

Nanogate Textile & Care Systems GmbH

**Entwicklung einer Filterausrüstung zur Senkung des
Energieaufwandes beim Betrieb von Feinstaubfiltern durch
die Erhöhung der Filtereffizienz und der Standzeit**

(Kurztitel: „Energieeffizienter Permanent-Feinstaubfilter“)

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem **AZ: 29041 – 21/0** von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

gefördert durch



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Von

Holger Zytur
Salah Bendjaballah
Mathias Becker
Jessica Altmayer

- Göttelborn, August 2013 -

Bezugsmöglichkeit des Abschlussberichtes:

Nanogate Textile & Care Systems GmbH

Holger Zytur

Zum Schacht 3

D-66287 Göttelborn

Tel: +49(0)6825 9591 418

Email: holger.zytur@nanogate.com



Az	29041	Referat	21/0	Fördersumme	237.500 €
----	--------------	---------	-------------	-------------	------------------

Antragstitel **Entwicklung einer Filterausrüstung zur Senkung des Energieaufwandes beim Betrieb von Feinstaubfiltern durch die Erhöhung der Filtereffizienz und der Standzeit**

Stichworte Textilausrüstung, Filtereffizienz, Staubabscheidung, Energieeffizienz

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
20 Monate	01.06.2011	01.03.2013	1

Zwischenberichte

Bewilligungs-empfänger	Nanogate Textile & Care Systems GmbH Zum Schacht 3 66287 Quierschied-Göttelborn	Tel	+49 (0)6825-95910
		Fax	+49 (0)6825-9591-852
		Projektleitung	
		Holger Zytur	
		Bearbeiter	
		Salah Bendjaballah, Dr. Mathias Becker, Dr. Jessica Altmayer	

Kooperationspartner Filzfabrik Fulda GmbH & Co. KG („FFF“)
Frankfurter Straße 62, D-36035 Fulda

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Bisher ist die Filtrations- und Energieeffizienz beim Betrieb von Feinstaubfiltern im Wesentlichen beschränkt durch den erhöhten Druckabfall, unter anderem verursacht durch funktionelle Ausrüstungen. Auf Basis einer polymeren Bindermatrix sollen Ausrüstungen durch Einbettung von hydrophobierenden, oleophobierenden und Elektret- Wirkstoffen sowie deren Kombinationen zu höchst effektiven Filterausrüstungen weiterentwickelt werden. Vorversuche zeigen, dass sich durch solche Ausrüstungen erhebliche Filtereffizienzsteigerungen realisieren lassen, ohne den Druckabfall beim Betrieb der Filter wesentlich zu erhöhen. Das kann zu relevanten Energieeinsparungen beim Filterbetrieb führen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Zur Entwicklung der oben genannten Filterausrüstungen erfolgte eine Evaluierung geeigneter Filtersubstrate (Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern) und geeigneter Rohstoffe zur Funktionalisierung. Sowohl die Funktionalität der Ausrüstung als auch die Wechselwirkungen zwischen Ausrüstung und Substrat wurden getestet (Effektscreening), wodurch Rückschlüsse auf eine optimale Ausrüstungs-Substrat-Kombination möglich wurden. In einem weiteren Schritt wurden Ausrüstungen gezielt so modifiziert, dass sie, aufgebracht auf möglichst vielen verschiedenen Substraten, optimale Wirkung zeigten. Im Anschluss wurde, in Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern, die Filtereffizienz im Labor evaluiert. Die Filter/ Ausrüstungskombinationen, die dabei die besten Ergebnisse zeigten, wurden dann in einem Praxisversuch getestet.

Ergebnisse und Diskussion

In Zusammenarbeit mit der Filzfabrik Fulda GmbH & Co. KG (Kooperationspartner) erfolgte eine Recherche über mögliche Filtersubstrate bezüglich ihrer Materialzusammensetzung und Strukturbeschaffenheit. Hierbei konnte ermittelt werden, welche Filtersubstratmaterialien (Oberflächenbeschaffenheit und Porosität) theoretisch für das Vorhaben geeignet sind.

Hinsichtlich der Rohstoffe für die funktionellen Ausrüstungen ergab eine intensive Recherche, dass als funktionelle Bestandteile dielektrische oder magnetische (in Einzelfällen auch nicht magnetische) Partikel in Kombination mit einer hydrophoben Bindermatrix grundsätzlich in Frage kommen.

Die Kombination dieser Partikel und einer ausgewählten Bindermatrix erwies sich auf voluminösen Polyestersubstraten sowie PE-Vliesen hinsichtlich der Ladungserzeugung und Stabilität als besonders geeignet. Bezüglich der Ladungspermanenz wurden deutlich bessere Ergebnisse erreicht, wenn Partikel nicht allein sondern in Kombination mit einer hydrophoben Bindermatrix als Ausrüstung verwendet wurden.

Basisformulierungen mit dielektrischen und (nicht)magnetischen Partikeln in Kombination mit einer Polymerbindermatrix wurden als Filterausrüstungen bei der Filzfabrik Fulda auf verschiedenen Substraten auf ihre Wirksamkeit (Staubabscheidung) hin getestet. Dabei erwiesen sich vor allem die Filterausrüstungen mit SiO₂- und Eisenoxid-basierten Partikeln (permaStatic) in Kombination mit hydrophoben Fluorpolymerbindermatrix (permaSeal) als geeignet, womit sich die Ergebnisse aus dem vorangegangenen Effektscreening bestätigten. Auf einigen Substraten konnten auch ohne den Einsatz von dielektrischen und (nicht)magnetischen Partikeln mit einer speziellen neuen hydrophoben Bindermatrix (permaSeal) gute Ergebnisse erzielt werden.

Ebenfalls in Kooperation mit der Filzfabrik Fulda GmbH & Co. KG wurde die Filtereffizienz mehrerer Substrat/Ausrüstungskombinationen geprüft und bewertet. Geprüft wurden u. a. die Staubabscheidung, die Luftdurchlässigkeit und das Ladungsverhalten.

Die Kombinationen, die in diesen Labortests die besten Ergebnisse hinsichtlich Staubabscheidung und Luftdurchlässigkeit erzielten, wurden dann im Rahmen eines Praxisversuchs in einem Tunnelfiltersystem eingebaut und auf Ihre Wirksamkeit hin untersucht.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Ergebnisse dieses Projektes werden durch Presse, Fachartikel, Messen und weitere Verkaufsfördermaßnahmen öffentlich gemacht. Eine Vorstellung bei der Woche der Umwelt der DBU am Sitz des Bundespräsidenten in Berlin erfolgte bereits im Juni 2012. Zielbranchen sind z. B. Filter- und Vlieshersteller.

Fazit

Die ausgerüsteten Filtersubstrate zeigten in Laborversuchen eine deutlich höhere Staubabscheideleistung im Vergleich zu den entsprechenden unbehandelten Substraten. Der Druckabfall erhöhte sich durch die Ausrüstung kaum, wodurch von einer höheren Filterleistung bei gleichbleibender Luftdurchlässigkeit gesprochen werden kann. Somit könnten solche Filtermedien einen erheblichen Beitrag zum energieeffizienteren Betrieb von Feinstaubfiltersystemen leisten. Eine abschließende Bewertung der Ergebnisse konnte auf Basis des einfachen Praxistests noch nicht erfolgen. Hierzu sind weitere standardisierte und ausführlichere Tests erforderlich.

Inhaltsverzeichnis

1. AUSGANGSSITUATION UND ZIELSETZUNG.....	1
2. VORHABENDURCHFÜHRUNGEN UND ERGEBNISSE	5
2.1 HERSTELLUNG DER AUSRÜSTUNGEN UND APPLIKATION	5
2.2 HERSTELLUNG DER FORMULIERUNGEN UND APPLIKATION MITTELS FOULARDIEREN	6
2.3 AUSRÜSTUNGSPROZESS.....	7
2.4 EVALUIERUNG DER FORMULIERUNGEN UND LADUNGSSTABILITÄT.....	7
2.5 EVALUIERUNG DER STAUBABSCHEIDUNG.....	10
2.5.1 <i>Staubabscheidung Filtermedium FFF V 4321-1</i>	11
Aufbau des Filtermediums.....	11
Ausgewählte Formulierungen zur Ausrüstung von FFF V 4321-1	12
Ergebnisse der Retention und Ladung zum Versuch von FFF V 4321-1.....	12
Luftdurchlässigkeiten von ausgerüsteten Substraten FFF V 4321-1 und entsprechender Rohware	13
Vergleich Retention, Luftdurchlässigkeit und Druckabfall von ausgerüsteten Substraten FFF V 4321-1 und entsprechender Rohware.....	14
Vergleich Filtereffizienz (Retention) von ausgerüsteten Substraten FFF V 4321-1 und entsprechender Rohware ..	15
2.5.2 <i>Staubabscheidung Filtermedium FFF 6406</i>	15
Aufbau des Filtermediums.....	15
Ausgewählte Formulierungen zur Ausrüstung von FFF 6406	16
Ergebnisse der Retention und Ladung zum Versuch von FFF 6406.....	17
Luftdurchlässigkeiten von ausgerüsteten Substraten FFF 6406 und entsprechender Rohware	18
Vergleich Retention, Luftdurchlässigkeit und Druckabfall von ausgerüsteten Substraten FFF 6406 und entsprechender Rohware.....	19
Vergleich Filtereffizienz (Retention) von ausgerüsteten Substraten FFF 6406 und entsprechender Rohware.....	20
2.5.3 <i>Staubabscheidung Filtermedium FFF 6470</i>	20
Aufbau des Filtermediums.....	20
Ausgewählte Formulierungen zur Ausrüstung von FFF 6470	21
Ergebnisse der Retention und Ladung zum Versuch von FFF 6470.....	22
Luftdurchlässigkeiten von ausgerüsteten Substraten FFF 6470 und entsprechender Rohware	23
Vergleich Retention, Luftdurchlässigkeit und Druckabfall von ausgerüsteten Substraten FFF 6470 und entsprechender Rohware.....	24
Vergleich Filtereffizienz (Retention) von ausgerüsteten Substraten FFF 6470 und entsprechender Rohware.....	24
2.5.4 <i>Staubabscheidung Filtermedium FFF 6342</i>	25
Aufbau des Filtermediums.....	25
Ausgewählte Formulierungen zur Ausrüstung	25
Ergebnisse der Retention und Ladung zum Versuch von FFF 6342	26
Luftdurchlässigkeiten von ausgerüsteten Substraten FFF 6342 und entsprechender Rohware	27
Vergleich Retention, Luftdurchlässigkeit und Druckabfall von ausgerüsteten Substraten FFF 6342 und entsprechender Rohware (glatte Seite)	27
Vergleich Filtereffizienz (Retention) von ausgerüsteten Substraten FFF 6342 und entsprechender Rohware (glatte Seite).....	28

