Reduzierung der durchströmten Fläche. Die Berechnungen wurden 2-dimensional und für unterschiedliche Permeabilitäten (die den typischen Bereich der bei den RLT-Filtern verwendeten Medien abdecken) des im Faltenpaket verbauten Mediums durchgeführt. Hier dargestellt sind links die Ergebnisse bei einer Permeabilität von  $5,5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ , rechts für  $2,9 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ . Es ist zu erkennen, dass bei der höheren Permeabilität (links) und der angenommenen rechteckigen Faltengeometrie die Druckdifferenz (der Farbunterschied in der Abbildung) zwischen der An- und der Abströmseite ungleichförmig über der Faltenhöhe ist. Der größte Druckverlust liegt im unteren Bereich der Falten vor. Bei der geringeren Permeabilität (rechts) und der angenommenen rechteckigen Faltengeometrie ist dieser über der Faltenhöhe deutlich gleichförmiger. Im Falle der dreieckigen Falte ist der Druckverlust auch bei der höheren Permeabilität schon deutlich gleichförmiger über der Faltenhöhe als im Falle der rechteckigen. Die schräge Anströmung der Falte führt also offensichtlich zu einer merklichen Homogenisierung.

Diese Homogenisierung ist auch bei den Konturplots der Geschwindigkeit zu erkennen. In Abb. 4.64 werden diese für dieselben Parametersätze vorgestellt, für die in der vorherigen Abbildung der statische Druck gezeigt worden ist. In dieser Darstellungsform sind die Unterschiede der Ergebnisse für die beiden zugrunde gelegten Permeabilitäten sowohl für den Fall der rechteckigen als auch insbesondere für den Fall der dreieckigen Faltengeometrie kaum zu differenzieren.

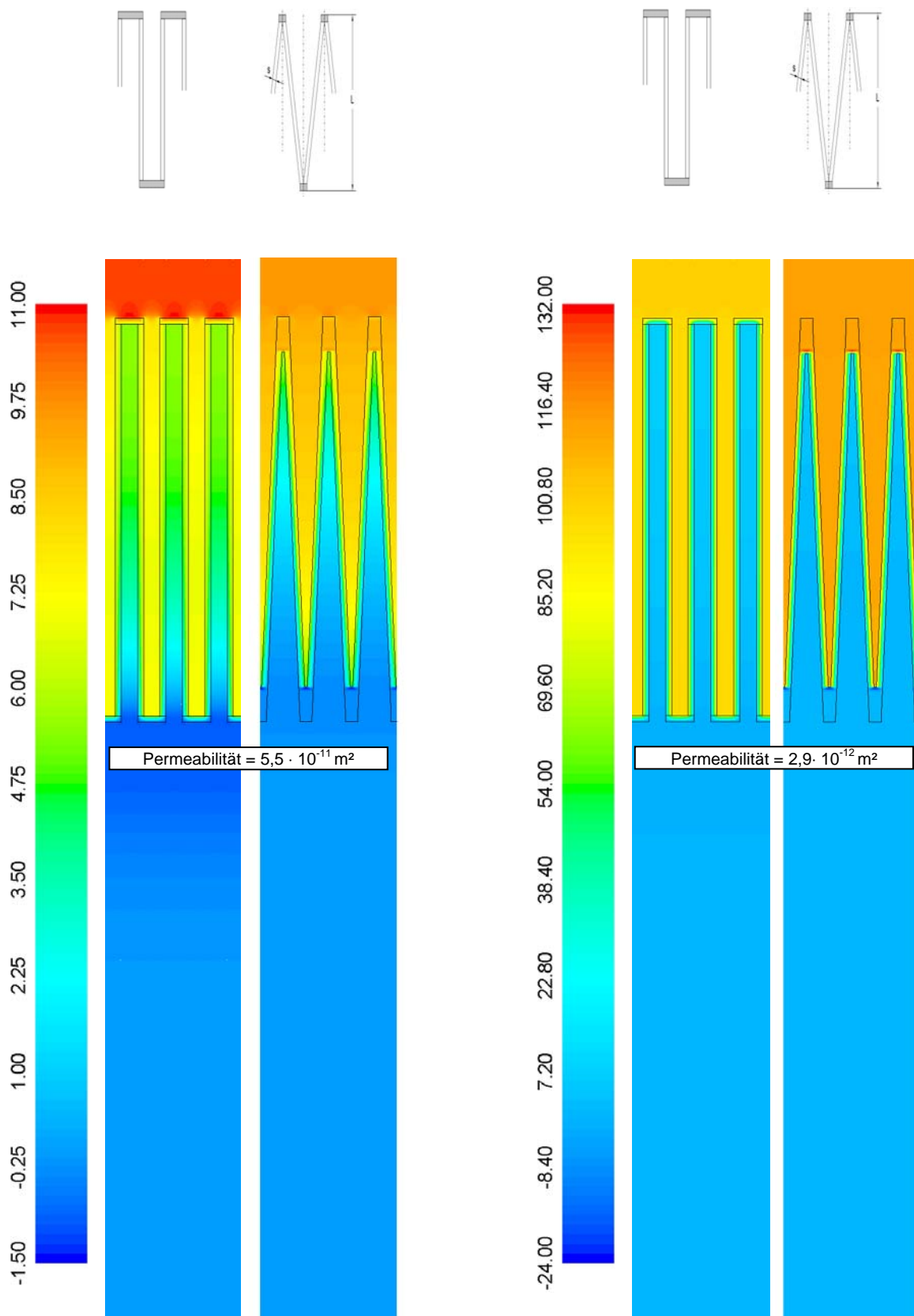


Abb. 4.63: Konturplots des statischen Drucks [Pa],  
 Faltenhöhe = 28 mm, Volumenstrom = 660 m<sup>3</sup>/h auf Panelfilter (610 x 610 mm<sup>2</sup>)



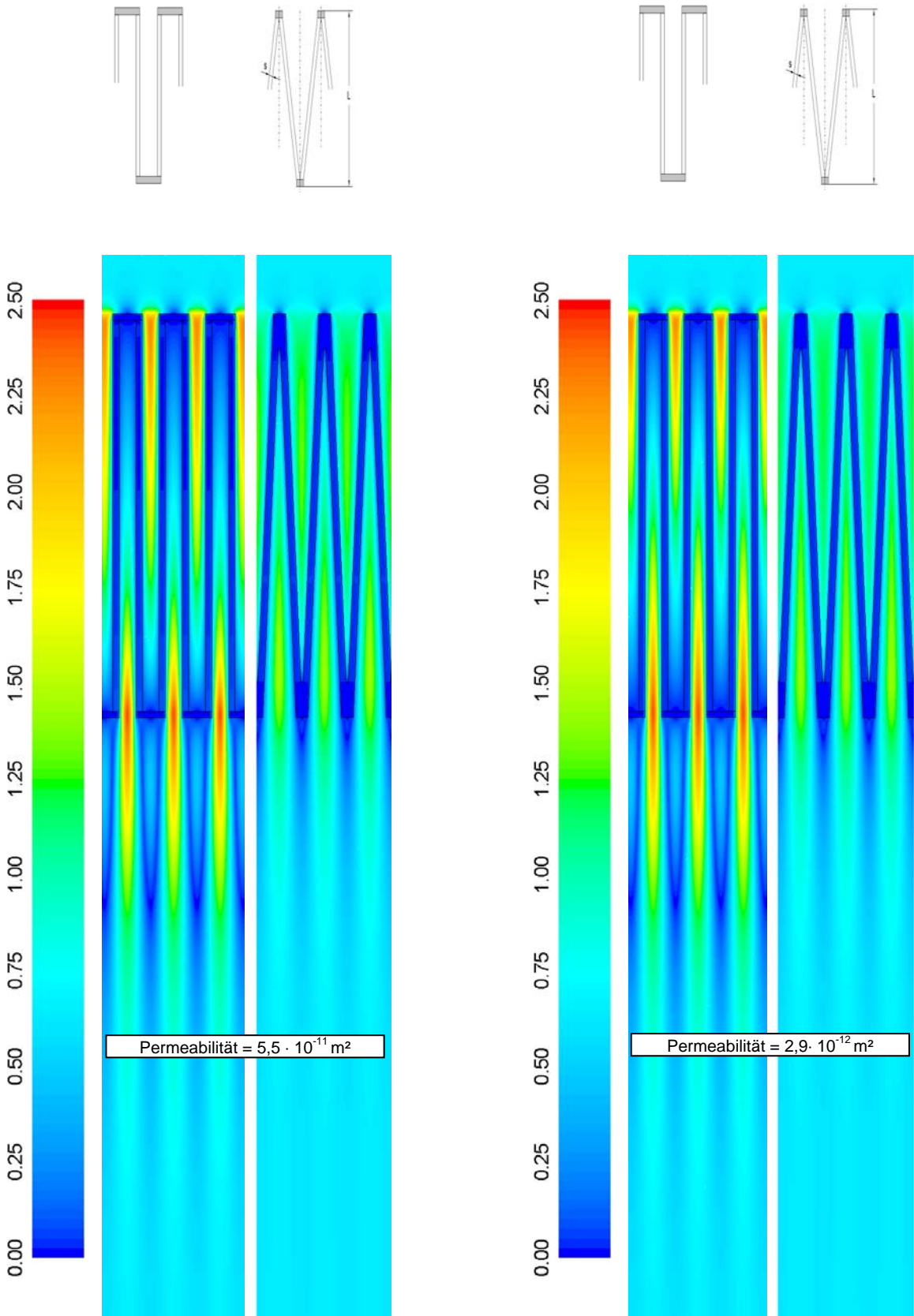


Abb. 4.64: Konturplots der Geschwindigkeit [m/s],  
Faltenhöhe = 28 mm, Volumenstrom = 660 m<sup>3</sup>/h auf Panelfilter (610 x 610 mm<sup>2</sup>),

Besser sind die Unterschiede zu erkennen, wenn man die Geschwindigkeitsprofile bei einigen ausgewählten Schnittebenen betrachtet. Eine detaillierte Darstellung von Ergebnissen hierzu erfolgt in den Abb. 4.65 bis Abb. 4.68. Die Geschwindigkeiten werden jeweils auf Höhe von 30 %, 60 % und 90 % der Faltenhöhe gezeigt. Für den Vergleich mit den im Rahmen des Modells nach Lücke angenommenen Geschwindigkeitsprofilen wurden hier nur die Geschwindigkeitskomponenten in Hauptströmungsrichtung ausgelesen. Sie sind mit der Anströmgeschwindigkeit des Panelfilters normiert worden. Abb. 4.65 bezieht sich auf die anströmseitigen Falten, Abb. 4.66 auf die abströmseitigen Falten für den Fall einer Faltenhöhe von 28 mm. Abb. 4.67 und Abb. 4.68 stellen entsprechende Ergebnisse für eine Faltenhöhe von 150 mm bei einem Faltenabstand von ca. 5 mm dar. Bei einem Volumenstrom von 2000 m<sup>3</sup>/h für die Filter mit dieser Faltenhöhe beträgt die aufs Medium bezogene mittlere Anströmgeschwindigkeit 3,49 cm/s. Somit sind mit den 3,44 cm/s bei 660 m<sup>3</sup>/h für die Filter mit der Faltenhöhe von 28 mm vergleichbare Medien-Anströmgeschwindigkeiten gegeben.

In der linken Spalte der Abbildungen werden die Geschwindigkeiten für die rechteckige, in der rechten Spalte diejenigen für die dreieckige Faltengeometrie visualisiert. Neben den beiden bisher betrachteten Permeabilitäten wird als weitere noch eine mit  $1,2 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$  in der jeweils mittleren Zeile der Abbildungen gezeigt. Die ausgewählten Permeabilitäten der Filtermedien korrespondieren mit Filtern, die bei den Filterklassen M6, F8 und F9 angesiedelt sind, wobei die Permeabilität von  $2,9 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$  für ein F9-Filtermedium recht gering ist.

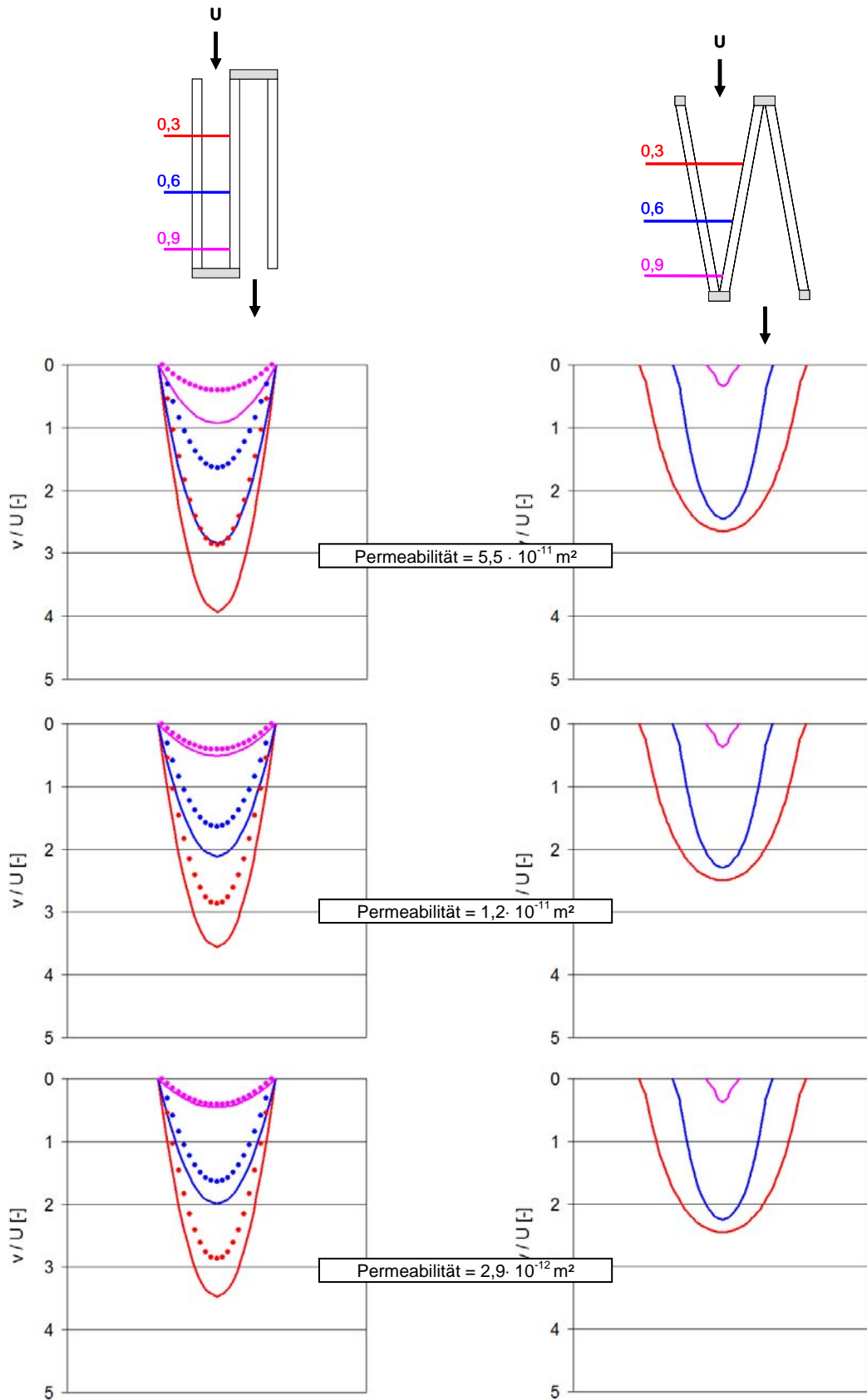
Hinsichtlich des Vergleichs mit den über die Polynomansätze beschriebenen Geschwindigkeiten des Modells nach Lücke (Datenpunkte bei der rechteckigen Faltengeometrie) ist zunächst noch festzustellen, dass dieses unmittelbar nach Eintritt in die Falte bereits ein ausgeprägtes Strömungsprofil annimmt, während bei den cfd-Berechnungen auf einer Schnittebene mit einer Vorlaufstrecke zur plissierten Struktur eine konstante Geschwindigkeit vorgegeben wurde und sich das Profil innerhalb der Falten nach Einschnürung der Strömung erst allmählich ausbildet.