Vergleich Retention, Luftdurchlässigkeit und Druckabfall von ausgerüsteten Substraten FFF 6342 und entsprechender Rohware (Gravurseite)	29
Vergleich Filtereffizienz (Retention) von ausgerüsteten Substraten FFF 6342 und entsprechender Rohware (Gravurseite)	29
2.6 PRAXISVERSUCH „TUNNELFILTER“	30
2.6.1 Messaufbau und Messtechnik	30
2.6.2 Messergebnisse	32
2.7 ÖKOLOGISCHE, TECHNOLOGISCHE UND ÖKONOMISCHE BEWERTUNG	32
2.7.1 Ökologische Bewertung	32
2.7.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	35
2.7.3 Technologische Verfahren und Weiterentwicklung	36
3. FAZIT	38
4. LITERATURVERZEICHNIS	39
5. ANHANG	A1
5.1 RETENTIONSKURVEN VON FFF V 4321-1	A1
5.2 RETENTIONSKURVEN VON FFF 6406	A7
5.3 RETENTIONSKURVEN VON FFF 6470	A14
5.4 RETENTIONSKURVEN VON FFF 6342	A21
5.5 TECHNISCHE DATEN FILTERSUBSTRAT FFF V 4321	A25
5.6 TECHNISCHE DATEN FILTERSUBSTRAT FFF 6406	A26
5.7 TECHNISCHE DATEN FILTERSUBSTRAT FFF 6470	A27
5.8 TECHNISCHE DATEN FILTERSUBSTRAT FFF 6342	A28

Verzeichnis von Abbildungen und Tabellen

Abbildung 1 REM-Aufnahmen eines mit permaSeal ausgerüsteten PES- (a) und eines ausgerüsteten Mikrofaser-Vlieses (b).....	3
Abbildung 2 Foulard Labormaßstab (a) und schematische Zeichnung (b)	6
Abbildung 3 Ausrüstungsprozess	7
Abbildung 4 Palas Prüfstand MFP 2000.....	10
Abbildung 5 Vergleich Retention, Luftdurchlässigkeit und Druckabfall von FFF V 4321-1 Rohware und ausgerüstet.....	14
Abbildung 6 Vergleich Filtereffizienz (Retention) von FFF V 4321-1 Rohware und ausgerüstet	15
Abbildung 7 Vergleich Retention, Luftdurchlässigkeit und Druckabfall von FFF 6406 Rohware und ausgerüstet.....	19
Abbildung 8 Vergleich Filtereffizienz (Retention) von FFF 6406 Rohware und ausgerüstet.....	20
Abbildung 9 Vergleich Retention, Luftdurchlässigkeit und Druckabfall von FFF 6470 Rohware und ausgerüstet.....	24
Abbildung 10 Vergleich Filtereffizienz (Retention) von ausgerüsteten Substraten FFF 6470 Rohware und ausgerüstet.....	24
Abbildung 11 Vergleich Retention, Luftdurchlässigkeit und Druckabfall von FFF 6342 Rohware und ausgerüstet (glatte Seite)	27
Abbildung 12 Vergleich Retention von FFF 6342 Rohware und ausgerüstet (glatte Seite)	28
Abbildung 13 Vergleich Retention, Luftdurchlässigkeit und Druckabfall von FFF 6342 Rohware und ausgerüstet (Gravurseite)	29
Abbildung 14 Vergleich Retention von FFF 6342 Rohware und ausgerüstet (Gravurseite)	29
Abbildung 15 Tunnelabschnitt mit Lüftungsfiltersystem	30
Abbildung 16 Versuchsanlage im Windhaus des Plabutschunnels	31
Abbildung 17 Prinzipsskizze der Versuchsanlage (blauer Pfeil = Luftweg)	31
Abbildung 18 Retentionskurve von FFF V 4321-1 Rohware	A1
Abbildung 19 Retentionskurve von FFF V 4321-1 Rohware	A1
Abbildung 20 Retentionskurve von FFF V 4321-1 Rohware	A1
Abbildung 21 Retentionskurve von FFF V 4321-1 Rohware	A2
Abbildung 22 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 5	A2
Abbildung 23 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 5	A2
Abbildung 24 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 5	A3
Abbildung 25 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 5	A3
Abbildung 26 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 11	A3
Abbildung 27 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 11	A4
Abbildung 28 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 11	A4
Abbildung 29 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 11	A4
Abbildung 30 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 16	A5
Abbildung 31 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 16	A5
Abbildung 32 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 16	A5
Abbildung 33 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 16	A6
Abbildung 34 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 17	A6
Abbildung 35 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 17	A6
Abbildung 36 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 17	A7
Abbildung 37 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 17	A7
Abbildung 38 Retentionskurve von FFF 6406 Rohware	A7
Abbildung 39 Retentionskurve von FFF 6406 Rohware	A8
Abbildung 40 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 3	A8
Abbildung 41 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 3	A8
Abbildung 42 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 5	A9

Abbildung 43 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 5	A9
Abbildung 44 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 6	A9
Abbildung 45 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 6	A10
Abbildung 46 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 11	A10
Abbildung 47 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 11	A10
Abbildung 48 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 12	A11
Abbildung 49 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 12	A11
Abbildung 50 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 16	A11
Abbildung 51 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 16	A12
Abbildung 52 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 17	A12
Abbildung 53 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 17	A12
Abbildung 54 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 18	A13
Abbildung 55 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 18	A13
Abbildung 56 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 19	A13
Abbildung 57 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 19	A14
Abbildung 58 Retentionskurve von FFF 6470 Rohware	A14
Abbildung 59 Retentionskurve von FFF 6470 Rohware	A14
Abbildung 60 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 3	A15
Abbildung 61 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 3	A15
Abbildung 62 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 5	A15
Abbildung 63 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 5	A16
Abbildung 64 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 6	A16
Abbildung 65 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 6	A16
Abbildung 66 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 11	A17
Abbildung 67 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 11	A17
Abbildung 68 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 12	A17
Abbildung 69 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 12	A18
Abbildung 70 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 16	A18
Abbildung 71 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 16	A18
Abbildung 72 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 17	A19
Abbildung 73 Retentionskurven von FFF 6470 mit Ausrüstung 17	A19
Abbildung 74 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 18	A19
Abbildung 75 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 18	A20
Abbildung 76 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 19	A20
Abbildung 77 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 19	A20
Abbildung 78 Retentionskurve von FFF 6342 Rohware	A21
Abbildung 79 Retentionskurve von FFF 6342 Rohware	A21
Abbildung 80 Retentionskurve von FFF 6342 Rohware	A21
Abbildung 81 Retentionskurve von FFF 6342 Rohware	A22
Abbildung 82 Retentionskurve von FFF 6342 mit Ausrüstung 17	A22
Abbildung 83 Retentionskurve von FFF 6342 mit Ausrüstung 17	A22
Abbildung 84 Retentionskurve von FFF 6342 mit Ausrüstung 18	A23
Abbildung 85 Retentionskurve von FFF 6342 mit Ausrüstung 18	A23
Abbildung 86 Retentionskurve von FFF 6342 mit Ausrüstung 19	A23

Abbildung 87 Retentionskurve von FFF 6342 mit Ausrüstung 19.....	A24
Tabelle 1 Energieeffizienzberechnung	4
Tabelle 2 Formulierungen.....	8
Tabelle 3 Prozessbedingungen Palasmessungen.....	11
Tabelle 4 Ausrüstungen für FFF V 4321-1.....	12
Tabelle 5 Retention von ausgerüsteten Substraten FFF V 4321-1 und entsprechender Rohware	12
Tabelle 6 Luftdurchlässigkeit von ausgerüsteten Substraten FFF V 4321-1 und entsprechender Rohware	13
Tabelle 7 Ausrüstungen für FFF 6406	16
Tabelle 8 Retention von ausgerüsteten Substraten FFF 6406 und entsprechender Rohware.....	17
Tabelle 9 Luftdurchlässigkeit von ausgerüsteten Substraten FFF 6406 und entsprechender Rohware.....	18
Tabelle 10 Ausrüstungen für FFF 6470.....	21
Tabelle 11 Retention von ausgerüsteten Substraten FFF 6470 und entsprechender Rohware	22
Tabelle 12 Luftdurchlässigkeit von ausgerüsteten Substraten FFF 6470 und entsprechender Rohware	23
Tabelle 13 Ausrüstungen für FFF 6342.....	25
Tabelle 14 Retention von ausgerüsteten Substraten FFF 6342 und entsprechender Rohware	26
Tabelle 15 Luftdurchlässigkeit von ausgerüsteten Substraten FFF 6342 und entsprechender Rohware	27
Tabelle 16: Abscheideleistungen und Parameterdaten aller Filtermattenversuche	32
Tabelle 17: Effizienteste Ausrüstungen auf verschiedenen Substraten.....	35
Tabelle 18: Energieersparnis durch Ausrüstung	35