Die Geschwindigkeitsprofile, die das Modell nach Lücke annimmt, sind unabhängig von der Permeabilität des Filtermediums. Wie bereits erwähnt wird der Gassenanteil des Gesamtdruckverlustes als entkoppelt vom Medienanteil angesetzt.

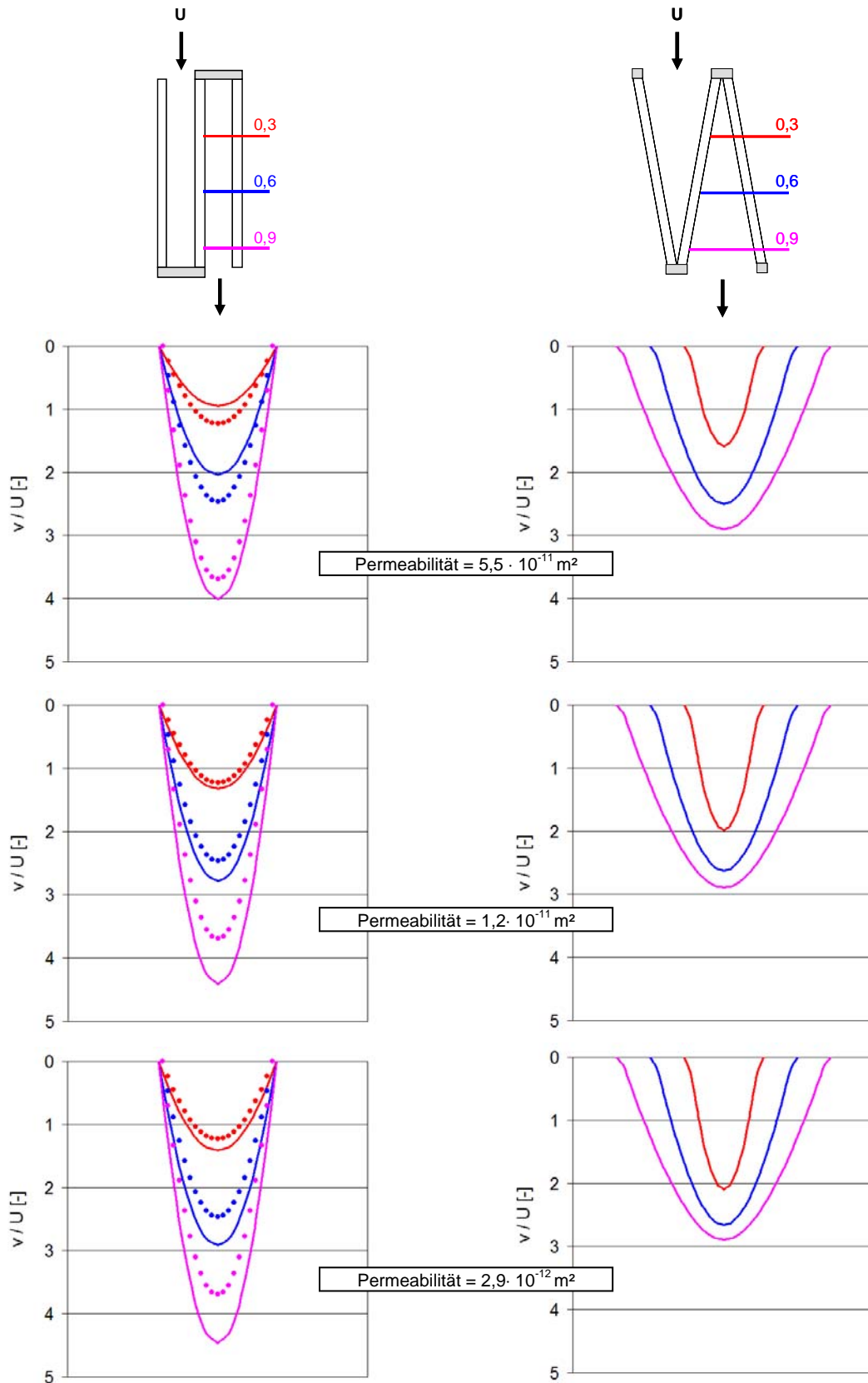
Hinsichtlich der Unterschiede zwischen den cfd-Berechnungsergebnissen und den Annahmen des Modells nach Lücke lässt sich insgesamt feststellen, dass sie mit geringer werdender Permeabilität kleiner werden. Dieses ist anhand der Fallbeispiele für die Faltenhöhe von 150 mm deutlicher zu erkennen als für die Faltenhöhe von 28 mm.

Die Geometrie der Falten realer Filter ist in der Regel weder durch eine rechteckige noch durch eine dreieckige Struktur präzise beschrieben. Für die üblicherweise eher etwas "bauchige" Form stellen sowohl die rechteckig als auch die dreieckig angenommene Geometrie Idealisierungen dar, die eher im Sinne von Grenzbetrachtungen zu bewerten sind.

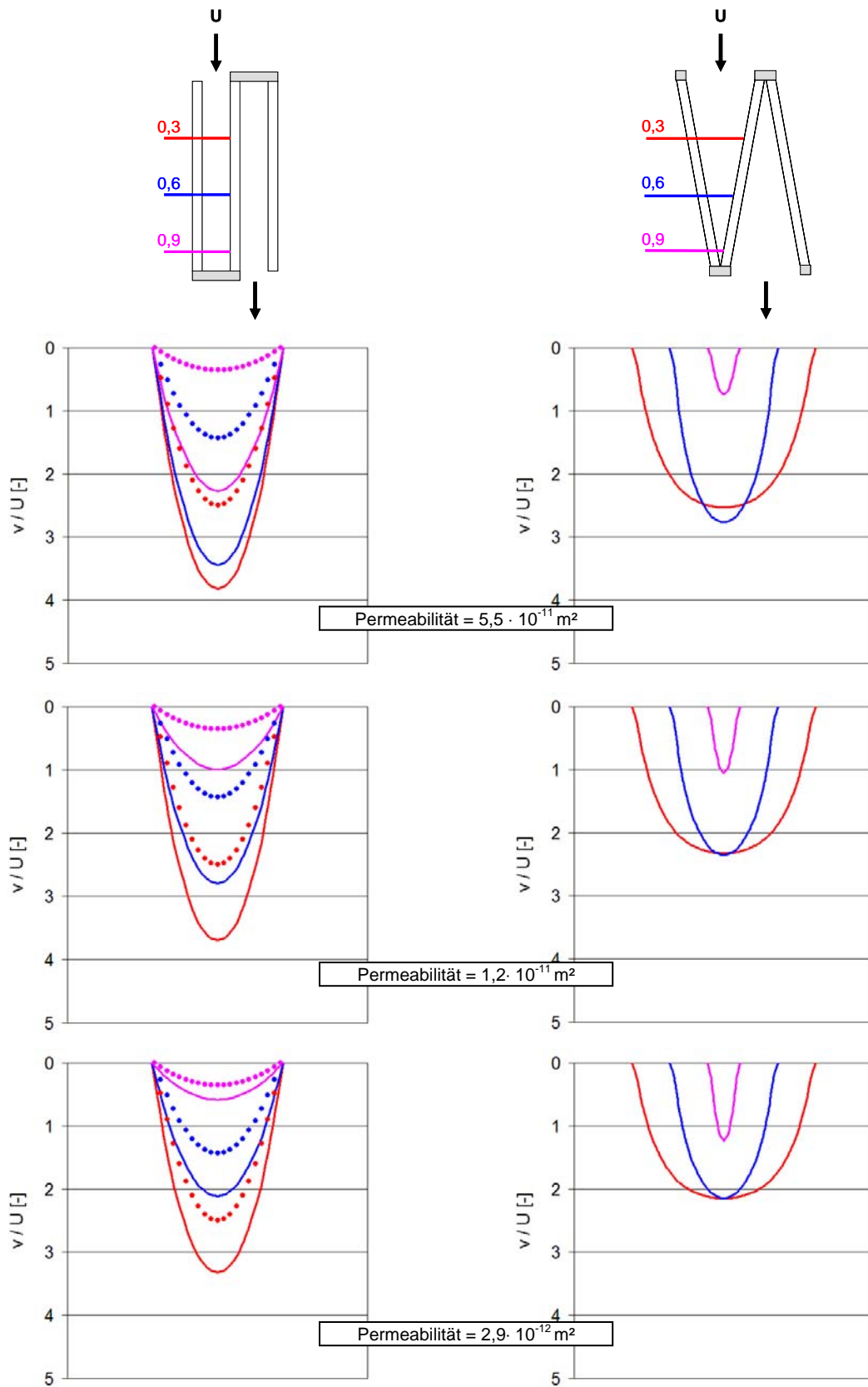
Im Falle einer idealisierten dreieckigen Falte (jeweils rechte Spalte der Abb. 4.65 bis Abb. 4.68) - mit der gegebenen schrägen Anströmsituation - sind die Unterschiede bei den numerischen Berechnungsergebnissen zwischen den verschiedenen Permeabilitäten deutlich geringer als im Falle der idealisierten rechteckigen Geometrie.



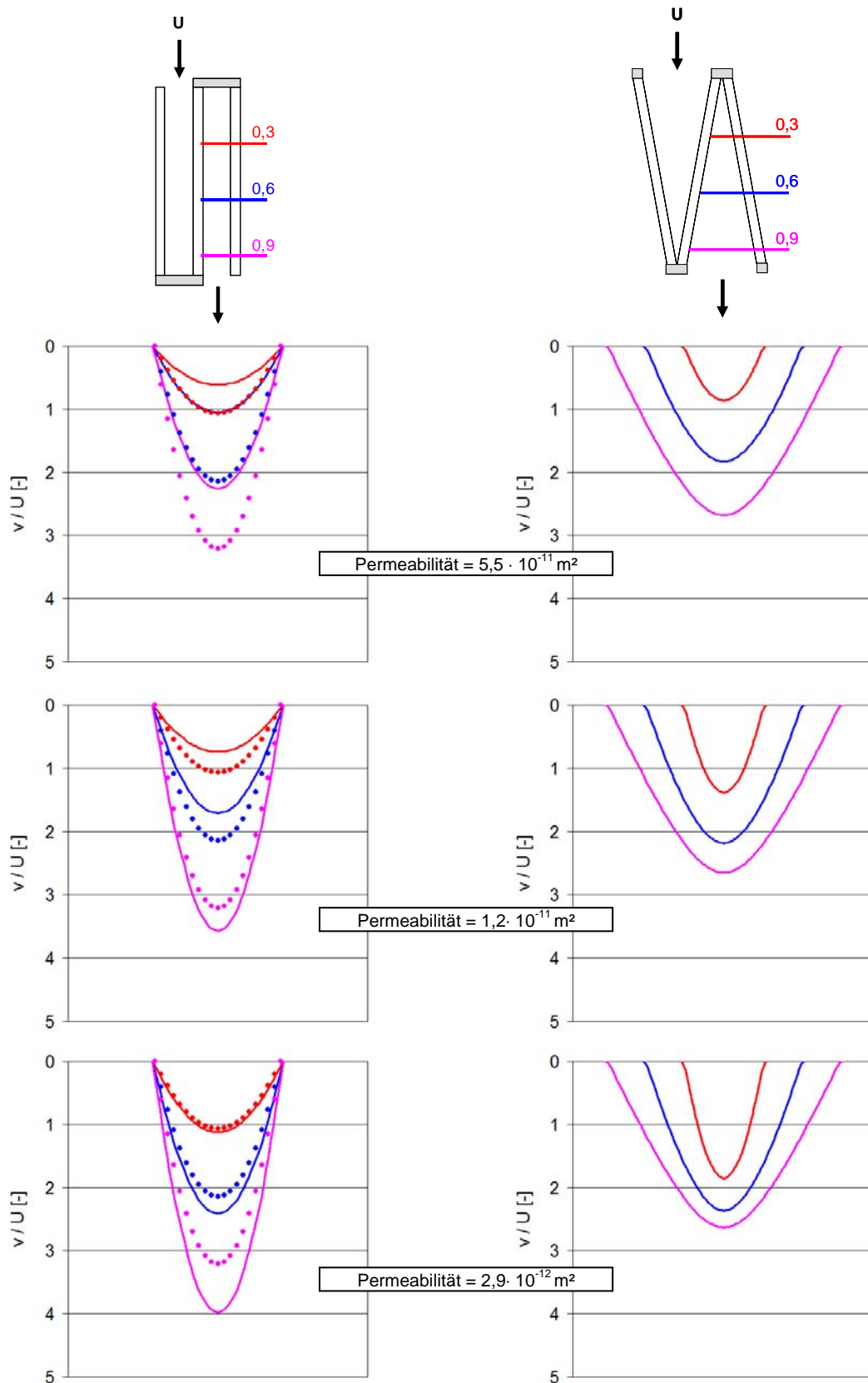
**Abb. 4.65:** normierte anströmseitige Geschwindigkeitsprofile in Hauptströmungsrichtung, Faltenhöhe = 28 mm, Volumenstrom = 660 m³/h auf Panelfilter (610 x 610 mm²)  
 Linien = Ergebnisse der numerischen Berechnung,  
 Punkte = Ergebnisse des analytisch lösablen Modells



**Abb. 4.66:** normierte abströmseitige Geschwindigkeitsprofile in Hauptströmungsrichtung, Faltenhöhe = 28 mm, Volumenstrom = 660 m<sup>3</sup>/h auf Panelfilter (610 x 610 mm<sup>2</sup>)  
 Linien = Ergebnisse der numerischen Berechnung,  
 Punkte = Ergebnisse des analytisch lösbaren Modells



**Abb. 4.67:** normierte anströmseitige Geschwindigkeitsprofile in Hauptströmungsrichtung, Faltenhöhe = 150 mm, Volumenstrom = 2000 m³/h auf Panelfilter (610 x 610 mm²)  
 Linien = Ergebnisse der numerischen Berechnung,  
 Punkte = Ergebnisse des analytisch lösbaren Modells



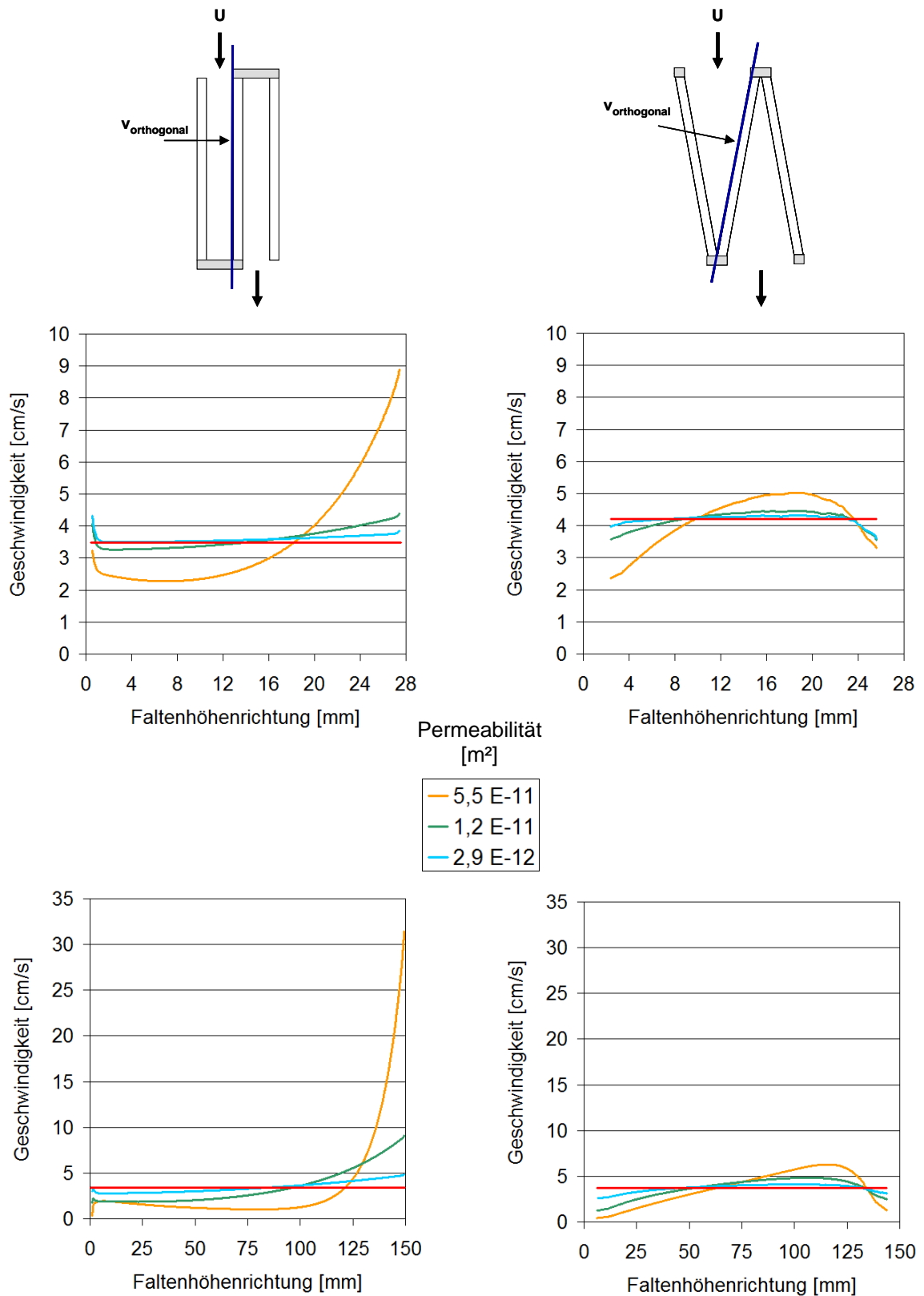
**Abb. 4.68:** normierte abströmseitige Geschwindigkeitsprofile in Hauptströmungsrichtung, Faltenhöhe = 150 mm, Volumenstrom = 2000 m<sup>3</sup>/h auf Panelfilter (610 x 610 mm<sup>2</sup>)  
 Linien = Ergebnisse der numerischen Berechnung,  
 Punkte = Ergebnisse des analytisch lösbaren Modells

Die Unterschiede der numerischen Berechnungsergebnisse zu den im Rahmen des Modells nach Lücke getroffenen Annahmen sind leichter zu erkennen, wenn man die Geschwindigkeit orthogonal zur Flanke der Falte und damit zum Medium betrachtet (s. Abb. 4.69). Links wird der Fall einer rechteckigen, rechts der einer dreieckigen Faltengeometrie dargestellt. Die beiden oberen Diagramme beziehen sich auf die Faltenhöhe von 28 mm, die unteren auf die von 150 mm. Die orangen, grünen und türkisen Kurven beziehen sich auf die drei betrachteten Permeabilitäten. Die rote Kurve ist der Integralwert und somit gleichsam die mittlere Anströmgeschwindigkeit, die das Modell nach Lücke zur Quantifizierung des Medienanteils am Gesamtdruckverlust gemäß der Formel nach Darcy heranzieht.

In den Diagrammen für die rechteckige Geometrie ist zu erkennen, dass die Anströmgeschwindigkeit des Mediums über der Faltenhöhe im Falle der höchsten der drei Permeabilitäten ausgeprägt ungleichförmig ist. Sehr hohe Geschwindigkeiten treten im unteren Bereich der Falte auf. Ein überwiegender Anteil des Gesamtvolumenstromes tritt also erst dort von der Anströmseite auf die Abströmseite über. Ein höherer Strömungswiderstand des Mediums führt zu einer merklichen Homogenisierung. Bei der dreieckigen Geometrie resultiert aus dem Anstellwinkel der Falte gegenüber der Hauptströmungsrichtung eine deutliche Vergleichmäßigung auch wenn keine konstante Geschwindigkeit über der Faltenhöhe vorliegt. Der Integralwert der Geschwindigkeit (rote Linie) ist bei der dreieckigen Falte etwas höher als bei der rechteckigen aufgrund der bereits geschilderten Reduzierung der durchströmten Fläche aufgrund der verkürzten Flanke.

Bei den numerischen Berechnungen wurde der Druckabfall über dem Medium als poröser Struktur genau wie bei dem Modell nach Lücke gemäß der Formel nach Darcy berechnet. Auch hier wird also eine lineare Abhängigkeit des Druckabfalls von der Anströmgeschwindigkeit zugrunde gelegt. Wertet man die Druckdifferenz zwischen einer unmittelbar vor und hinter der Flanke der Falte gelegenen Schnittebene aus, ergibt sich ein Integralwert, der dem Wert entspricht, der beim Lücke Modell unter der Annahme einer konstanten Geschwindigkeit über der Faltenhöhe resultiert.

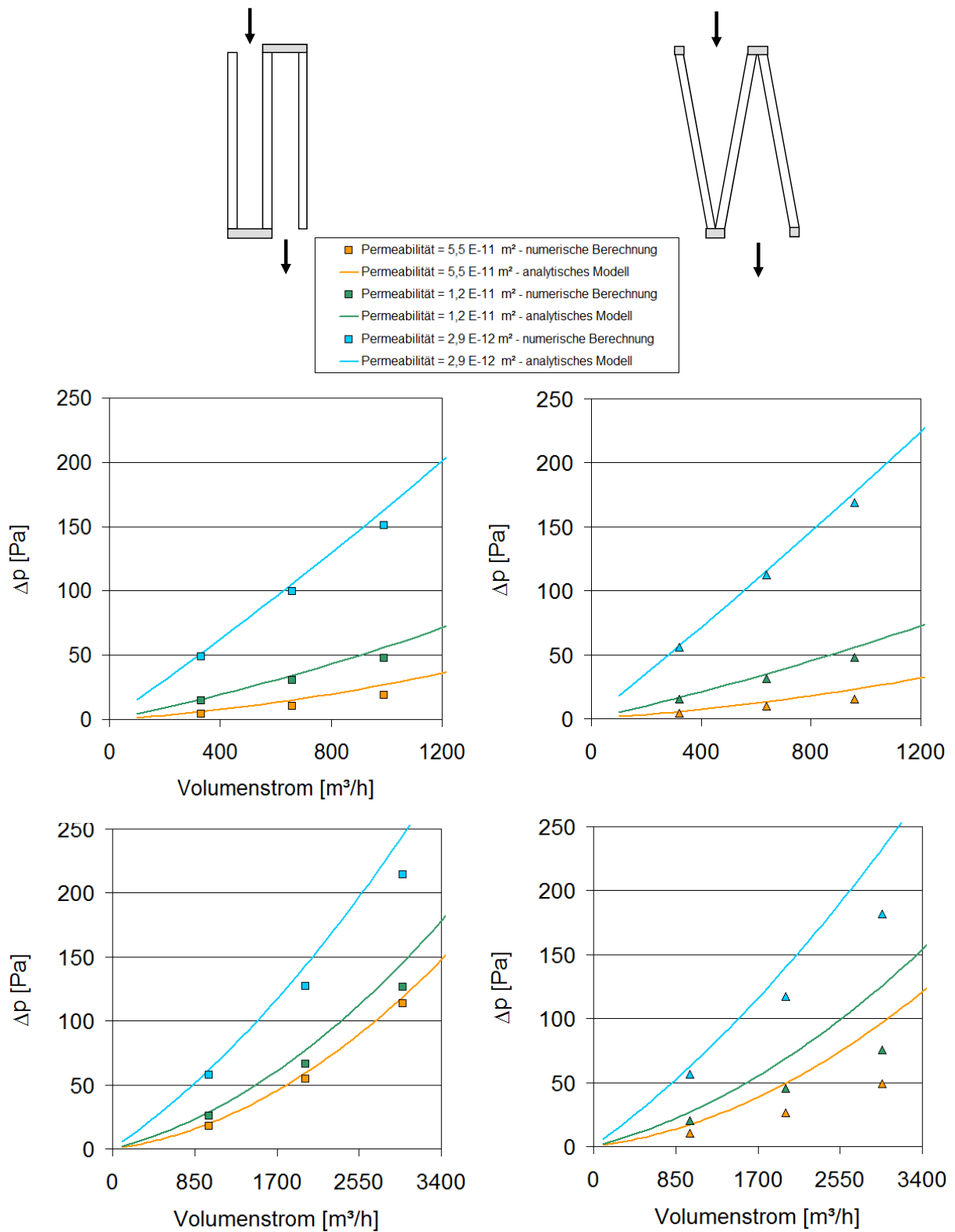




**Abb. 4.69: Geschwindigkeit orthogonal zum Filtermedium als Funktion der Faltenhöhe gemäß der numerischen Berechnung, oben - Faltenhöhe = 28 mm, Volumenstrom = 660 m³/h, unten - Faltenhöhe = 150 mm, Volumenstrom = 2000 m³/h, rote horizontale Linie = gemäß Annahme des analytisch lösbaren Modells**

In Abb. 4.70 werden Berechnungsergebnisse zum Gesamtdruckverlust als Funktion des Volumenstromes im Vergleich der numerischen Ergebnisse und der Ergebnisse des Modells nach Lücke gegenübergestellt. Die beiden oberen Diagramme beziehen sich auf die Faltenhöhe von 28 mm, die unteren auf die von 150 mm. Die numerischen Ergebnisse werden durch die Datenpunkte repräsentiert. Neben den bisherigen Volumenströmen - respektive den korrespondierenden Anströmgeschwindigkeiten des Faltenpaketes - wurden die Berechnungen auch beim 0,5- und 2-fachen davon ausgeführt. Für den Vergleich der Ergebnisse des Lücke Modells mit den numerischen bei der dreieckigen Geometrie wurde bei ersterem auf den Druckverlustanteil durch Einschnürung / Aufweitung verzichtet, da die Querschnittsverengung bei Eintritt in die Falte hierbei zu vernachlässigen ist. Ferner wurde die Verkürzung der Falte berücksichtigt. Die Berechnung des Gassenanteils des Druckverlustes beim Modell nach Lücke erfolgt aber weiterhin auf Basis der Annahme einer rechteckigen Geometrie, weil nur so eine analytisch lösbare Mathematik resultiert. Es zeigt sich, dass sich für die Faltenhöhe von 28 mm für beide Geometrien und alle drei betrachteten Permeabilitäten eine sehr gute Übereinstimmung ergibt, wobei das Modell nach Lücke gegenüber den numerischen Ergebnissen geringfügig überprognostiziert.