Verzeichnis von Abkürzungen, Begriffen und Definitionen

a	Jahr
Al	Aluminium
Al₂O₃	Aluminiumoxid
CCV	collective centralised ventilation - gemeinsame zentrale Belüftung
CCVHR	collective centralised ventilation with heat recovery - gemeinsame zentrale Belüftung mit Wärmerückgewinnung
cm	Zentimeter
cm²	Quadratcentimeter
CO₂	Kohlendioxid
ct	Cent
°C	Grad Celsius
dtex	Decitex (Feinheitsbezeichnung für textile Fasern)
DV	decentralised ventilation - dezentrale Belüftung
DV&HR	decentralised ventilation with heat recovery - dezentrale Belüftung mit Wärmerückgewinnung
E	Energie
E_{EU}	Energieverbrauch EU
E_{DE}	Energieverbrauch Deutschland
E_{EU,PS}	Energieersparnis EU durch den Einsatz der neuen Filterausrüstungen
E_{DE,PS}	Energieersparnis Deutschland durch den Einsatz der neuen Filterausrüstungen
Eff_{PS}	Energieeffizienz der zu entwickelnden permaStatic Technologie
GWh	Gigawattstunde
h	Stunde
Hoods	Abzugshauben in Küchen und Nassräumen
ICV	individual centralised ventilation - individuelle zentrale Belüftung
ICVHR	individual centralised ventilation with heat recovery - individuelle zentrale Belüftung mit Wärmerückgewinnung
kg	Kilogramm
km	Kilometer
kV	Kilovolt
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
m	Meter
m³	Kubikmeter
max.	maximal
min	Minute
min.	minimal
Mio.	Million
mm	Millimeter
Mrd.	Milliarde

µm	Mikrometer
MP	Partikelmasse
MPPS	most penetrating particle size
N	Newton
Nm	Newtonmeter
nm	Nanometer
Pa	Pascal
PE	Polyethylen
PES	Polyester
PTFE	Polytetrafluorethylen
permaSeal	hydrophobe Bindermatrix
permaStatic	Elektretausrüstung
PM₁	Staubpartikel mit einem aerodynamischen Durchmesser < 1 µm
PM_{2,5}	Staubpartikel mit einem aerodynamischen Durchmesser < 2,5 µm
PM₁₀	Staubpartikel mit einem aerodynamischen Durchmesser < 10 µm
Q_{EF}	Anteil (Quotient) des Energieverbrauchs, der durch die vom Filter verursachte Druckdifferenz hervorgerufen wird
Q_{RLT}	Anteil der RLT-Anlagen mit ausrüstbarem Filter
REM	Rasterelektronenmikroskop
RLT	Raumluftechnik
SAE	Society of Automotive Engineers
s	Sekunde
Si	Silizium
SiO₂	Siliziumdioxid
t	Zeit
to.	Tonne (metrisch)
TSP	total suspended matter (Gesamtstaub)
TWh	Terawattstunde
V	Volumenstrom
V	Volt
VE	voll entionisiert
Wh	Wattstunde
Ws	Wattsekunde
Δp	Druckabfall
η	Wirkungsgrad

Zusammenfassung

Die Nanogate Textile & Care Systems GmbH beschäftigt sich im Bereich Funktionelle Textilien u. a. mit der Ausrüstung von Filtervliesen. Im Rahmen dieses Projekts wurde auf Basis einer hydrophoben polymeren Bindermatrix der im Haus vorhandenen nanotechnologischen Filterausrüstung permaSeal eine höchst effektive Elektretausrüstung für Feinstaubfilter durch die Einbettung von (nicht)magnetischen bzw. dielektrischen Partikeln (permaStatic) grundlegend weiterentwickelt. Ein Basispatent für diese Technologie wurde bereits erteilt [BK10]. So konnte bei gleicher Faserdichte eine deutlich höhere Staubabscheideleistung des Filters erreicht werden, ohne den Druckabfall beim Betrieb des Filters zu erhöhen. Entsprechend muss für eine gleiche bis verbesserte Filterleistung ein erheblich geringerer Luftdruck erzeugt werden, als beim derzeitigen Stand der Technik. Hierdurch wird im erheblichen Maße Energie zur Erzeugung des Luftdrucks beim Betrieb des Filters eingespart.

Zur Entwicklung einer solchen Elektretausrüstung wurde zunächst das flüssige Ausrüstungsmaterial bestehend aus den funktionellen (nicht)magnetischen bzw. dielektrischen Partikeln (permaStatic) und der hydrophoben Bindermatrix (permaSeal) hergestellt und auf Kompatibilität mit verschiedenen Filtermedien hin getestet. In diesem Zusammenhang konnte auch das nasschemische Ausrüstungsverfahren an das jeweilige Filtermedium angepasst werden.

Im weiteren Verlauf des Projekts wurden dann die ausgerüsteten Filtermedien im Labormaßstab bzgl. Staubabscheidung und Luftdurchlässigkeit unter standardisierten Bedingungen getestet, um Aussagen über eine Effizienzsteigerung des Filters durch die Ausrüstung treffen zu können. Diese Tests zeigten, dass durch verschiedene Ausrüstungen eine erhebliche Steigerung des Abscheidegrades der Filter bei einer nur äußerst geringen Veränderung der Luftdurchlässigkeit realisiert werden konnten.

Auf Basis der Ergebnisse aus den Laborversuchen wurden Modellrechnungen zum Energieverbrauch des Ventilators beim Erzeugen des Luftstroms beim Betrieb von Feinstaubfiltern durchgeführt. Diese ergaben, dass im Vergleich zu einem Filter nach Stand der Technik Energieeinsparungen im mittleren zweistelligen Prozentbereich erzielt werden können.

Die Kombinationen Ausrüstung/Filtermedium, die bei diesen Messungen die besten Ergebnisse bzgl. Abscheidegrad, Druckdifferenz und somit potentiell höherer Energieeffizienz zeigten, wurden im Rahmen eines einfachen Praxisversuchs in einem Tunnelsystem eingebaut und bei laufendem Betrieb auf ihre Filter- bzw. Energieeffizienz hin untersucht. Die in den Labortests erzielten Ergebnisse konnten hierdurch nicht vollständig bestätigt werden. Deshalb sind weitere und standardisierte Praxistests erforderlich, um die Eigenschaften der entwickelten Filter besser an die Praxisbedingungen anpassen zu können.

1. Ausgangssituation und Zielsetzung

Bei der Gas- und Luftfiltration kommen Filter zum Einsatz, die überwiegend aus synthetischen Vliesstoffen bestehen. Dabei werden sehr feine Staubpartikel vorwiegend im Inneren des Filtermediums abgeschieden. Grundlegende Parameter zur Beurteilung solcher Filter sind neben Fraktionsabscheidegrad, Druckverlust und Trennkurve auch die Staubaufnahmekapazität des Filters. Sie bestimmt den mit der Zeit anwachsenden Druckverlust des Filters und somit auch die Energie, die zum Betrieb des Filters benötigt wird.

Die Abscheidung von Stäuben und Feinstäuben in den sogenannten Partikelfiltern erfolgt entweder mechanisch oder elektrostatisch. Die Partikelfiltration erfolgt nach verschiedenen Mechanismen, die auf verschiedenen Effekten beruhen und stark von der jeweiligen Partikelgröße abhängen: Dabei spielt neben Sedimentation, Sperreffekt, Trägheitseffekt, Diffusionseffekt auch der elektrostatische Effekt eine große Rolle. Da Partikel meist eine elektrische Ladung tragen, wird ihre Bewegung auch durch elektrische Felder beeinflusst. So ist beispielsweise eine Verstärkung der Abscheideleistung aufgrund entgegen gesetzter Ladungen zwischen den Partikeln und den Kollektoroberflächen möglich. Hierbei können sowohl die Fasern als auch die Partikel geladen sein. Je kleiner die Partikel sind, desto wirksamer ist der Effekt der elektrischen Ladungen. Er kann vor allem bei Partikeln im MPPS-Bereich (sogenanntes Abscheideminimum) eine bedeutende Rolle spielen.

Die Leistung von Staub- und Feinstaubfiltern wird üblicherweise durch die Wahl der Faserdichte gesteuert und bestimmt. Grundsätzlich werden mit dichteren Filtermedien auch bessere Filterleistungen erzielt. Ein Nachteil hierbei ist jedoch, dass die Luftdurchlässigkeit der Filter mit zunehmender Dichte sinkt. Dadurch kommt es zu einem Anstieg des Druckabfalls beim Filterbetrieb, was insbesondere beim Betrieb von Feinstaubfiltern zu einem sehr hohen Energieaufwand führt.

Meist tragen Staubpartikel entweder positive oder negative elektrische Ladungen, wodurch eine weitere Möglichkeit zur Filtereffizienzsteigerung entsteht. Elektrostatisch geladene Filtermedien tragen dazu bei, dass geladene Partikel im Filter besser abgeschieden werden können. Solche Elektretfilter werden als Tiefenfilter für die Feinstaubfiltration vielfach eingesetzt. Vor allem im MPPS-Bereich (most penetrating particle size) zwischen 0,05 und 0,5 μm werden Aerosolpartikel durch mechanische Effekte nur unzureichend abgeschieden [Ern06]. Elektretfilter aus dielektrischen Substraten, die aufgrund von induzierter Ladungstrennung elektrische Ladungen tragen, bieten ein zusätzliches Abscheideprinzip durch elektrostatische Wechselwirkungen zwischen Partikel und Faseroberfläche [LF89]. Forschungen und Entwicklungen zur Verbesserung der Abscheideleistung für Partikel im MPPS-Bereich durch elektrostatische Eigenschaften der Filtermedien haben eine über hundertjährige Tradition [Bau87]. Elektretfilter werden seit langem für die Herstellung von Feinstaubfiltern, wie z. B. Atemfiltermasken und Luftfiltern, z. B. in der Automobilindustrie und in der Raumlufttechnik eingesetzt (vgl. Produktinformation 3M für Typ G Luftfiltermedien, Produktinformation Freudenberg für viledon[®] Separet Filter).