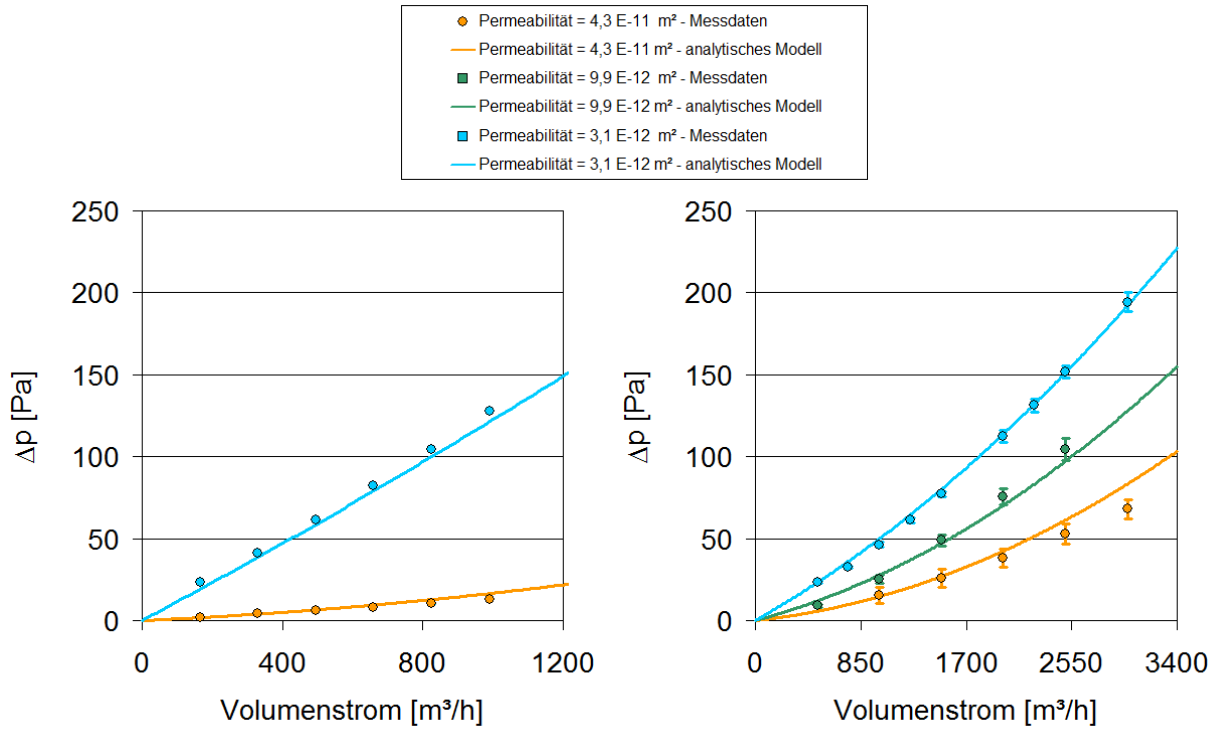
Bei der Faltenhöhe von 150 mm ergibt sich für die rechteckige Geometrie und die größte der Permeabilitäten (orange Kurve) ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung. Hin zu geringeren Permeabilitäten und hin zu höheren Volumenströmen wird die Überprognostizierung des Modells nach Lücke ausgeprägter. Im Falle der dreieckigen Geometrie bei dieser Faltenhöhe prognostiziert das Modell nach Lücke gegenüber den numerischen Ergebnissen für alle drei Permeabilitäten deutlich über.



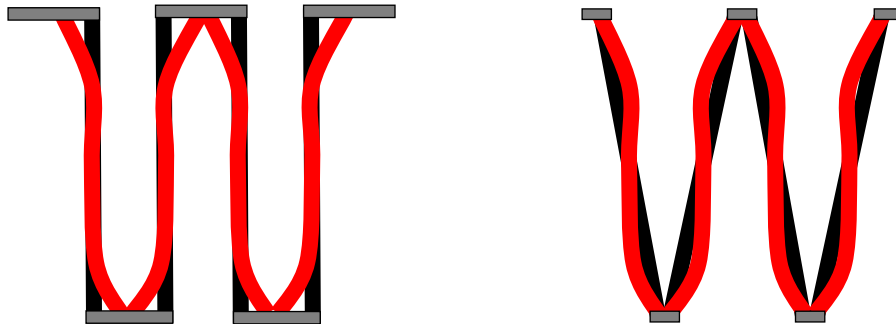
**Abb. 4.70: Druckverlust als Funktion des Volumenstroms, Panelfilter (610 x 610 mm<sup>2</sup>), Vergleich der numerischen Berechnungsergebnisse mit denen des analytisch lösbaren Modells, links - bei Annahme rechteckiger Faltengeometrie, rechts - bei Annahme dreieckiger Faltengeometrie, oben - für Faltenhöhe = 28 mm, unten - für Faltenhöhe = 150 mm**

Bisher wurden hinsichtlich des Einflusses plissierter Strukturen auf das Strömungsfeld und den Druckverlust vergleichende Gegenüberstellungen von Ergebnissen der numerischen Berechnungen mit dem Modell nach Lücke gezeigt. Abb. 4.71 zeigt nun den Vergleich von Messdaten zum Anfangsdruckverlust von Panelfiltern mit den entsprechenden Vorhersagen des Modells nach Lücke. Das linke Diagramm bezieht sich auf Faltenpakete mit der Faltenhöhe von 28 mm, das rechte auf solche mit 150 mm. Die drei bzw. im Falle der Faltenhöhe von 28 mm zwei betrachteten Permeabilitäten der in den konfektionierten Filtern verbauten Medien sind nicht ganz identisch mit den bisher im Modellvergleich betrachteten Permeabilitäten, liegen aber in sehr ähnlichen Bereichen. Mit dem Modell nach Lücke lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messdaten erzielen, wenn man bei diesem von der bezüglich des Gassenanteils notwendigerweise rechteckigen Geometrie ausgeht, keine Reduzierung der durchströmten Fläche der Falten berücksichtigt und auf den Druckverlustanteil aufgrund von Einschnürung / Aufweitung verzichtet. Warum dieses eine sinnvolle Vorgehensweise ist, wird in Abb. 4.72 veranschaulicht. Die Realgeometrie der Falten im Schnitt ist typischerweise weder ideal rechteckig noch dreieckig. Die mit Heißkleberauppen auseinander gehaltenen und somit möglichst auch für die Durchströmung im Betrieb formstabilisierten Falten können in der Regel eher mit einer etwas "bauchigen" Gestalt annäherungsweise beschrieben werden. Diese ist in der Abbildung rot gekennzeichnet. Vergleicht man diese Geometrie mit der idealisiert rechteckigen bzw. der idealisiert dreieckigen erkennt man, dass in Teilen eher eine Übereinstimmung mit der einen in Teilen mit der anderen gegeben ist. Die Flanken der Falten können eher als zueinander parallel angesehen werden, was über weite Bereiche der Faltenhöhe einer idealisiert rechteckigen Geometrie entspricht. An den Spitzen korrespondiert diese Geometrie aber eher mit der dreieckig angenommenen, was die Vernachlässigung des Druckverlustanteils durch Einschnürung / Aufweitung rechtfertigt.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass das Modell nach Lücke mit den analytisch lösbaren Gleichungen zur Beschreibung des Gassenanteils nicht nur für Faltenpakete aus dem Bereich der Schwebstofffilter - wofür es laut Literatur als valide erachtet wird - angewendet werden kann, sondern auch für Filter aus dem RLT-Bereich.



**Abb. 4.71: Druckverlust als Funktion des Volumenstroms, Panelfilter (610 x 610 mm<sup>2</sup>), Vergleich der Ergebnisse des analytisch lösbaren Modells mit Messdaten, links - für Faltenhöhe = 28 mm, rechts - für Faltenhöhe = 150 mm**



**Abb. 4.72: Veranschaulichung einer real eher "bauchigen" Faltengeometrie im Vergleich zu einer rechteckigen und einer dreieckigen Faltengeometrie**

### Partikeltrajektorien in Vergleich unbeladener und beladener Faltenpakete

Im Folgenden werden Ergebnisse von numerischen Berechnungen vorgestellt, bei denen Partikeltrajektorien für unterschiedliche Partikeldurchmesser zunächst innerhalb einer als rechteckig angenommener Faltengeometrie betrachtet werden. In diesem Rahmen werden auch Betrachtungen angestellt, wie sich diese mit zunehmender Beladung der plissierten Strukturen ändern. Die Beladung führt, solange es sich um eine Tiefenfiltration handelt und noch kein Schichtaufbau eines Filterkuchens im Sinne der Oberflächenfiltration stattfindet, zu einer Änderung der Permeabilität des Filtermediums aufgrund der eingelagerten Partikel. Wenn eine inhomogene Anströmung des Filters über der Faltenhöhe gegeben ist und damit auch eine ungleichförmige Beaufschlagung mit Partikeln, ergibt sich eine ortsabhängige Änderung der Permeabilität in Faltenhöhenrichtung. In Abb. 4.73 wird für eine Faltenhöhe von 150 mm gezeigt, wie die Änderung der Permeabilität in den weiteren Betrachtungen berücksichtigt wird. Um eine ausgeprägt inhomogene Anströmgeschwindigkeit über der Faltenhöhe zu simulieren, wurde die Permeabilität von  $5,5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$  für das Filtermedium im Anfangsstadium angesetzt (Vergleiche hierzu Abb. 4.69, Diagramm unten links, orange Kurve). Ausgehend von diesem Anfangsstadium (Fall A) wurden für ein späteres Beladungsstadium zwei unterschiedliche Funktionen verwendet. Einerseits wurde ein linearer Verlauf der Permeabilität über der Faltenhöhe (Fall B), andererseits ein exponentieller (Fall C) angenommen. Die lineare Funktion des Falls B wurde so gewählt, dass sich der Integralwert des Druckabfalls über dem Filtermedium gegenüber dem Anfangszustand verdoppelt. Die exponentielle Funktion des Falls C wurde dann so gewählt, dass die Permeabilität am Ende der Falte ungefähr derjenigen des Falls B entsprach.

In Abb. 4.74 ist der Druckabfall über das Medium über der Faltenhöhe aufgetragen. Der Druckverlustverlauf ändert sich vom Ausgangsstadium Fall A (schwarze Kurve) zum angenommenen Beladungsstadium Fall B mit linearem Verlauf der Permeabilität (blaue Kurve) bzw. zum Fall C mit exponentiellem Verlauf (rote Kurve). Die entsprechenden Integralwerte sind als gestrichelte Linien dargestellt.

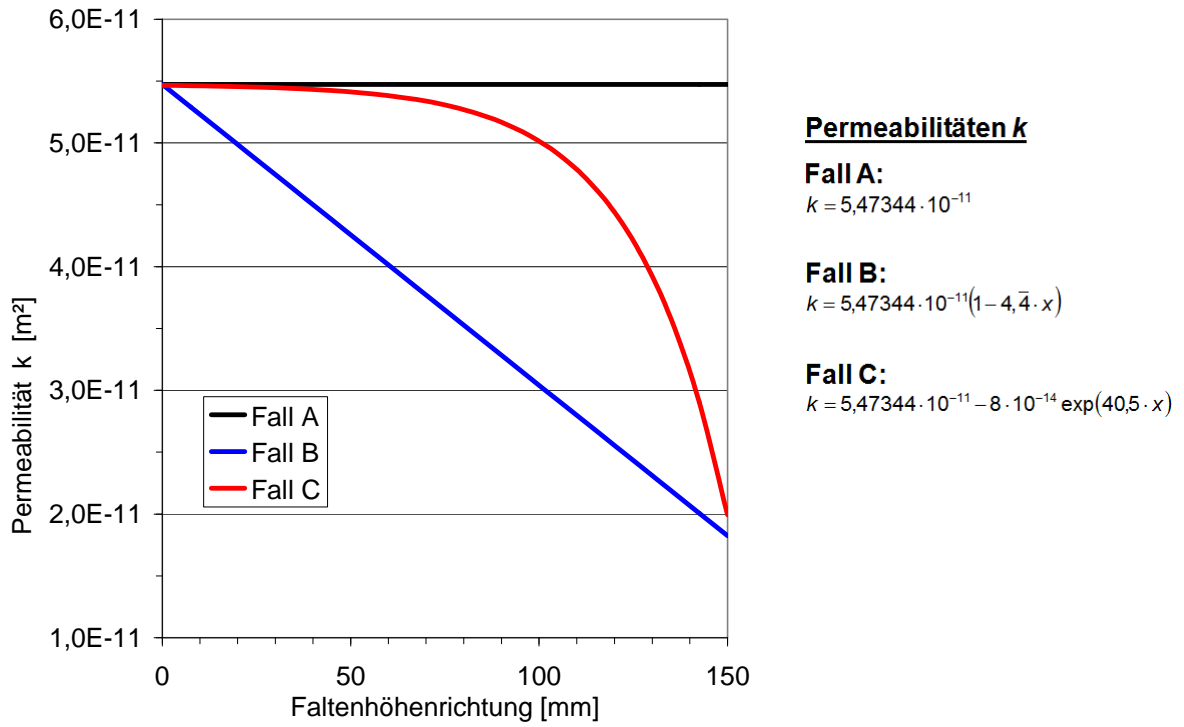


Abb. 4.73: angenommene Veränderungen der Permeabilität für ein späteres Beladungsstadium

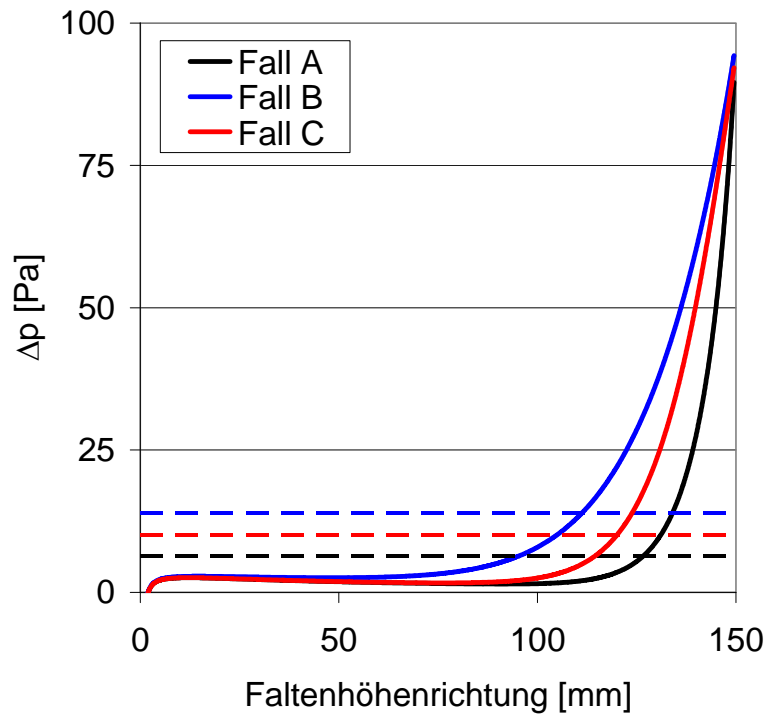


Abb. 4.74: Druckverlust über das Filtermedium aufgetragen über der Faltenhöhenrichtung