Elektrete für Filteranwendungen sind derzeit ferroelektrische, dielektrische faserbildende Polymere wie z. B. Polypropylen und Polycarbonat [Ber90]. Mit unterschiedlichen Verfahren werden Elektretfilter heute entweder direkt aus einem Elektretmaterial hergestellt (Meltblownfasern, elektrostatisches Spinnverfahren) oder ein Elektretpolymer wird während der Filterproduktion auf ein Trägermaterial aufgeschmolzen. Anschließend erfolgt eine Coronaaufladung oder eine Aufladung im elektrischen Feld. Die Aufladung führt zu einer Spannung von höchstens 500 V im Elektret, wodurch selbst bei Materialien mit sehr langsamer Entladung die Wirkung relativ schnell nachlässt. Ein weiteres Verfahren basiert auf dem sog. Hansen-Filter, bei dem es sich um ein elektrostatisch aufladbares Vlies aus Wolffasern handelt. Bei diesem werden dielektrische Kolophoniumharz-Partikeln (z. B. PE-Wachse) nachträglich an der Oberfläche aufgebracht und dort thermisch fixiert [Ern05]. Es wurden vor allem dann positive Effekte hinsichtlich der Langzeitladungsstabilität nachgewiesen, wenn die Aufladung bei höherer Temperatur oberhalb des Schmelzpunkts der Elektretbeschichtung erfolgt, das Filtervlies während des Aufladens abgekühlt wird und somit die Ladungen in der erkaltenden Beschichtung eingefroren werden. Ultradünne elektrostatisch geladene Elektretfasern können auch direkt, z. B. durch elektrostatisches Spinnen, hergestellt werden (z. B. Filter der Fa. Donaldson oder Hollingsworth & Vose, East Walpole, USA) [GG03]. Diese Fasern werden auch in der Oberflächenfiltration für mittels Druckumkehrstoß abreinigbare Filter eingesetzt (z. B. nanoweb[®] Filter der Fa. Hollingsworth & Vose, East Walpole, USA).

Die Eignung von Materialien zur Herstellung von Elektretfiltern und ihr Einsatzpotenzial als Feinstaubtiefenfilter sind jedoch bisher aus den folgenden Gründen äußerst begrenzt:

- oft zu geringe Ladungsstabilität bei der Lagerung und beim Einsatz,
- hohe, u. a. energierelevante Anforderungen an Luftdurchlässigkeit und Druckabfall beim Einsatz (siehe DIN EN 779 und EN 1822-1:1998).

Die verbesserte Abscheidecharakteristik im MPPS-Bereich bei Feinstaubtiefenfiltern ist während der Standzeit vor allem in der Anfangsphase wichtig, wenn der Filter noch offen ist. Später entsteht durch zunehmende Staubbiladung des Filters und resultierende Porenverengung eine verbesserte Staubabscheidung, während die Elektretwirkung durch die zunehmende Staubbiladung weiter abgeschirmt wird. Eine Verbesserung der Ladungsstabilität wird nach dem Stand der Technik durch die Verwendung von mehreren verschiedenen Elektretmaterialien bei der Herstellung eines Filtervlieses erreicht. Durch mechanische Reibung der verschiedenen Materialien beim Herstellungsprozess des Filtervlieses sowie durch Reibungseffekte aufgrund durchströmender Medien (Luft, Gase) beim Betrieb werden elektrostatische Ladungen durch den sog. triboelektrischen Effekt ohne Einfluss eines äußeren elektrischen Felds induziert [Dro00] [Hoe95].

Insgesamt sind und bleiben Elektretfilter eine anspruchsvolle und innovative Technologie zur Entwicklung effizienter Feinstaubfilter. Mit Blick auf die wachsende Ressourcenknappheit gilt es, diese Technologie weiterzuentwickeln und damit hochwirksame und energieeffiziente Filter zu entwickeln. Zudem ist die Reduzierung der Feinstaubbelastung der Umwelt von zunehmender Bedeutung.

In diesem Projekt sollten Elektretausrüstungen von Faservliesen für Filtermedien für die Feinstaubfiltration in Form nasschemischer Ausrüstungen entwickelt werden. Die Elektretausrüstungen sollten hierzu durch Zwangsapplikation (z. B. Foulardieren) oder Aufsprühen wässriger Dispersionen aus z. B. (nicht)magnetischen bzw. dielektrischen Partikeln (permaStatic) und einer polymeren Bindermatrix (permaSeal) in das Faservlies eingebracht werden. Die ausgerüsteten Fasern werden dabei vollständig von der Elektretausrüstung ummantelt, die (nicht)magnetischen bzw. dielektrischen Partikel sind dabei vollständig von der Bindermatrix eingeschlossen. Dieses Verfahren ermöglicht auch eine nachträgliche Ausrüstung eines Filtervlieses mit den zu entwickelnden Ausrüstungen. Die funktionellen Partikel (permaStatic) haben eine Größe im niedrigen zweistelligen Nanometerbereich. Damit lassen sie sich vollständig in die hydrophobe Bindermatrix (permaSeal) der Ausrüstung einbetten.

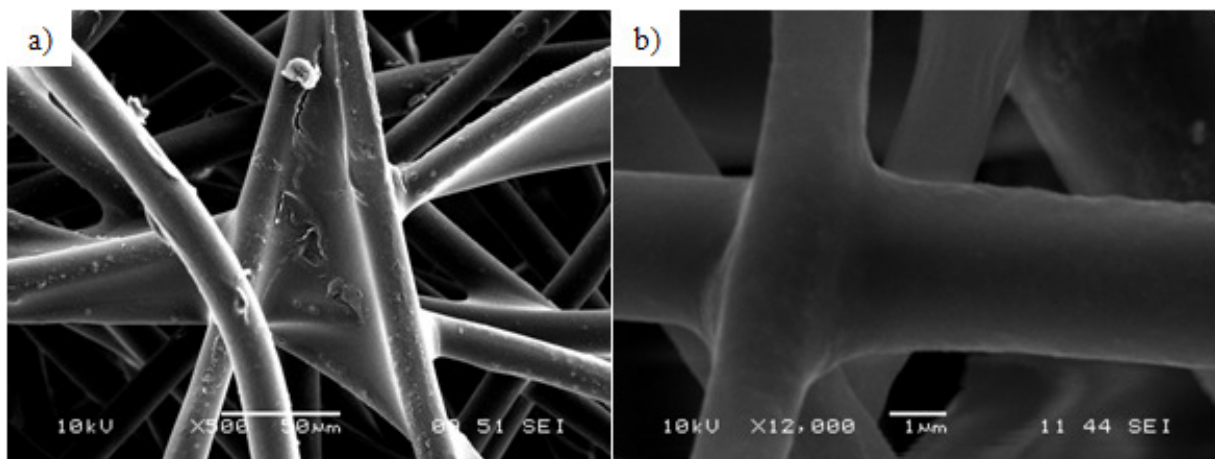


Abbildung 1 REM-Aufnahmen eines mit permaSeal ausgerüsteten PES- (a) und eines ausgerüsteten Mikrofaser-Vlieses (b).

Die konturgetreue Ummantelung jeder einzelnen Substratfaser (Abb. 1b) mit nur vereinzelter Segelbildung (Abb. 1a) mit dem Ausrüstungsmaterial, was vor allem an Knotenpunkten und Kontaktstellen mehrerer Fasern von großer Bedeutung ist, sorgt für eine fast unveränderte Luftdurchlässigkeit in Kombination mit der erwünschten stark verbesserten Filterperformance. Dies wiederum hat zur Folge, dass für den Filterbetrieb bei gleichbleibender Effizienz Energie eingespart werden kann.

Der Energieverbrauch beim Betreiben von Luftfilteranlagen wird dadurch verursacht, dass die Luft durch den Filter „gedrückt“ werden muss. Aktuell gilt: je besser die Filterleistung sein soll, desto höher ist die Faserdichte des Filters, desto weniger luftdurchlässig ist der Filter, desto mehr Druck muss erzeugt werden, und desto mehr Energie wird benötigt, um die Luft durch den Filter zu bewegen. Durch die in diesem Projekt geplante Entwicklung sollte erstmals ein Filter bereitgestellt werden, bei dem im Vergleich zum Stand der Technik das Verhältnis von Filterleistung zu Luftdurchlässigkeit deutlich verbessert ist und somit ein großes Energieeinsparpotenzial durch erhöhte Filterleistung bei gleicher Luftdurchlässigkeit bzw. gleiche Filterleistung bei erhöhter Luftdurchlässigkeit realisiert werden kann. Grundlegendes Ziel dieses Projektes war es daher,

Substrat/Ausrüstungskombinationen zu entwickeln, welche bei gleicher oder besserer Filterleistung deutlich weniger Energie im Filterbetrieb benötigen.

In der folgenden Energiebetrachtung wird ein Filter nach dem Stand der Technik mit einem Filter mit der zu entwickelnden Ausrüstung im Rahmen einer Modellrechnung verglichen. Als Basis für die Berechnung dienen Messergebnisse, die in Vorversuchen ermittelt wurden. In diesem Rechenbeispiel wird die Energie bestimmt, die benötigt wird, um den Druckabfall auszugleichen, der durch einen Filter mit einem Staubabscheidegrad von 97 % erzeugt wird. Der Druckabfall ist das Maß, das für die Luftdurchlässigkeit eines Filters herangezogen wird. Der Wirkungsgrad des Ventilators zum Erzeugen des Luftstroms spielt zwar für den tatsächlichen Energieverbrauch beim Filterbetrieb eine wesentliche Rolle. Bei einem Effizienzvergleich gleicher Anlagen kann der Grad jedoch als 1 (100 %) gesetzt werden, da durch diesen die relative Energieeinsparung nicht beeinflusst wird.