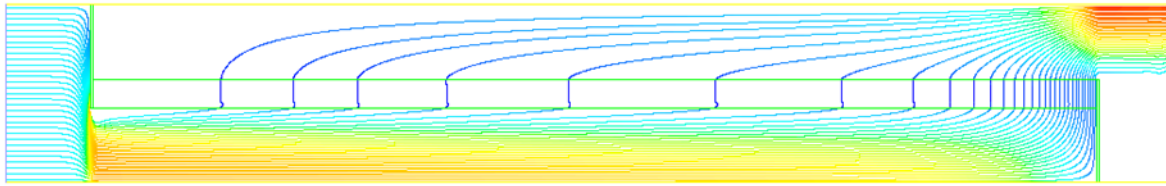
In den Abb. 4.75 bis Abb. 4.78 werden die Partikelbahnlinien für Partikel mit einem Durchmesser von 0,1  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  und 5  $\mu\text{m}$  innerhalb der rechteckigen Falte für alle drei Fälle gezeigt. Die Partikelbahnen stellen ein Maß für die Beaufschlagung des Filtermediums dar. 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. Während bei den Partikeldurchmessern von 0,1  $\mu\text{m}$  und 1  $\mu\text{m}$  für die angenommenen Beladungsstadien (Fälle B und C) gegenüber dem Fall A die "Aufspreizung" der Partikeltrajektorien am rechten Ende der Falte nur sehr gering ist, stellt sich dieser Effekt bei den Partikeldurchmessern von 3  $\mu\text{m}$  und 5  $\mu\text{m}$  deutlich ausgeprägter dar. Im Vergleich dieser beiden Partikeldurchmesser zeigt sich der Trägheitseinfluss.

In den Abb. 4.79 bis Abb. 4.82 werden nun dieselben Betrachtungen unter Annahme einer dreieckigen Faltengeometrie gezeigt. Aufgrund der Tatsache, dass sich bei der rechteckigen Faltengeometrie die "Aufspreizung" der Partikelbahnlinien bei der Annahme einer linearen Abhängigkeit der Permeabilität über der Faltenhöhe für das beladene Stadium (Fall B) stärker ausprägt, wird hier nur dieser Fall im Vergleich zum anfänglichen Stadium (Fall A) vorgestellt. Wegen der bei der dreieckigen Faltengeometrie deutlich homogeneren Anströmgeschwindigkeit des Mediums über der Faltenhöhe aufgrund der schrägen Anströmung, liegt für alle betrachteten Partikeldurchmesser schon im Anfangsstadium (Fall A) eine sehr viel gleichmäßigere Beaufschlagung vor. Eine Änderung der Trajektorien beim angenommenen Beladungsstadium (Fall B) gegenüber dem Fall A ist kaum zu erkennen.

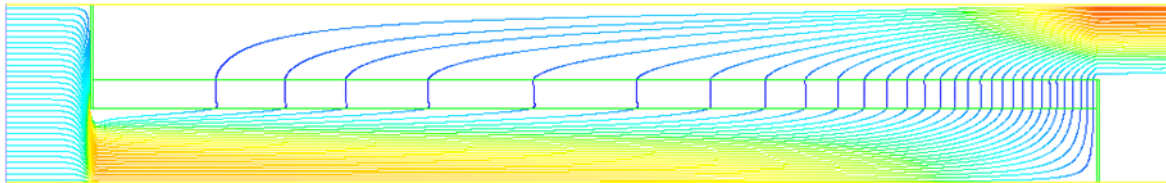
Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass im Falle eines Filters mit einer angenommenen rechteckigen Faltengeometrie bei Verwendung eines Filtermediums mit hoher Permeabilität eine sehr ungleichförmige Abscheidung der Partikel über der Faltenhöhe stattfindet. Insbesondere die größeren Partikel treffen erst am Ende der Falte auf das Medium. Mit zunehmender Beladung wird sich sukzessive eine Vergleichmäßigung der Strömung und der Partikelbeaufschlagung ergeben.



Fall A



Fall B



Fall C

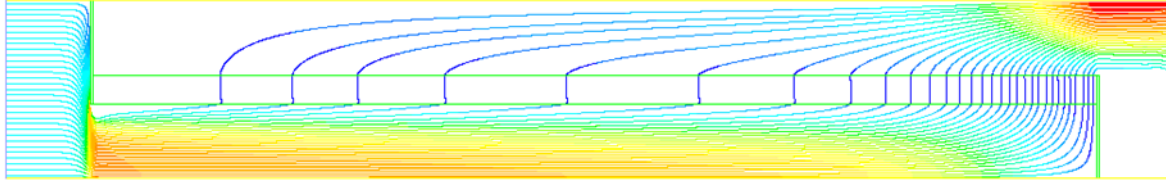
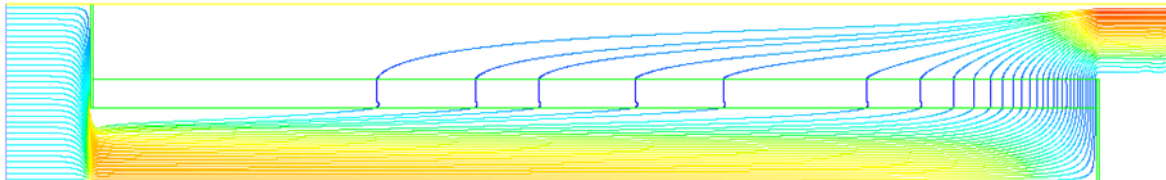
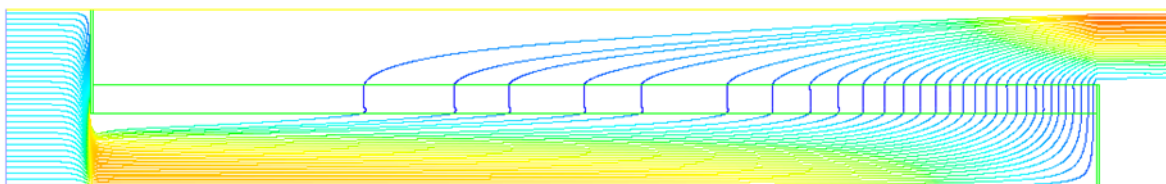


Abb. 4.75: Partikeltrajektorien ( $d_p = 0,1 \mu\text{m}$ ),  
Faltenhöhe = 150 mm, Volumenstrom = 3000 m<sup>3</sup>/h auf Panelfilter (610 x 610 mm<sup>2</sup>),  
Annahme rechteckiger Faltengeometrie

Fall A



Fall B



Fall C

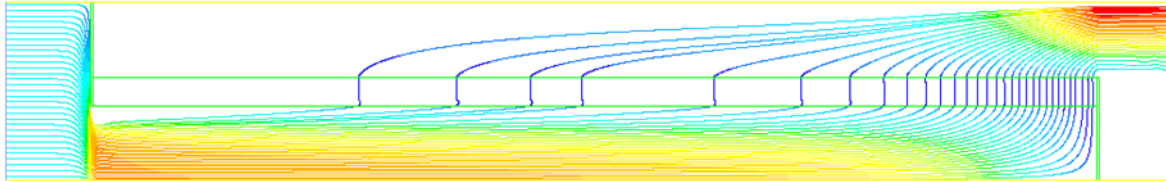


Abb. 4.76: Partikeltrajektorien ( $d_p = 1 \mu\text{m}$ ),  
Faltenhöhe = 150 mm, Volumenstrom = 3000 m<sup>3</sup>/h auf Panelfilter (610 x 610 mm<sup>2</sup>),  
Annahme rechteckiger Faltengeometrie

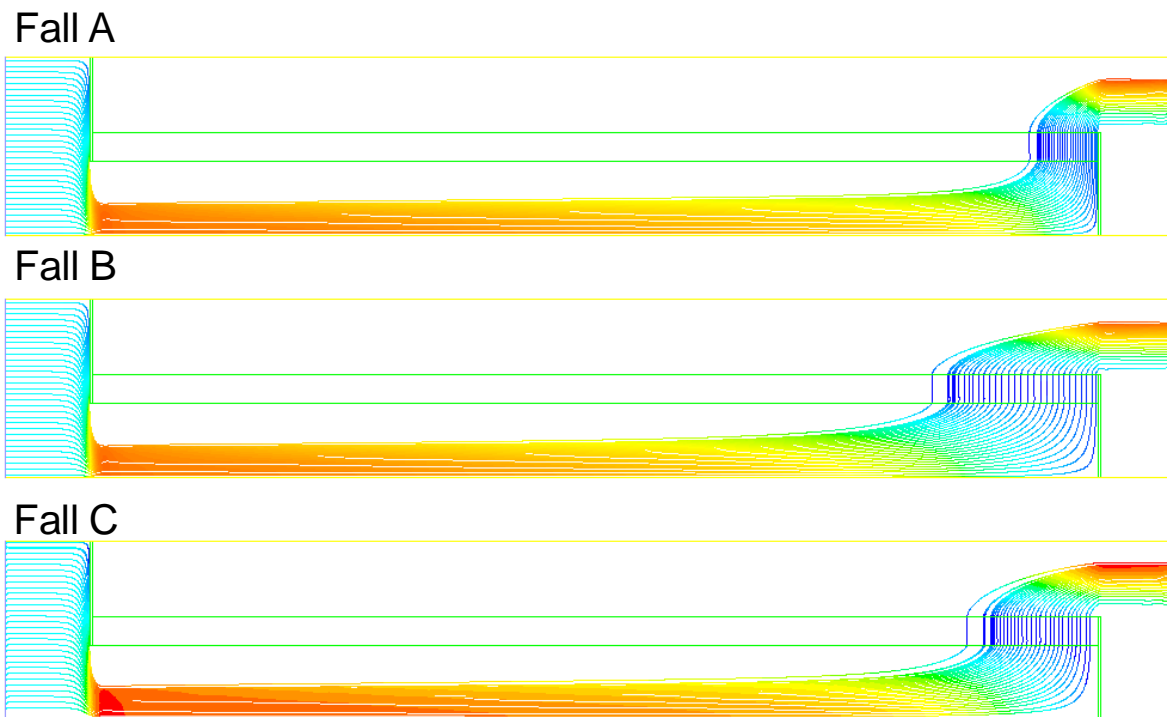


Abb. 4.77: Partikeltrajektorien ( $d_p = 3 \mu\text{m}$ ),  
Faltenhöhe = 150 mm, Volumenstrom = 3000 m<sup>3</sup>/h auf Panelfilter (610 x 610 mm<sup>2</sup>),  
Annahme rechteckiger Faltengeometrie

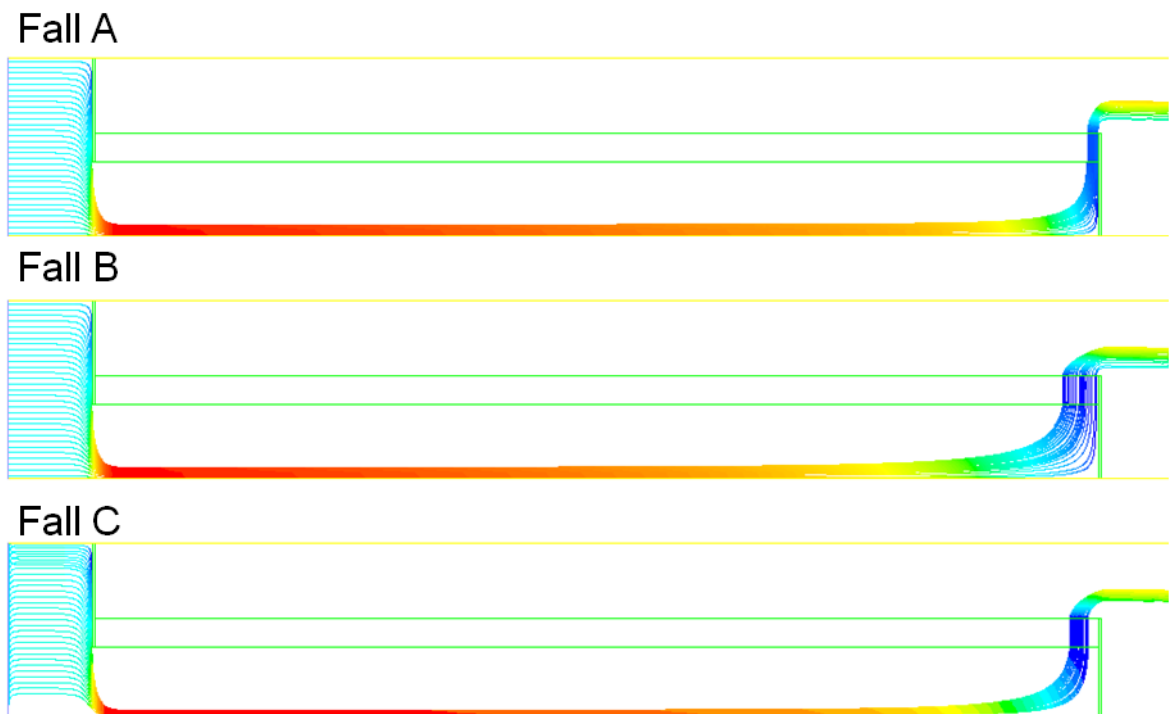
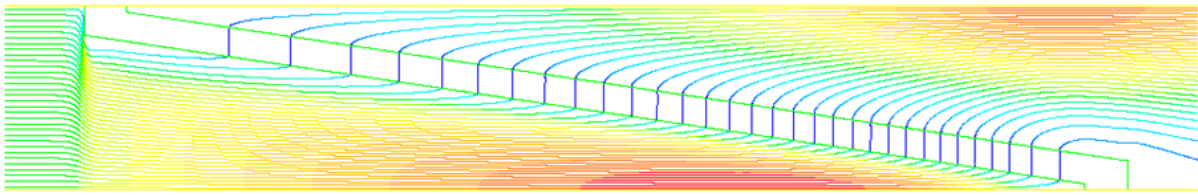
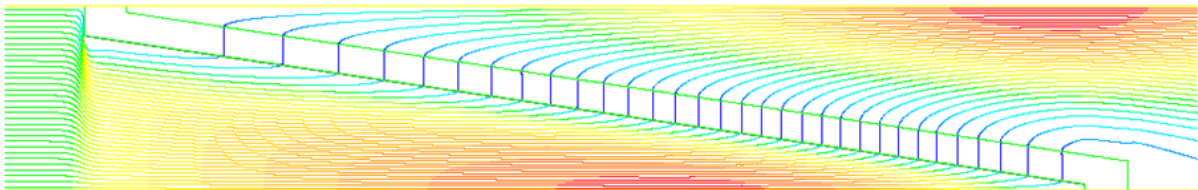


Abb. 4.78: Partikeltrajektorien ( $d_p = 5 \mu\text{m}$ ),  
Faltenhöhe = 150 mm, Volumenstrom = 3000 m<sup>3</sup>/h auf Panelfilter (610 x 610 mm<sup>2</sup>),  
Annahme rechteckiger Faltengeometrie

### Fall A

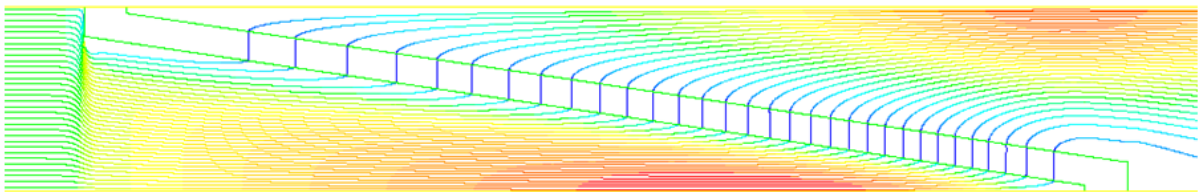


### Fall B

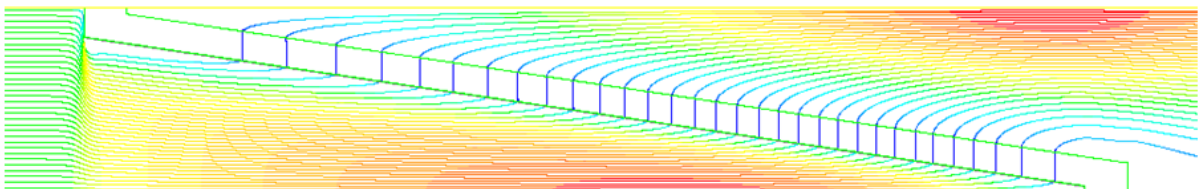


**Abb. 4.79: Partikeltrajektorien ( $d_p = 0,1 \mu\text{m}$ ),  
Faltenhöhe = 150 mm, Volumenstrom = 3000 m<sup>3</sup>/h auf Panelfilter (610 x 610 mm<sup>2</sup>),  
Annahme dreieckiger Faltengeometrie**

### Fall A

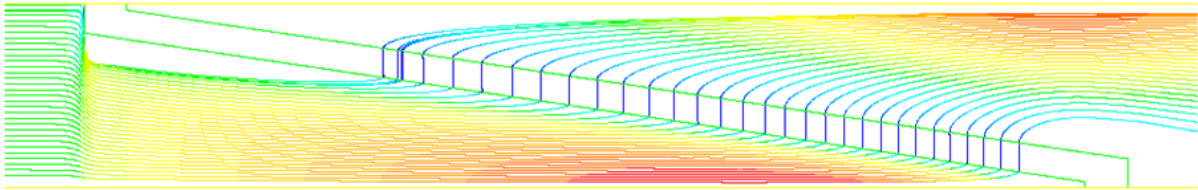


### Fall B

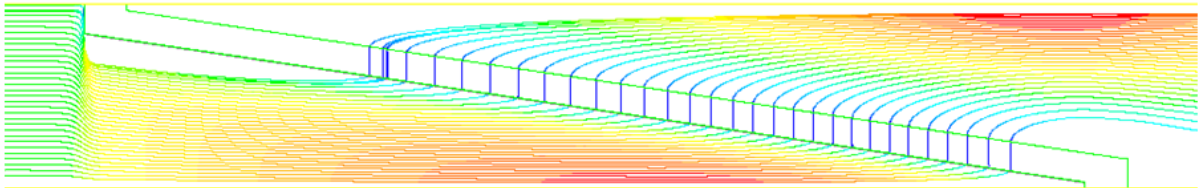


**Abb. 4.80: Partikeltrajektorien ( $d_p = 1 \mu\text{m}$ ),  
Faltenhöhe = 150 mm, Volumenstrom = 3000 m<sup>3</sup>/h auf Panelfilter (610 x 610 mm<sup>2</sup>),  
Annahme dreieckiger Faltengeometrie**

### Fall A

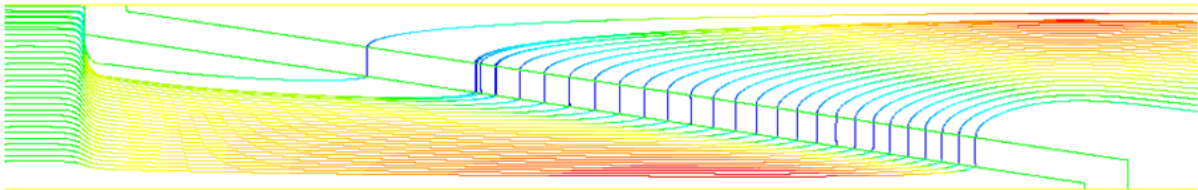


### Fall B

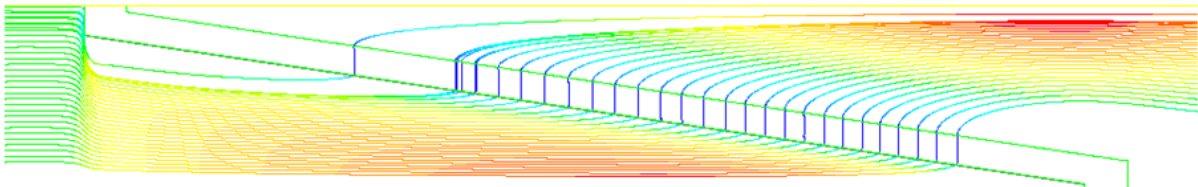


**Abb. 4.81: Partikeltrajektorien ( $d_p = 3 \mu\text{m}$ ),  
Faltenhöhe = 150 mm, Volumenstrom = 3000 m<sup>3</sup>/h auf Panelfilter (610 x 610 mm<sup>2</sup>),  
Annahme dreieckiger Faltengeometrie**

### Fall A



### Fall B



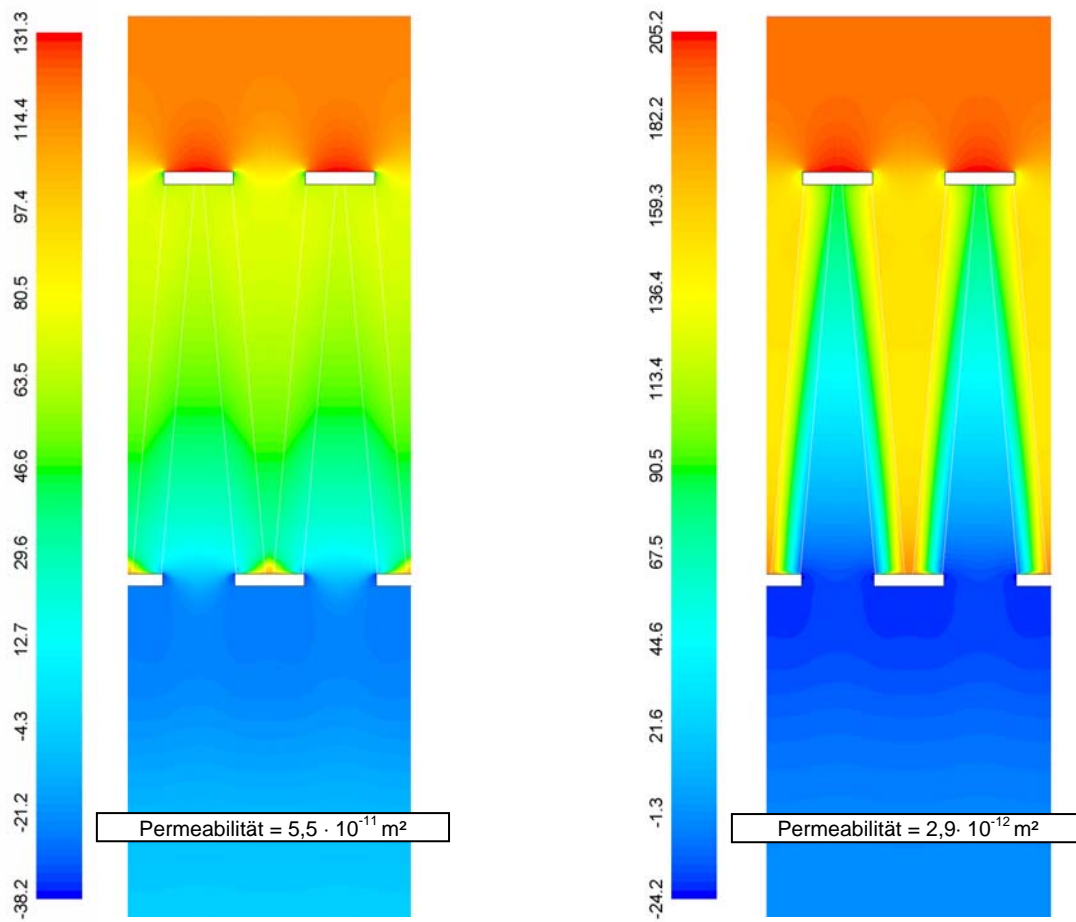
**Abb. 4.82: Partikeltrajektorien ( $d_p = 5 \mu\text{m}$ ),  
Faltenhöhe = 150 mm, Volumenstrom = 3000 m<sup>3</sup>/h auf Panelfilter (610 x 610 mm<sup>2</sup>),  
Annahme dreieckiger Faltengeometrie**

### Strömungsfeld und Druckverlust von Kassettenfiltern

Nachfolgend werden numerische Berechnungsergebnisse zum Druckverlust und zu den Geschwindigkeitsprofilen bei Kassettenfiltern vorgestellt. Wie bei den Panelfiltern (bzw. den orthogonal angeströmten Faltenpaketen) wurden auch die Berechnungen für die Filterkassetten als 2-dimensionale Berechnungen durchgeführt. Hierbei wurden die einzelnen innerhalb der Kassette schräg zur Hauptströmungsrichtung angeordneten Faltenpakete insgesamt als poröse Struktur angenommen und nicht die Plissierung im Detail abgebildet. Diesen porösen Strukturen wurden dann Permeabilitäten zugewiesen, die sich aus den Druckverlusten des orthogonal angeströmten Faltenpaketes bei der entsprechenden mittleren Anströmgeschwindigkeit ergeben haben.

Abb. 4.83 zeigt in Farbverlaufsdarstellung den statischen Druck an einer Filterkassette mit 8 Faltenpaketen. Dargestellt ist hier nur die Hälfte der Kassette. Die in der Abbildung angegebenen Permeabilitäten sind die Permeabilitäten der gedanklich zugrunde gelegten Filtermedien, nicht diejenigen die den Faltenpaketen (Stärke des Faltenpaketes = Faltenhöhe = 28 mm) zugewiesen wurden. In der Abbildung erkennt man - qualitativ vergleichbar zu dem, was bereits für den statischen Druck innerhalb der Falten eines Faltenpaketes festgestellt wurde -, dass auch für die Kassetten bei einer hohen Permeabilität (links in der Abbildung) der Farbunterschied von An- zu Abströmseite erst im unteren Bereich stärker wird. Das heißt, dass erst dort ein Großteil des Druckabfalls erfolgt, weil die Anströmung der Faltenpakete über der Bautiefe der Kassette inhomogen ist. Im Falle der deutlich geringeren Permeabilität ist der Druckabfall (Farbunterschied) sehr viel gleichmäßiger über der Bautiefe.

Abb. 4.84 zeigt die zugehörigen Konturplots der Geschwindigkeit. Logischerweise ist die Geschwindigkeit im Falle der höheren Permeabilität unten auf der Anströmseite noch auf einem signifikant höheren Niveau als im Falle der geringen Permeabilität (Bereiche in der Abbildung durch Pfeile gekennzeichnet).