Tabelle 1 Energieeffizienzberechnung

Filter 1	Unbehandelter Filter Stand der Technik	Filter 2	Ausgerüsteter Filter Ergebnisse der Vorversuche
Staubabscheidegrad: 97 %		Staubabscheidegrad: 97 %	
Volumenstrom (V) = 7,2 m ³ /h		Volumenstrom (V) = 7,2 m ³ /h	
Zeit (t) = 60 s		Zeit (t) = 60 s	
Druckabfall (Δp) = 122 Pa		Druckabfall (Δp) = 48 Pa	
Wirkungsgrad Ventilator (η) = 1		Wirkungsgrad Ventilator (η) = 1	
Berechnung der Energie (E):		Berechnung der Energie (E):	
$E = \frac{V \cdot \Delta p \cdot t}{\eta \cdot 1000}$		$E = \frac{V \cdot \Delta p \cdot t}{\eta \cdot 1000}$	
$E = \frac{7,2 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 122 \text{ N/m}^2 \cdot 60 \text{ s}}{\eta \cdot 1000}$		$E = \frac{7,2 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 48 \text{ N/m}^2 \cdot 60 \text{ s}}{\eta \cdot 1000}$	
$E = \frac{7,2 \cdot 122 \cdot 60}{\eta \cdot 1000} \quad \left[\frac{\text{m}^3 \cdot \text{N} \cdot \text{s} \cdot 1\text{h}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot 3600 \text{ s}} \right]$		$E = \frac{7,2 \cdot 48 \cdot 60}{\eta \cdot 1000} \quad \left[\frac{\text{m}^3 \cdot \text{N} \cdot \text{s} \cdot 1\text{h}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot 3600 \text{ s}} \right]$	
$E = \frac{7,2 \cdot 122 \cdot 60}{\eta \cdot 1000 \cdot 3600} \text{ [Nm] bzw. Ws}$		$E = \frac{7,2 \cdot 48 \cdot 60}{\eta \cdot 1000 \cdot 3600} \text{ [Nm] bzw. Ws}$	
E = 0,0146 Ws = 4,06 · 10⁻⁶ Wh		E = 0,00576 Ws = 1,6 · 10⁻⁶ Wh	
Energieverbrauch: 100 %		Energieverbrauch: 39 %	
Energieeinsparung: 0 %		Energieeinsparung: 61 %	

Die Berechnung (siehe Tabelle 1) zeigt, dass bei der Verwendung eines Filters nach Stand der Technik eine Energie von $4,06 \cdot 10^{-6}$ Wh verbraucht wird, um den Druckabfall auszugleichen. Die gleiche Rechnung auf Basis der Ergebnisse der Vorversuche ergibt, dass für den Betrieb des zu entwickelnden Filters eine Energie von $1,6 \cdot 10^{-6}$ Wh notwendig ist. Dies entspricht einer Energieeinsparung von 61 %.

2. Vorhabensdurchführungen und Ergebnisse

2.1 Herstellung der Ausrüstungen und Applikation

Bei den herkömmlichen Technologien ist meist die gesamte Faser mit funktionellen Partikeln durchsetzt, ohne dass sie elektretisch wirksam sind. Ein wichtiger Aspekt bei der Auswahl des Ausrüstungsverfahrens für dieses Projekt ist die Tatsache, dass bei der nasschemischen Zwangsanwendung auf das Faservlies mit anschließendem Kondensations- und Trocknungsprozess die funktionellen Partikel nur da zu finden sind, wo sie auch zur Wirkung kommen - an der Faseroberfläche. Die elektretische Wirkung wird dann durch funktionelle Nanopartikel erzielt, die in eine Bindermatrix eingebettet vorliegen. Bekannt ist in diesem Zusammenhang die Verwendung von organischen und metallorganischen Stoffen mit Ionencharakter als Langzeitstabilisatoren der Elektretwirkung in Filtervliesen [DGM93a] [DGM93b].

Bei der Verwendung der permaSeal-Ausrüstung als Bindermatrix zum Einbetten und Fixieren der (nicht)magnetischen bzw. dielektrischen Partikel im Faservlies sind vor allem die geringe Wasseraufnahme und die Stabilität gegenüber der Beladung mit öligen Aerosolen ein Vorteil. Um eine solche Eigenschaft der Bindermatrix zu erzielen, wurden bereits verschiedene Bindermatrixen (z.B. Polyurethane, Polyolefine, Polyacrylate) eingesetzt, bevorzugt hydrophobe Polymere. Die Wirkung von Fluorpolymeren in Elektretfiltervliesen als Langzeitstabilisatoren der Elektretwirkung von Filtermedien ist in der Patentliteratur beschrieben [JLR04]. Neben diesen speziellen Eigenschaften der verwendeten Polymere spielt ihre prinzipielle Eignung als Elektretmaterial und Bindermatrix für die eingebetteten Partikel bei der Auswahl eine wichtige Rolle. Die Antihafteigenschaften sowie die aus der Oberflächenfiltration bekannte leichte Abreinigbarkeit waren bei der Auswahl von Polymeren als Bindermatrix hier jedoch nicht entscheidend, da diese Eigenschaften für die Tiefenfiltration eine untergeordnete Rolle spielen.

Zum Nachweis, dass die von (nicht)magnetischen bzw. dielektrischen Partikeln ausgehenden Kräfte ausreichend sind für einen Effekt auf durch das Filtervlies strömende Stäube, wurden Vorversuche durchgeführt. Diese belegen, dass die Partikel eine stabilisierende Wirkung auf die Elektreteigenschaften des Filtervlieses haben. Das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen der Partikel spielt dabei eine Rolle, da damit auch andere physikalische Eigenschaften verbunden sein können. Die im Rahmen des Projekts verwendeten Partikel haben mittlere Durchmesser von ca. 20 - 50 nm (d50). Es ist bekannt, dass kleinere Cobalt-Nanopartikel z. B. bei einem mittleren Partikeldurchmesser von nur 12 nm (d50) superparamagnetisch sind, während Cobalt makroskopisch ferromagnetisch ist [Bec06].

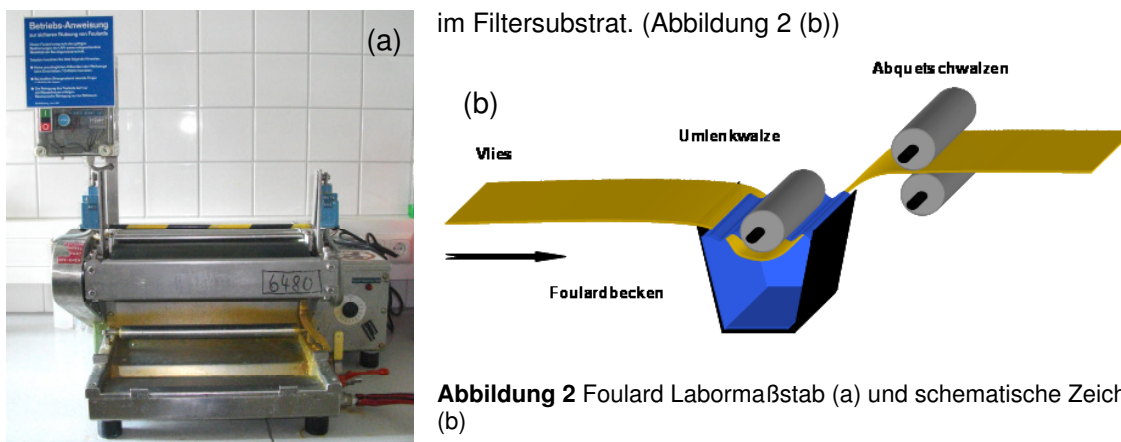
In den Vorversuchen haben sich als Bindermatrixen vor allem Formulierungen als geeignet erwiesen, die bei Nanogate bereits für andere Textilanwendungen wie z. B. Hydrophob- und/oder Oleophob-Ausrüstungen bei funktionellen Textilien Anwendung finden (permaSeal). In Kurzzeitversuchen wurde die prinzipielle Eignung der verwendeten Bindermatrixen in Kombination mit (nicht)magnetischen oder dielektrischen Partikeln als Elektretmaterial sowie eine verbesserte

Staubabscheidung von damit ausgerüsteten und elektrostatisch geladenen Filtervliesen im Vergleich zu nicht ausgerüsteten, aber elektrostatisch geladenen Filtervliesen bestätigt. Wichtig dabei ist die Tatsache, dass diese verbesserte Staubabscheidung ohne nachteilig erhöhten Druckabfall (Verringerung der Luftdurchlässigkeit) erreicht werden konnte.

Die (nicht)magnetischen bzw. dielektrischen Partikel, die in den permaStatic-Ausrüstungen für Vorversuche eingesetzt wurden, wurden bisher nicht als Elektretmaterialien für Filteranwendungen eingesetzt. Allerdings zeigten Kurzzeitversuche der Filzfabrik Fulda GmbH & Co. KG mit Filtervliesen, die nachträglich mit einer Kombination aus Bindermatrix und diesen Partikeln ausgerüstet wurden, eine deutliche Performanceverbesserung (Erhöhung des Staubabscheidegrads) bei nahezu unverändertem Druckabfall.

2.2 Herstellung der Formulierungen und Applikation mittels Foulardieren

Zur Herstellung der flüssigen Formulierungen für die Ausrüstungen der Filtersubstrate wurde eine möglichst homogene Mischung der funktionellen Bestandteile, in diesem Fall der eisenoxid- bzw. siliziumoxidbasierten Partikel und der polymeren Bindermatrix hergestellt. Bei allen im Rahmen dieses Projektes verwendeten Ausrüstungen handelt es sich um wasserbasierte Formulierungen. Die nasschemisch auszurüstenden Filtersubstrate wurde dann in ein Bad mit der entsprechenden Formulierung getaucht. Durch Zwangsapplikation (Foulardieren) erfolgte die gleichmäßige Verteilung



Hierbei wurde immer der maximale Druck der Foulardwalzen gewählt, da es sich bei allen Substraten um stark saugende und voluminöse Materialien handelte.

2.3 Ausrüstungsprozess

Sobald das flüssige Ausrüstungsmaterial mittels Foulardieren auf das Filtersubstrat aufgebracht worden war, folgte der Trocknungs- bzw. Kondensationsprozess. Bei den im Rahmen dieses Projektes verwendeten Ausrüstungen wurde hierzu eine Temperatur von ca. 150 °C verwendet. Die Trocknungszeit lag, je nach Beschaffenheit der jeweiligen Substrate, zwischen 10 und 20 Minuten. Diese Zeit lässt sich erfahrungsgemäß im industriellen Maßstab erheblich verkürzen. Im Anschluss erfolgte direkt die Aufladung mit einem Hochspannungsgenerator KNH124 und einer Aufladeelektrode R23ATR der Firma Eltex Elektrostatik GmbH mit einer Spannung von 20 kV. (gesamter Prozess siehe Abbildung 3). Die resultierende Oberflächenladung wurde in bestimmten Zeitabständen mittels eines Influenz-E-Feldmeters KNH34 der Firma Eltex Elektrostatik GmbH geprüft.