**Abb. 4.83:** Konturplots des statischen Drucks [Pa], Filterkassette, Volumenstrom = 3400 m<sup>3</sup>/h

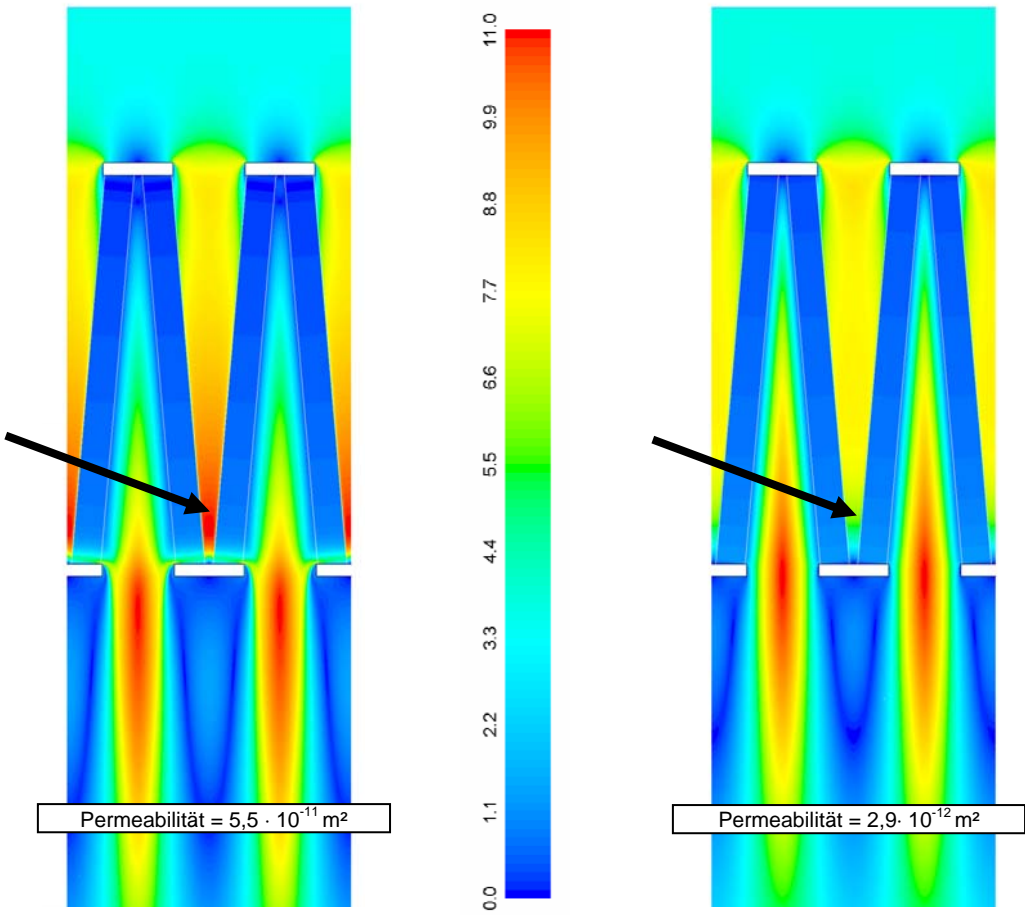


Abb. 4.84: Konturplots der Geschwindigkeit [m/s], Filterkassette, Volumenstrom = 3400 m³/h

Abb. 4.85 zeigt die an- und abströmseitigen Geschwindigkeitsprofile (Komponente in Hauptströmungsrichtung), die mit der mittleren Anströmgeschwindigkeit der Kassette normiert wurden, auf Schnittebenen bei 30 %, 60 % und 90 % der Kassettenbautiefe. Zunächst fällt hierbei auf, dass auf der Anströmseite ein Kolbenprofil und somit eine turbulente Strömung vorliegt, während sich auf der Abströmseite parabolische, laminare Profile ergeben. Der Druckverlust der Faltenpakete und der über die Höhe der Kassette sukzessive Durchtritt des Volumenstroms auf die Abströmseite bewirken, dass dort anders als auf der Anströmseite diese laminare Strömungssituation vorliegt.

Eine Filterkassette dieser Bauform wird bei einem Volumenstrom von 3400 m<sup>3</sup>/h mit einer mittleren Geschwindigkeit von ca. 2,5 m/s angeströmt. Unmittelbar nach dem Eintritt in die Kassette hinter dem Einströmrahmen ergibt sich dann eine mittlere Geschwindigkeit von ca. 6,3 m/s. Die mittlere Anströmgeschwindigkeit der bei diesem Filter acht Faltenpakete beträgt ca. 0,62 m/s. Die mittlere Filtrationsgeschwindigkeit bei Durchströmen des Mediums schließlich nur noch ca. 0,035 m/s.

Die Unterschiede der Strömungssituation für die drei in der Abbildung betrachteten Permeabilitäten der zugrunde gelegten Medien, lassen sich leichter als beim Vergleich der in der Abb. 4.85 gezeigten Geschwindigkeitsprofile erkennen, wenn man die Anströmgeschwindigkeit orthogonal zu den Faltenpaketen betrachtet (Abb. 4.86). Wie schon innerhalb der Falten eines Faltenpaketes zeigt sich auch hier für die gesamte Kassette, dass bei einem Filter mit einer hohen Permeabilität (orange Kurve) eine sehr inhomogene Anströmung über der Kassettenbautiefe vorliegt. Mit geringer Permeabilität wird die Geschwindigkeitsverteilung deutlich gleichmäßiger. Auch bei einer Kassette ist mit einer ungleichförmigen Beaufschlagung mit Partikeln zu rechnen, wie sie sich bereits innerhalb der Falten eines Faltenpaketes bei angenommener rechteckiger Geometrie dargestellt hat.



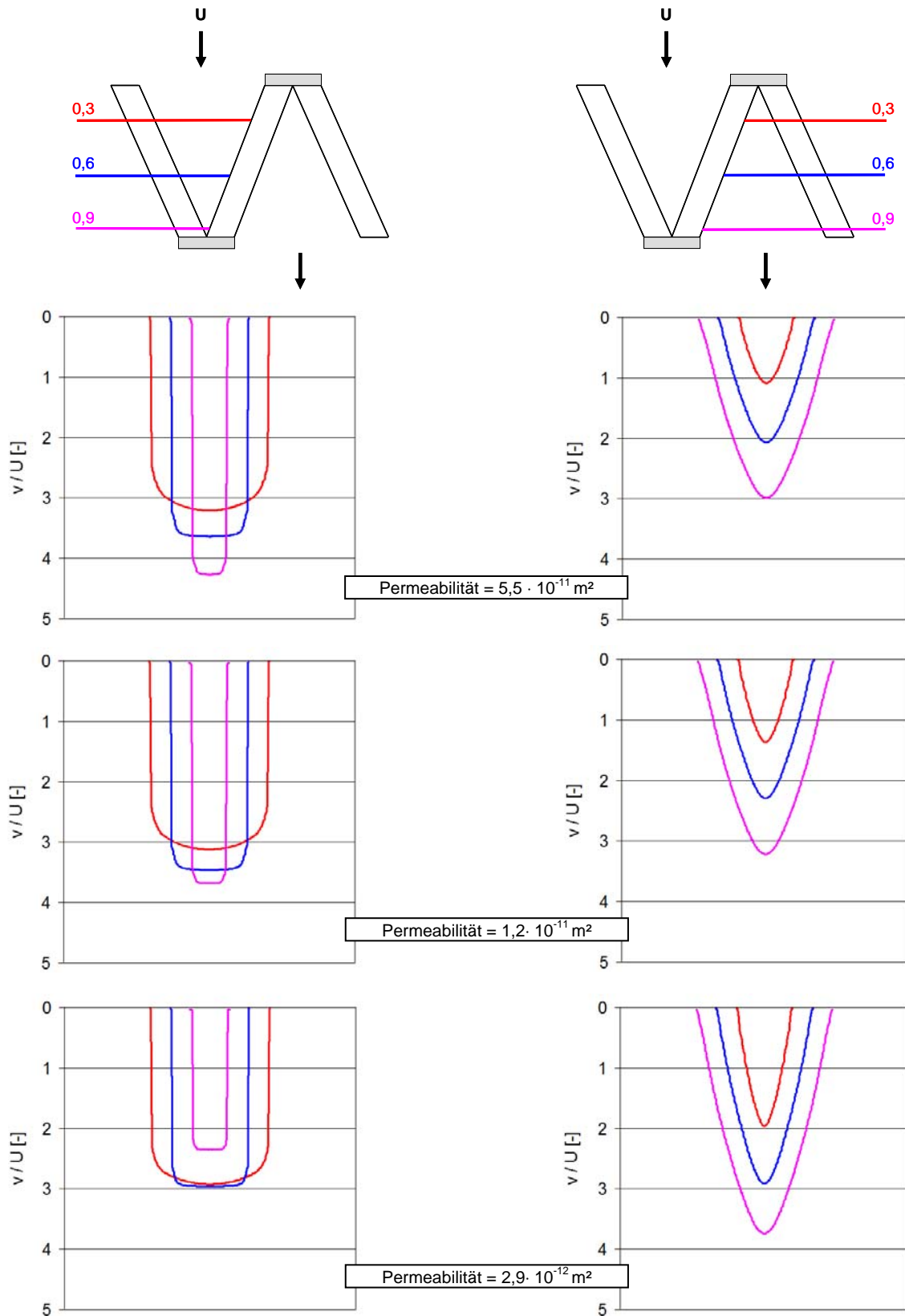
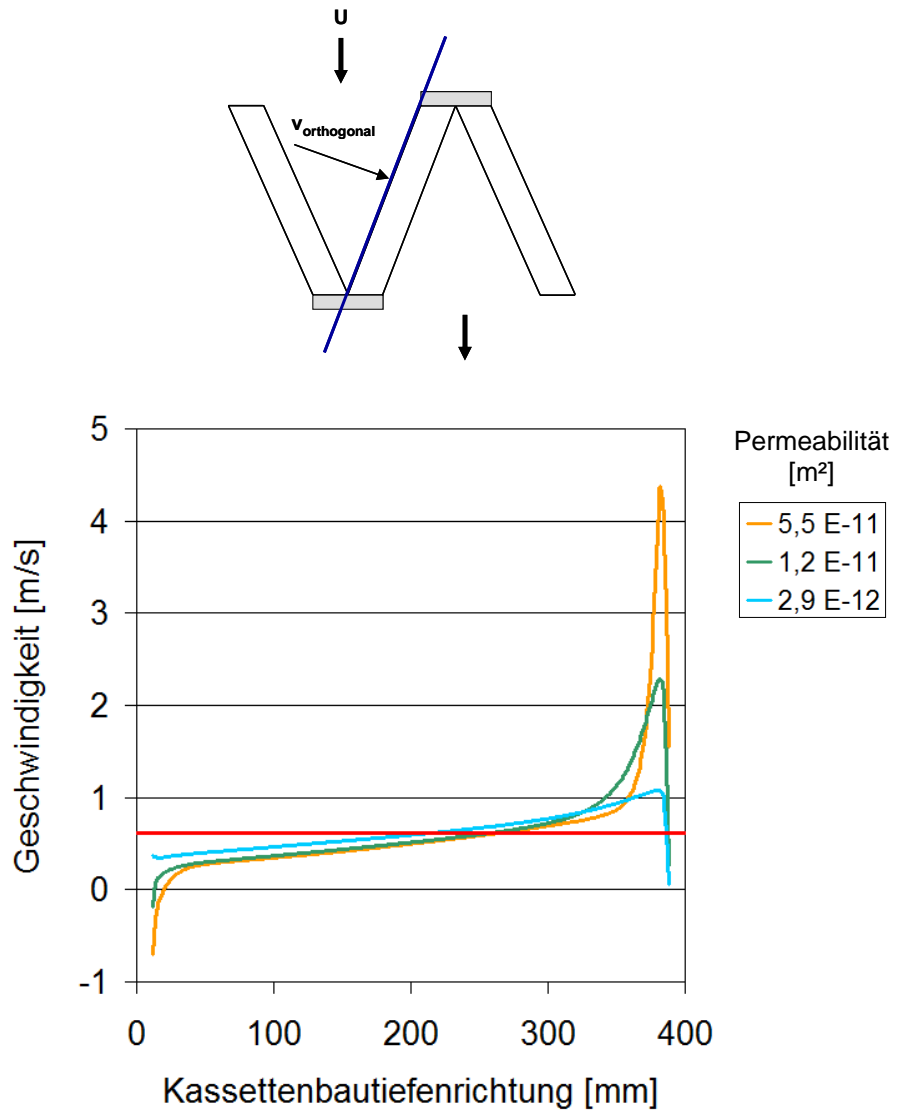


Abb. 4.85: normierte Geschwindigkeitsprofile in Hauptströmungsrichtung, Filterkassette, Volumenstrom = 3400 m<sup>3</sup>/h



**Abb. 4.86:** Geschwindigkeit orthogonal zum Faltenpaket als Funktion der Kassettenbautiefe gemäß der numerischen Berechnung, Volumenstrom = 3400 m<sup>3</sup>/h, rote horizontale Linie = bei Annahme homogener Geschwindigkeit über d. Bautiefe

## 5 Fazit

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene RLT-Filtertypen über einen Zeitraum von bis zu 21 Monaten in Lüftungsanlagen der Universität Duisburg-Essen und des IUTA im Realbetrieb gealtert. Nach jeweils einigen Monaten Nutzungsdauer wurden die Filter ausgebaut, unter Laborbedingungen geprüft und wieder eingebaut. Die Ergebnisse dieser Prüfungen zu Druckverlust und Abscheideeffizienz wurden mit Messergebnissen eines Tests nach EN 779 verglichen.

Eine normkonforme Beladung mit ASHRAE-Staub führt bei konventionellen Filtervliesen zu einer Überbewertung hinsichtlich der Veränderung von Abscheideeffizienz und Druckverlust im Vergleich zu einer Beladung mit Außenluft im Realbetrieb. Zur Bereitstellung des ASHRAE-Teststaubes (bestehend aus  $\text{SiO}_2$ -Partikeln, Ruß und Baumwollfasern) wird ein Feststoffdispergierer verwendet. Die im Staub vorliegenden Agglomerate werden dabei nur teilweise wieder getrennt. Die relativ großen Baumwollfasern scheiden sich auf der ersten Faserschicht ab und bewirken an dieser Stelle eine Oberflächenfiltration. Der Filterkuchen bestimmt dann Abscheideeffizienz und Druckverlust.

Verwendet man zur Beladung A2 als Teststaub, so wie es im Entwurf der ISO 16890 vorgesehen ist, dann stimmen die Druckverluste gut mit den Werten aus dem Realbetrieb überein. Die Abscheideeffizienz verbessert sich während der A2-Beladung besser als bei Beladung mit Außenluft, die Überbewertung ist allerdings geringer als beim ASHRAE-Staub. Die A2-Beladung führt bei Elektretfiltern nicht zu einer Reduzierung der Effizienz durch die nachlassende Elektretwirkung, wie sie sich im Realbetrieb gezeigt hat. Hier ist es sinnvoll, die A2-Beladung am vorher elektrisch neutralisierten Filter vorzunehmen.