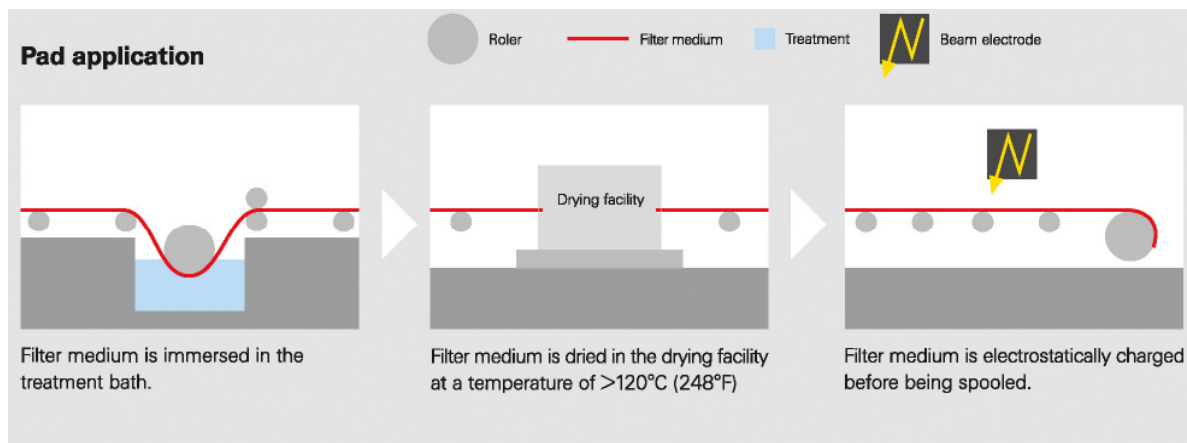


Abbildung 3 Ausrüstungsprozess

2.4 Evaluierung der Formulierungen und Ladungsstabilität

Die erste Evaluierung von Formulierungen verschiedener Zusammensetzungen erfolgte auf dem 100% Polyester Substrat V 2980 der Filzfabrik Fulda. Die Substrate wurden mit den verschiedenen Formulierungen gemäß oben beschriebenen Prozess ausgerüstet und auf Ihre Ladung und Ladungsstabilität hin getestet. Prinzipiell handelt es bei allen Formulierungen um homogene wässrige Dispersionen verschiedener funktioneller Bestandteile, die sich wie in Tabelle 2 zusammengefasst zusammensetzen.

Tabelle 2 Formulierungen

Formulierung	Wirkstoff	Zusammensetzung
1	VE-Wasser	> 97,0 %
	Dielektrische Si basierte Partikeldispersion (22 %)	< 3,0 %
2	VE- Wasser	> 96,0 %
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 3,0 %
	Magnetische Eisenoxidpartikeldispersion (35 nm)	< 1,0 %
3	VE- Wasser	> 95,5 %
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %
	Nichtmagnetische Eisenoxidpartikeldispersion (30 nm)	< 0,5 %
	Polysiloxanderivat (Dispersion in Wasser)	< 2,0 %
4	VE- Wasser	> 95,0 %
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 3,0 %
	Magnetische Eisenoxidpartikeldispersion (35 nm)	< 2,0 %
5	VE- Wasser	> 97,5 %
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %
	Magnetische Eisenoxidpartikeldispersion (35 nm)	< 0,5 %
6	VE- Wasser	> 95,5 %
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %
	Glimmer dielektrisch beschichtet	< 0,5 %
	Polysiloxanderivat (Dispersion in Wasser)	< 2,0 %
7	VE- Wasser	> 97,0 %
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %
	Magnetische Eisenoxidpartikeldispersion (20 nm)	< 1,0 %
8	VE- Wasser	> 94,5 %
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %
	Glimmer dielektrisch beschichtet	< 0,5 %
	Polysiloxanderivat (Dispersion in Wasser)	< 2,0 %

	Magnetische Eisenoxidpartikeldispersion (20 nm)	< 1,0 %
9	VE- Wasser	> 95,0 %
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %
	Magnetische Eisenoxidpartikeldispersion (20 nm)	< 1,0 %
	Polysiloxanderivat (Dispersion in Wasser)	< 2,0 %
10	VE- Wasser	> 98,0%
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 1,0 %
	Dielektrische Si basierte Partikeldispersion	< 0,5 %
	Magnetische Eisenoxidpartikeldispersion (20 nm)	< 0,5 %
11	VE- Wasser	> 97,0%
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %
	Dielektrische Si basierte Partikeldispersion (15 %)	< 1,0 %
12	VE- Wasser	> 97,0%
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %
	Dielektrische Al basierte Partikeldispersion (30 %)	< 1,0 %
13	VE- Wasser	> 98,0%
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 1,0 %
	Dielektrische Al basierte Partikeldispersion (30 %)	< 0,5 %
	Magnetische Eisenoxidpartikeldispersion (20 nm)	< 0,5 %
14	VE- Wasser	> 96,0%
	Wässrige Polymerdispersion	< 2,0 %
	Magnetische Eisenoxidpartikeldispersion (35 nm)	< 2,0 %
15	VE- Wasser	> 96,0%
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %
	Dielektrische Si basierte Partikeldispersion (30 %)	< 1,0 %
	Magnetische Eisenoxidpartikeldispersion (20 nm)	< 1,0 %

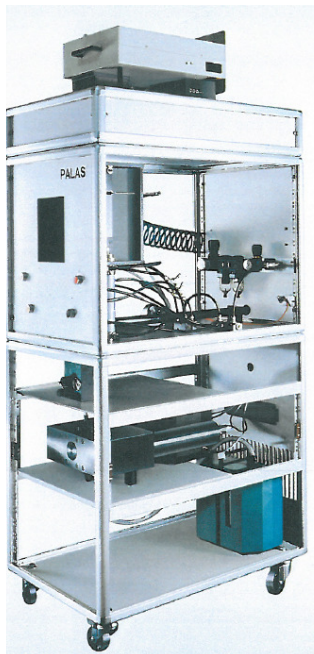
Eine permanente Ladungsstabilität an der Luft über mehr als drei Wochen konnte nur für die Ausrüstungen 1 bis 5 nachgewiesen werden. Die Ausrüstungen 6 bis 11, 14 und 15 zeigten nach dieser Zeit zwar auch noch eine Ladung, jedoch in etwas geringerem Maße.

Zur Ermittlung der Ladungsstabilität nach dem gezielten Entladungsversuch mit Isopropanol wurden alle ausgerüsteten Substrate großzügig und vollständig mit Isopropanol besprüht. Nach einer Trocknungszeit von 72 Stunden wurde die verbleibende Ladung erneut überprüft. Insgesamt sieben Ausrüstungen zeigten nach der Isopropanolbehandlung eine deutliche Ladungspermanenz. Die höchste Ladung behielten Ausrüstung 5 und 7, bei den Ausrüstungen 2, 3, 4, 9, 14 und 15 konnte ebenfalls noch eine adäquate Ladung nachgewiesen werden. Eine vollständige Entladung erfolgte jedoch bei keinem ausgerüsteten Substrat.

2.5 Evaluierung der Staubabscheidung

Die Messung der durch die Ausrüstung verbesserten Filtereffizienz erfolgte bei der Filzfabrik Fulda mittels eines modularen Prüfstands der Firma Palas (MFP 2000) (Abbildung 4). Alle Messungen wurden jeweils an unbehandelten und ausgerüsteten Substraten unter Verwendung identischer Prozessparameter durchgeführt, um sowohl den Druckabfall als auch die Staubabscheidegrade direkt miteinander vergleichen zu können.

Das Messprinzip beruht grundsätzlich darauf, dass der Prüfling, in diesem Fall die ausgerüsteten



bzw. unbehandelten Filtersubstrate mit einer definierten Staubmenge bei einer definierten Anströmgeschwindigkeit beaufschlagt werden und dabei der Abscheidegrad sowie der Druckabfall bestimmt werden. Bei dem verwendeten Teststaub handelt es sich um SAE Fine Dust, die Substratprüflinge besitzen eine Filterfläche von ca. 100 cm² und werden nach vorgegebenen Parametern (Anströmgeschwindigkeit, Massenkonzentration und Zeit) bestaubt. Es ist darauf zu achten, dass die anzuströmende Seite nach oben in die Filterhalterung eingelegt wird. Die Auswertung dieser Messungen erfolgt mit Hilfe des PALAS-AFP 2000-Programms. Hierbei wird der Fraktionsabscheidegrad nach einer individuell festgelegten Bestaubungszeit bzw. der Durchschnittswert für 60 s Bestaubung ermittelt. Die Ermittlung der resultierenden Druckabfälle erfolgt nach jeweils einer Minute Bestaubung. Die für alle Messungen im Rahmen der Laborversuche ausgewählten Prozessparameter sind in Tabelle 3 aufgeführt:

Abbildung 4 Palas Prüfstand MFP 2000

Tabelle 3 Prozessbedingungen Palasmessungen

Prüfbedingungen	
Anströmgeschwindigkeit	20 cm/s
Luftdurchsatz	7,2 m ³ /h
Staubkonzentration	200 mg/m ³
Prüffläche	100 cm ²
Partikelgrößenbereich (beobachtet)	0,25 - 10 µm
Partikelgrößenbereich (gemessen)	0,25 - 17,5 µm
Bestäubungszeit	60 s

2.5.1 Staubabscheidung Filtermedium FFF V 4321-1

Aufbau des Filtermediums

Beim Filtermedium **FFF V 4321-1** handelt es sich um ein Tiefenfiltermedium, bei dem im Laufe der Standzeit keine Rückreinigung mit Pressluft gegen die Filtrationsrichtung erfolgen muss. Man spricht in diesem Falle von Tiefenfiltermedien, da das Eindringen von Staub in das Medium gewünscht ist. Bei derartigen Filtermedien steigt die Druckdifferenz während der Standzeit wesentlich langsamer als beispielsweise bei Oberflächenfiltern. Bei einem solchen, z. B. FFF 6342, sollte kein Staub in die Tiefe des Mediums eindringen. Bei dem Filtermedium **FFF V 4321-1** handelt es sich um ein Tiefenfiltermedium aus 100 % Polyester. Die Faserfeinheiten liegen hierbei zwischen 3,3 und 6,7 dtex. Die Herstellung erfolgt aus PES Stapelfasern und Bikofasern zur Verfestigung. Die Vliesmatte wird geformt, indem eine Fasermischung mit Hilfe einer Krempel zu einem Flor geformt wird und dann mit einem Leger zu einer noch dickeren Matte geformt wird. Bevor nun eine Hitzebehandlung stattfindet, um die Bikofasern auszulösen, wird diese Fläche vernadelt. Dazu stechen Nadeln, auf denen sich Kerben befinden, von beiden Seiten in die Vliesfläche ein. Die Fasern werden von den Kerben erfasst und mehr oder weniger von ihrer horizontalen Ausrichtung in die Vertikale transportiert. Dies verdichtet die Fläche und verringert die Abstände der Fasern zueinander, was die Matte verfestigt. Danach läuft dieses Material in einen Bandofen und wird mit heißer Luft durchströmt. Durch den Bandofen kommt es nicht bzw. nur in wesentlich geringerem Maße zu einem einseitigen Verdichten der Vliesfläche, sodass sich hier kein Dichtengefälle in Richtung der Dicke ergibt. Die Heißluft führt zum Schmelzen des Mantels der Bindefaser und verklebt die Fasern miteinander. Die technischen Daten dieses Materials, wie Dicke, Gesamtgewicht, Luftdurchlässigkeit, maximale Temperaturbelastung und Verfestigungsart, können dem Anhang (Kapitel 5.5) entnommen werden.

Das Filtermaterial **FFF V 4321-1** ist ein Medium, das für hohe Staubspeicherkapazitäten entwickelt wurde, wie sie beispielsweise in der Tunnelabsaugung benötigt werden.

Ausgewählte Formulierungen zur Ausrüstung von FFF V 4321-1

Tabelle 4 Ausrüstungen für FFF V 4321-1

Formulierung	Wirkstoff	Zusammensetzung	Bezeichnung
5	VE- Wasser	> 97,5 %	„Elektret“ permaStatic
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %	
	Magnetische Eisenoxidpartikeldispersion (35 nm)	< 0,5 %	
11	VE- Wasser	> 97,0%	„Elektret“ permaStatic
	Wässrige Polymerdispersion (40 -60 %)	< 2,0 %	
	Dielektrische Si basierte Partikeldispersion (15 %)	< 1,0 %	
16	VE- Wasser	> 97,0%	„Elektret“ permaStatic
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %	
	Dielektrische Si basierte Partikeldispersion (30 %)	< 0,5 %	
	Magnetische Eisenoxidpartikeldispersion (35 nm)	< 0,5 %	
17	VE- Wasser	> 96,0%	permaSeal
	Wässrige Fluor-Polymerdispersion	< 3,0 %	
	Reaktivharz auf Isocyanatbasis	< 1,0 %	

Ergebnisse der Retention und Ladung zum Versuch von FFF V 4321-1

Tabelle 5 Retention von ausgerüsteten Substraten FFF V 4321-1 und entsprechender Rohware

Ausrüstung	V 4321-1 – Strichmarkierung angeströmt			V 4321-1 – ohne Markierung		
	Retention %	Retention-Ø %	Ladung kV	Retention %	Retention-Ø %	Ladung kV
	min. - max.			min. - max.		
Rohware	46,35 - 56,48	51,52	-0,15	61,49 - 62,98	62,24	-0,15
5	87,48 - 89,95	88,72	-0,6	72,58 - 90,77	81,68	-0,6
11	86,02 - 90,17	88,10	-0,5 - -0,6	85,75 - 92,33	89,04	-0,5 - -0,6

16	88,17 - 91,47	89,82	-0,7 - -1,0	91,43 - 93,71	92,57	-0,7 - -1,0
17	87,64 - 91,66	89,65	-0,5 - -0,7	91,50 - 92,90	92,20	- 0,5- -0,7

Mit einem unbehandelten Filtersubstrat FFF V 4321-1 (Rohware) liegt die durchschnittliche Retention bei 51,52 %. Insgesamt werden bei allen mit permaSeal und permaStatic ausgerüsteten Substraten bei identischen Prozessparametern wesentlich höhere Retentionswerte von weit über 80 % (siehe Tabelle 5) erreicht. Das beste Ergebnis konnte im Falle dieses Substrates mit der permaStatic Ausrüstung 16 erzielt werden, wobei eine durchschnittliche Retention von 89,82 % gemessen wurde.

Ein wesentlicher Faktor bei der Ermittlung der Filtereffizienz ist neben einem deutlich verbesserten Abscheidegrad die Luftdurchlässigkeit des Filters bzw. der bei der Filtration entstehende Druckabfall. Dieser sollte sich durch eine Ausrüstung nicht ändern oder nur unwesentlich ansteigen, damit der verbesserten Staubabscheidung nicht der Aspekt von höherem Energieaufwand beim Filterbetrieb entgegensteht.

Luftdurchlässigkeiten von ausgerüsteten Substraten FFF V 4321-1 und entsprechender Rohware

Tabelle 6 Luftdurchlässigkeit von ausgerüsteten Substraten FFF V 4321-1 und entsprechender Rohware

Substrat V 4321-1	Ausrüstung	Luftdurchlässigkeit	Druckabfall	Luftdurchlässigkeit	Druckabfall
		[l/dm ² min]	[Pa]	[l/dm ² min] Ø	[Pa] Ø
Rohware	1050		24,00	1168	22
	1140		23,00		
	1220		21,00		
	1260		20,00		
5	1080		25,00	1130	24
	1110		24,00		
	1160		24,00		
	1170		23,00		
11	1120		25,00	1128	26
	1130		25,00		
	1140		26,00		
	1120		28,00		
16	1210		23,00	1123	24
	1120		24,00		
	1100		24,00		
	1060		26,00		

	17	1030	25,00	1088	25
		1140	23,00		
		1070	25,00		
		1110	25,00		

Die Luftdurchlässigkeit sowie entsprechender Druckabfall können Tabelle 6 entnommen werden. Im Vergleich zur Rohware mit einer durchschnittlichen Luftdurchlässigkeit von 1168 l/dm² min und einem Druckabfall von 22 Pa, erhöhen sich die Werte durch alle Ausrüstungen nur wenig bis max. 26 Pa (bei Ausrüstung 11) bei einer Luftdurchlässigkeit von 1128 l/dm² min. Bei Ausrüstung 16, mit der die höchste Staubabscheideleistung erzielt werden konnte, beträgt der durchschnittliche Druckabfall 24 Pa (Luftdurchlässigkeit 1123 l/dm²) und ist somit nur geringfügig höher als bei der Rohware mit 22 Pa (Luftdurchlässigkeit 1168 l/dm²).

Vergleich Retention, Luftdurchlässigkeit und Druckabfall von ausgerüsteten Substraten FFF V 4321-1 und entsprechender Rohware

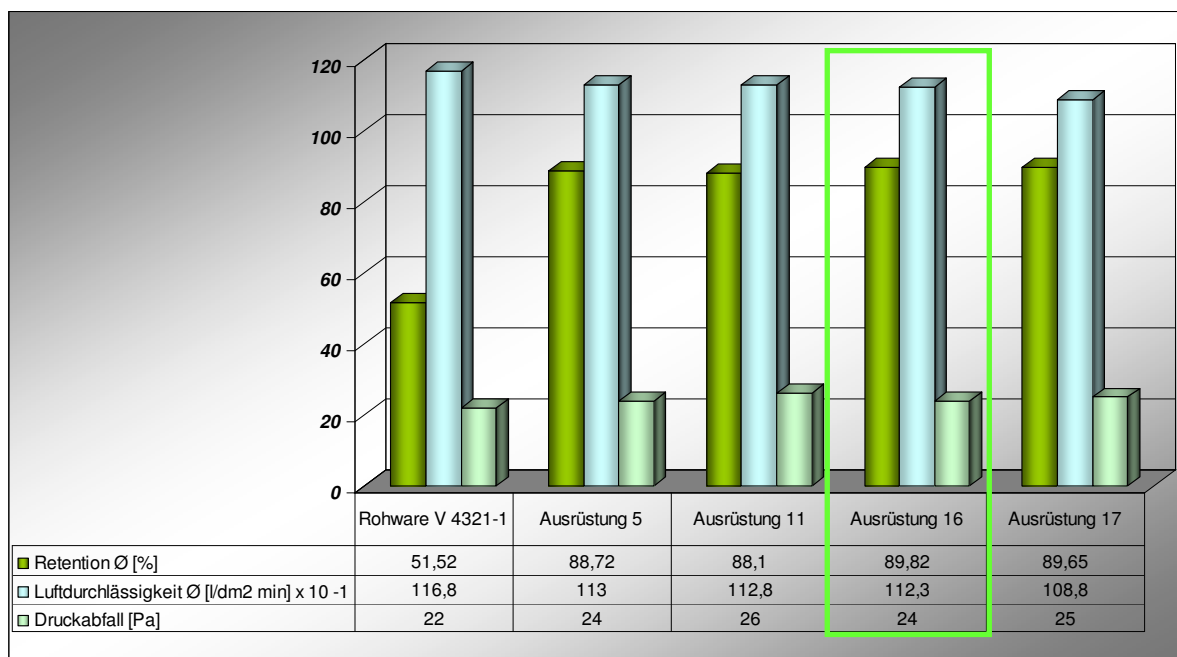


Abbildung 5 Vergleich Retention, Luftdurchlässigkeit und Druckabfall von FFF V 4321-1 Rohware und ausgerüstet

Für das Substrat FFF V 4321-1 kann mit der permaStatic Ausrüstung 16 insgesamt eine Steigerung der Retention von 51,52 % auf 89,82 % erzielt werden (vgl. Abb. 6). Dadurch, dass sich der Druckabfall durch die Ausrüstung nur sehr wenig ändert, und somit nicht mehr Energie beim Filterbetrieb verbraucht würde, könnte ein Filter mit einem derart ausgerüsteten Medium effizienter arbeiten. Im Anhang 5.1 sind die Retentionskurven der Rohware und die der Substrate mit allen Ausrüstungen zum Vergleich aufgeführt.