Neben der in der EN 779 vorgesehenen Entladung von Filtermedienproben in einem Isopropanolbad wurden im Projekt alternative Methoden zur Neutralisierung erprobt. Höhere Luftfeuchten, eine Wassertropfenbeaufschlagung oder eine Behandlung mit Tensidlösung stellten aber keine sinnvollen Alternativen zu einer Neutralisierung mit Isopropanol dar. Hinsichtlich der Auswirkung der Luftfeuchte ist allerdings anzumerken, dass die Durchströmung der Filter im Realbetrieb selbst ohne eine Beaufschlagung mit submikronen Partikeln schon nach kurzer Dauer zu einem Nachlassen der Elektretwirkung führen kann. Eine Beaufschlagung der Elektretfilter mit Ruß bildete die nachlassende Elektretwirkung bei Realeinsatz gut ab.

Bei in-situ-Messungen zur Abscheideeffizienz von Filtern im laufenden Betrieb einer Lüftungsanlage zeigte sich, dass die Ergebnisse sehr hohen Schwankungen unterlagen. Das Erzielen einer ausreichend hohen Zählstatistik, Probleme aufgrund instationärer Gegebenheiten (schwankende Partikelkonzentrationen bzw. Anzahl-

größenverteilungen) sowie das Etablieren einer repräsentativer Probenahme machen es schwierig, belastbare Ergebnisse zu erzielen. Der Vergleich der in-situ ermittelten Fraktionsabscheidegrade mit solchen, die im gleichen Zustand der Filter unter Verwendung eines DEHS-Prüfaerosols im Labor gewonnen wurden, zeigte aber, dass letztere die im Realbetrieb zu erwartenden Abscheideeffizienzen sehr gut abbilden.

Im Rahmen der begleitenden Modellierung wurden zwei unterschiedliche Themenkomplexe untersucht. Der erste bezog sich auf die Staubbelastung der Filter und die Penetrationstiefe unterschiedlicher Partikelfraktionen in das Vlies hinein. Hierbei wurde unter Nutzung des einzelfaserbasierten Filtrationsmodells eine Ortsdiskretisierung des Vlieses in Dickenrichtung und eine Diskretisierung in Beladungsstufen vorgenommen. Der zweite Modellierungsaspekt bezog sich auf die Strömungssituation innerhalb plissierter Filterstrukturen und die daraus resultierenden Filtrationscharakteristika. Die bei der Modellierung gewonnen Erkenntnisse haben zu einem besseren Verständnis der relevanten Effekte beigetragen und halfen bei der Interpretation der Messergebnisse.

## 6 Gegenüberstellung von Projektziel und erreichten Ergebnissen

Primäres Ziel des Projektes war es, Vorschläge für eine Prüfprozedur für Filter der allgemeinen Raumluftechnik zu entwickeln, die die Leistungskenngrößen der Filter im Realbetrieb besser abbildet als es bei der Prüfung gemäß der aktualisierten DIN EN 779 der Fall ist.

Ein weiteres Ziel war die Bewertung alternativer Verfahren zur Alterung.

Ziel der begleitenden modellierenden Untersuchungen war es darüber hinaus, ein verbessertes Verständnis für die Einzelmechanismen während des Beladungsprozesses zu gewinnen. Dabei wurde die Abscheidung nicht nur für die originär flachen Medien, sondern auch für plissierte Filterelemente untersucht.

Zur Erreichung des Projektziels wurden im Einzelnen bearbeitet:

- Bewertung unterschiedlicher Neutralisierungs- und Beladungsmethoden
  - Bestimmung der Anfangsfiltereffizienzen nach EN 779 sowie der Minimaleffizienzen am Medium
  - Untersuchung alternativer Entladungsmethoden am Medium (Klima-wechsel-test, Tensid-lösung)
  - Beladung von RLT-Filtern mit Außenluft sowie mit Umluft im Realbetrieb von Lüftungsanlagen und Bestimmung der Effizienz in verschiedenen Beladungsstufen am normkonformen Prüfstand
  - Beladung von RLT-Filtern mit ASHRAE-Staub und A2 am Norm-prüfstand und Bestimmung der DEHS-Effizienz
  - Beladung von RLT-Filtern und Filtermedien mit Ruß und Bestimmung der DEHS-Effizienz am Normprüfstand
  
- Modellierung
  - Begleitende Modellierung zur Änderung von Druckverlust und Filtereffizienz mit zunehmender Beladung an Tiefenfiltern
  - Theoretische Untersuchungen zum Einflusses plissierter Strukturen auf das Strömungsfeld und den Druckverlust bei RLT-Filtern

Projektziel	Ergebnis
<p>Entwicklung von Vorschlägen zu einer Prüfmethodik, welche das Filtrationsverhalten von RLT-Filtern mit fortschreitender Beladung im Realeinsatz besser abbildet, als die aktuell gültige Norm (EN 779)</p>	<p>Eine normkonforme Beladung mit ASHRAE-Staub führt bei konventionellen Filtervliesen hinsichtlich der Veränderung von Abscheideeffizienz und Druckverlust generell zu einer Überbewertung im Vergleich zum Realbetrieb.</p> <p>Eine alternative Verwendung von A2-Staub führt in der Regel zu einer guten Übereinstimmung hinsichtlich des Druckverlustes und zu einer deutlich geringeren Überbewertung der Abscheideeffizienz im Vergleich zum Realbetrieb.</p> <p>Für Elektretfilter ist es sinnvoll, die A2-Beladung am vorher elektrisch neutralisierten Filter vorzunehmen.</p> <p>Der Fraktionsabscheidegrad nach elektrischer Neutralisierung von Elektretfiltern mit Isopropanol stellt eine konservative Abschätzung der Effizienz nach unten dar, die sich während des Realeinsatzes ergeben kann.</p> <p>Eine Beladung der Filter mit Ruß ermöglicht es, den nachlassenden Elektreteffekt bei einer Beaufschlagung mit der Partikelfracht der Außenluft in kürzeren Zeiten unter Laborbedingungen zu simulieren.</p> <p>Wie die in-situ-Messungen gezeigt haben, ist die Verwendung von DEHS-Tröpfchen zur Erzielung von Prüfergebnissen der Filtereffizienz auf einem realitätsnahen Niveau sinnvoll.</p> <p>Resultat der Untersuchungen sind Vorschläge zu einer Prüfmethodik, die durch den Projektleiter der FS 2 unmittelbar in das entsprechende Normungsgremium eingebracht werden.</p>
<p>Die Modellierung soll zu einem tieferen Verständnis des Filtrationsverhaltens bei RLT-Filtern im Abgleich zwischen Prüf- und Realanwendungsbedingungen führen.</p>	<p>Das einzelfaserbasierte Filtrationsmodell kann für die Untersuchung der Partikeltransportprozesse bei der Beladung von Filtern genutzt werden.</p> <p>Bei einer angenommenen rechteckigen Faltengeometrie und einem Filtermedium mit hoher Permeabilität findet eine ungleichförmige Anströmung und somit auch Abscheidung der Partikel über der Faltenhöhe statt. Eine angenommene dreieckige Faltengeometrie führt zu einer deutlichen Vergleichmäßigung.</p> <p>Das Modell nach Lücke kann nicht nur für Faltenpakete aus dem Bereich der Schwebstofffilter - wofür es laut Literatur als valide erachtet wird - angewendet werden, sondern auch für Filter aus dem RLT-Bereich.</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, können selber aufgrund fehlender personeller Kapazitäten typischerweise keine Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchführen. Für die Entwicklung von innovativen Filterprodukten ist es aber notwendig, dass eine Filterprüfung dem Hersteller belastbare und dabei insbesondere auch realitätsnahe Ergebnisse liefert.

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

Für das Projekt wurde eine ausgabenneutrale Verlängerung um neun Monate beantragt. Das Projektende hat sich damit vom 31.12.2014 auf den 30.09.2015 verschoben.

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, ausgewertet und die unterschiedlichen Neutralisierungs- und Beladungsmethoden bewertet sowie die Berechnungen im Rahmen der Modellierung angestellt. Der Einsatz des Personals war bei der inhaltlichen Komplexität und dem zeitlichen Aufwand notwendig und angemessen.

### Forschungsstelle 1

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

Die Arbeiten an der Forschungsstelle 1 wurden von drei Mitarbeitern HPA A über 20,25 Monate, 2 Monate bzw. 2,7 Monate und zwei Mitarbeitern HPA B über 7,5 Monate bzw. 3,0 Monate durchgeführt.

	2013	2014	2015
HPA A (in PM)	7,5	7,75	5
HPA A (in PM)	2	0	0
HPA A (in PM)	0	0	2,7
HPA B (in PM)	6	1,5	0
HPA B (in PM)	1,5	0,8	0,7

- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)

entfällt

- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

Es wurden zwei Jahreslizenzen der Software ANSYS Academic Research CFD beschafft.

## Forschungsstelle 2

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

Die Arbeiten an der Forschungsstelle 2 wurden von zwei Mitarbeitern HPA A über 9,75 Monate bzw. 6,65 Monate und zwei Mitarbeitern HPA B über 14,25 Monate bzw. 5 Monate durchgeführt.

	2013	2014	2015
HPA A (in PM)	0	3,95	2,7
HPA A (in PM)	4,5	5,25	0
HPA B (in PM)	7,5	6,75	0
HPA B (in PM)	0	0	5,0

- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)

entfällt

- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

entfällt

Forschungsstelle	Ansätze	bewilligte PM	geleistete PM	Differenz PM
IUTA	HPA A	18	24,95	+ 6,95
	HPA B	18	10,50	- 7,50
UDE	HPA A	18	16,40	-1,60
	HPA B	18	19,25	+1,25



## 9 Fortgeschriebener, aktualisierter Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

### Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Vorhabens

Maßnahme	Rahmen	Datum/Zeit
Einstellung von Projektinformationen in die öffentlich zugängliche IUTA, Bereich Industrielle Gemeinschaftsforschung, Internet-Projektdatenbank	Projektdatenbank (www.iuta.de/index.php?article_id=555&clang=0)	erfolgt
Erstellung von Zwischenberichten und Weitergabe dieser Berichte an interessierte Branchenfachverbände und alle interessierten Unternehmen	Vorstellung erster Ergebnisse	ab März 2014 zugänglich
Regelmäßige Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses und kontinuierliche Berichterstattung gegenüber den hierin vertretenen Unternehmen und Verbänden (PA)	Vorstellung der erzielten Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens	am 07.11.2013 und am 06.11.2014 durchgeführt
Information und Beratung interessierter Unternehmen (außerhalb des PA) durch die Forschungsstellen	Bilaterale Gespräche mit Mitarbeitern der Forschungsstellen	kontinuierlich
Vorstellung der Ergebnisse auf verschiedenen Veranstaltungen	<p>ProcessNet, Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppen „Abfall- und Wertstoffrückgewinnung“, „Gasreinigung“ und „Hochtemperaturtechnik“, Karlsruhe</p> <p>12. Symposium „Textile Filter“, Chemnitz</p> <p>Indoor Air 2014, Hong Kong</p> <p>Conference on Aerosol Technology 2014, Karlsruhe</p> <p>IAC 2014, Busan, Südkorea</p>	<p>Vortrag am 18.02.2014</p> <p>Vortrag am 12.03.2014</p> <p>Vortrag am 11.07.2014</p> <p>Poster 16.-18.06.2014</p> <p>Poster 28.8.-2.9.2014</p>
Tätigkeitsbericht des IUTA		2014, 2015
Publikationen in Fachzeitschriften	Haep, S. et al., Filtration performance of particulate air filters for general ventilation, lab testing vs. real life In: 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate 2014 : Hong Kong, 7 - 12 July 2014 - Red Hook, NY: Curran	veröffentlicht 2015

Die Forschungsergebnisse werden im Vorfeld von Filterprüfungen, die an den Forschungsstellen 1 u. 2 routinemäßig im Auftrag von Filterherstellern durchgeführt werden, als Diskussionsgrundlage mit den Auftraggebern zur Verfügung stehen	Bilaterale Gespräche mit Mitarbeitern der beteiligten Forschungsstellen	ab 01.01.2013 kontinuierlich
--	---	------------------------------

### Transfermaßnahmen nach Laufzeit des Vorhabens

Maßnahme	Rahmen	Datum/Zeit
Information und Beratung interessierter Unternehmen (außerhalb des PA) durch die Forschungsstellen	Bilaterale Gespräche mit Mitarbeitern der Forschungsstellen	kontinuierlich
Die Vermittlung der Ergebnisse in akademischen Lehrveranstaltungen	Vorlesungen an der Uni Duisburg-Essen: „Aerosol Technology“ Prof. Dr.-Ing. Schmidt  „Air pollution control“ Dr.-Ing. Haep	fortlaufend im Sommersemester  fortlaufend im Wintersemester
Publikationen in Fachzeitschriften	Schmidt, F. et al. Die Effizienz von Filtern für raumluftechnische Anlagen bei zunehmender Beladung: Vergleich von Filtern aus dem Betrieb und Labortests	Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft  akzeptiert 2016
Normen- und Richtlinienarbeit	FAKRA, NAM und VDI	fortlaufend durch den Projektleiter der FS 2

### 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 Vorschläge für eine Prüfprozedur, die die Leistungskenngrößen der RLT-Filter im Realbetrieb besser abbildet, wird es den Medien- und Filterherstellern ermöglichen, ihre 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 2 unmittelbar in die entsprechenden Normungsgremien eingebracht. Die Umsetzung in internationale Normen ist allerdings bekanntermaßen ein langwieriges Verfahren.

## 10 Literatur

ANSI/ASHRAE 52.2-2007

Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size

Brown, R. C. (1993)

Air Filtration, An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters, Pergamon Press, Ltd., Oxford

DIN EN 779:2012

Partikel-Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik - Bestimmung der Filterleistung, Oktober 2012

DIN EN ISO 16890-1:2015-01 (Entwurf)

Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik – Teil 1: Technische Bestimmungen, Anforderungen und Effizienzklassifizierungssystem basierend auf Feinstaub (PM), Januar 2015

Hinds, W. C. (1999)

Aerosol Technology, Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles; John Wiley & Sons, Inc., New York

Kanaoka, C. (1998)

Performance of an air filter at dust-loaded condition. In: Spurny, K. R. (Hrsg.): Advances in Aerosol Filtration. Boca Raton, FL: Lewis Publisher, 1998, S. 323-335

Lücke, T.; Fissan, H. (1995)

Eine einfache Methode zur Berechnung des Druckverlusts von Filterelementen für die Schwebstofffiltration, Chemie Ingenieur-Technik, 67, Nr. 11, S. 1480-1485