Vergleich Filtereffizienz (Retention) von ausgerüsteten Substraten FFF V 4321-1 und entsprechender Rohware

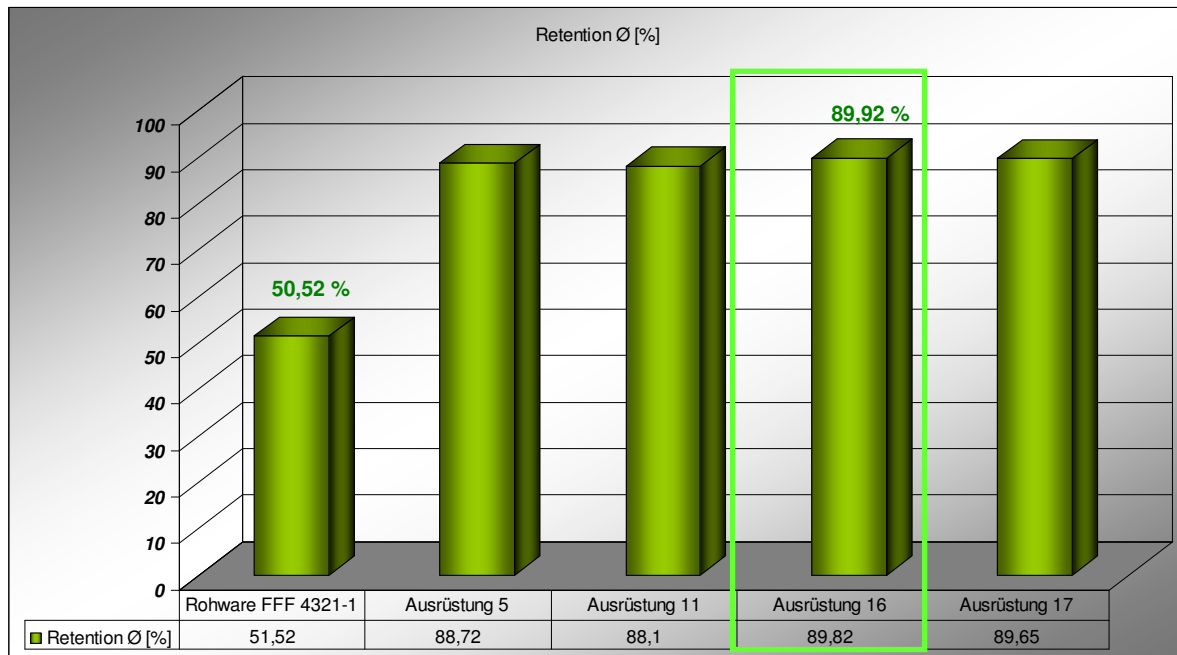


Abbildung 6 Vergleich Filtereffizienz (Retention) von FFF V 4321-1 Rohware und ausgerüstet

2.5.2 Staubabscheidung Filtermedium FFF 6406

Aufbau des Filtermediums

Beim Filtermedium **FFF 6406** handelt es sich um ein Tiefenfiltermedium aus 100 % Polyester, welches aus PES-Stapelfasern hergestellt wird. Die Faserfeinheiten liegen hierbei zwischen 3,3 und 17 dtex. Als Verfestigungsbestandteile kommen Bikofasern zum Einsatz. Diese verfügen über einen Mantel, der im Allgemeinen geringere Schmelztemperaturen aufweist als der Faserkern. Es wird eine Fasermischung erzeugt und diese Fasermischung wird mit Hilfe einer Krempel zu einem Flor geformt. Dieser noch sehr leichte Flor wird mit einem Leger zu einer dickeren Matte geformt, die dann ungefähr das Flächengewicht des späteren Vliesstoffes aufweist. Weiter läuft diese Matte in einen Ofen, der aus einer Trommel besteht, aus deren Mitte die Luft durch ein Gebläse gesaugt wird. Dadurch dass diese Trommel wie ein Sieb beschaffen ist, wird Luft durch den Unterdruck in der Trommel durch die Vliesfläche gesaugt. Diese Luft hat eine Temperatur die ungefähr am Schmelzpunkt der niedrig schmelzenden Bikofaserkomponente liegt. Durch den Umstand, dass die Luft durch das Vlies und die Trommel gesaugt wird, entsteht im Material eine von der späteren Anströmrichtung her immer größer werdende Dichte in Dickenrichtung. Man erhält also eine Anströmseite mit geringer Dichte und eine Abströmseite mit hoher Dichte. Das Vlies verlässt dann den Ofen, kühlt ab und verfestigt sich dadurch. Die technischen Daten dieses Materials, wie Dicke, Gesamtgewicht, Luftdurchlässigkeit, maximale Temperaturbelastung und Verfestigungsart, können

dem Anhang (Kapitel 5.6) entnommen werden. Ein derartiges Filtermedium kann z.B. als Ölnebelabscheider oder aber auch als Staubspeichervlies in Klimaanlage Einsatz finden.

Ausgewählte Formulierungen zur Ausrüstung von FFF 6406

Tabelle 7 Ausrüstungen für FFF 6406

Formulierung	Wirkstoff	Zusammensetzung	Bezeichnung
3	VE- Wasser	> 95,5 %	„Elektret“ permaStatic
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %	
	Nichtmagnetische Eisenoxidpartikeldispersion (30 nm)	< 0,5 %	
	Polysiloxanderivat (Dispersion in Wasser)	< 2,0 %	
5	VE- Wasser	> 97,5 %	„Elektret“ permaStatic
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %	
	Magnetische Eisenoxidpartikeldispersion (35 nm)	< 0,5 %	
6	VE- Wasser	> 95,5 %	„Elektret“ permaStatic
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %	
	Glimmer dielektrisch beschichtet	< 0,5 %	
	Polysiloxanderivat (Dispersion in Wasser)	< 2,0 %	
11	VE- Wasser	> 97,0%	„Elektret“ permaStatic
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %	
	Dielektrische Si basierte Partikeldispersion (15 %)	< 1,0 %	
12	VE- Wasser	> 97,0%	„Elektret“ permaStatic
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %	
	Dielektrische Al basierte Partikeldispersion (30 %)	< 1,0 %	

16	VE- Wasser	> 97,0%	Elektret“ permaStatic
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %	
	Dielektrische Si basierte Partikeldispersion (30 %)	< 0,5 %	
	Magnetische Eisenoxidpartikeldispersion (35 nm)	< 0,5 %	
17	VE- Wasser	> 96,0%	permaSeal
	Wässrige Fluor-Polymerdispersion	< 3,0 %	
	Reaktivharz auf Isocyanatbasis	< 1,0 %	
18	Formulierung 17	> 98 %	permaSeal + Additiv („Antistatik“ zum Vergleich)
	Polyethylenglycol	< 1,0 %	
	Phosphatsalz	< 1,0 %	
19	VE-Wasser	> 98 %	Additiv („Antistatik“ zum Vergleich)
	Polyethylenglycol	1,0 %	
	Phosphatsalz	1,0 %	

Ergebnisse der Retention und Ladung zum Versuch von FFF 6406

Tabelle 8 Retention von ausgerüsteten Substraten FFF 6406 und entsprechender Rohware

Ausrüstung	FFF 6406		
	Retention %	Retention-Ø %	Ladung kV
	min. - max.		
Rohware	49,67 - 57,48	53,58	
3	78,79 - 81,97	80,38	-1,1
5	85,96 - 88,32	87,14	-1,6
6	79,12 - 82,65	80,89	-0,8

11	77,79 - 79,88	78,84	-1,2
12	73,46 - 79,10	76,37	+0,06
16	79,13 - 87,48	83,31	-1,1
17	62,36 - 67,73	65,05	-0,5
18	50,84 - 53,86	52,35	-0,4
19	22,55 - 29,17	25,86	-0,01

Die Rohware des Filtermediums FFF 6406 weist bei gleichen Testbedingungen eine Retention von durchschnittlich 53,8 % auf. Mit den permaStatic Ausrüstungen 5 und 16 hingegen werden Werte von 87,14 % bzw. 83,31 % erreicht. Der Vergleichstest von Antistatikausrüstungen (Ausrüstung 18 und 19) bestätigt die These, dass elektrostatische Ausrüstungen die Staubabscheidung deutlich verbessern. Sowohl die durchschnittliche Retention von Ausrüstung 18 (52,35 %) als auch die von Ausrüstung 19 (25,86 %) lag sogar unter den Werten der unbehandelten Rohware. Die durchschnittlichen Retentionen aller Ausrüstungen, die auf diesem Substrat getestet wurden, können Tabelle 8 entnommen werden.

Luftdurchlässigkeiten von ausgerüsteten Substraten FFF 6406 und entsprechender Rohware

Tabelle 9 Luftdurchlässigkeit von ausgerüsteten Substraten FFF 6406 und entsprechender Rohware

Substrat FFF 6406	Ausrüstung	Luftdurchlässigkeit	Druckabfall	Luftdurchlässigkeit	Druckabfall
		[l/dm ² min]	[Pa]	[l/dm ² min] Ø	[Pa] Ø
Rohware		2750	10,00	2730	10
		2710	10,00		
3		2660	11,00	2595	10,5
		2530	10,00		
5		2640	10,00	2625	10,5
		2610	11,00		
6		2620	11,00	2595	11
		2570	11,00		
11		2610	10,00	2600	10,5
		2590	11,00		
12		2590	10,00	2543	10
		2496	10,00		
16		2660	11,00	2685	11
		2710	11,00		

	17	2610	12,00	2740	12
		2870	12,00		
	18	2810	12,00	2765	12
		2720	12,00		
	19	2620	12,00	2705	11,5
		2790	11,00		

Hinsichtlich der Luftdurchlässigkeiten und der entsprechenden Druckabfälle wirkt sich keine der getesteten Ausrüstungen nachteilig aus. Die Luftdurchlässigkeit ändert sich also nur geringfügig. Der Druckabfall erhöht sich nur sehr wenig von 10 Pa bei der Rohware zu maximal 12 Pa bei Ausrüstung 17 und 18.

Die permaStatic Ausrüstungen 5 und 16, unter deren Verwendung bei diesem Substrat die besten Retentionswerte erhalten wurden, bewirken sogar einen noch geringeren Anstieg des Druckabfalls von 10,5 Pa bei Ausrüstung 5 und 11 Pa bei Ausrüstung 16 (siehe Tabelle 9).

Vergleich Retention, Luftdurchlässigkeit und Druckabfall von ausgerüsteten Substraten FFF 6406 und entsprechender Rohware

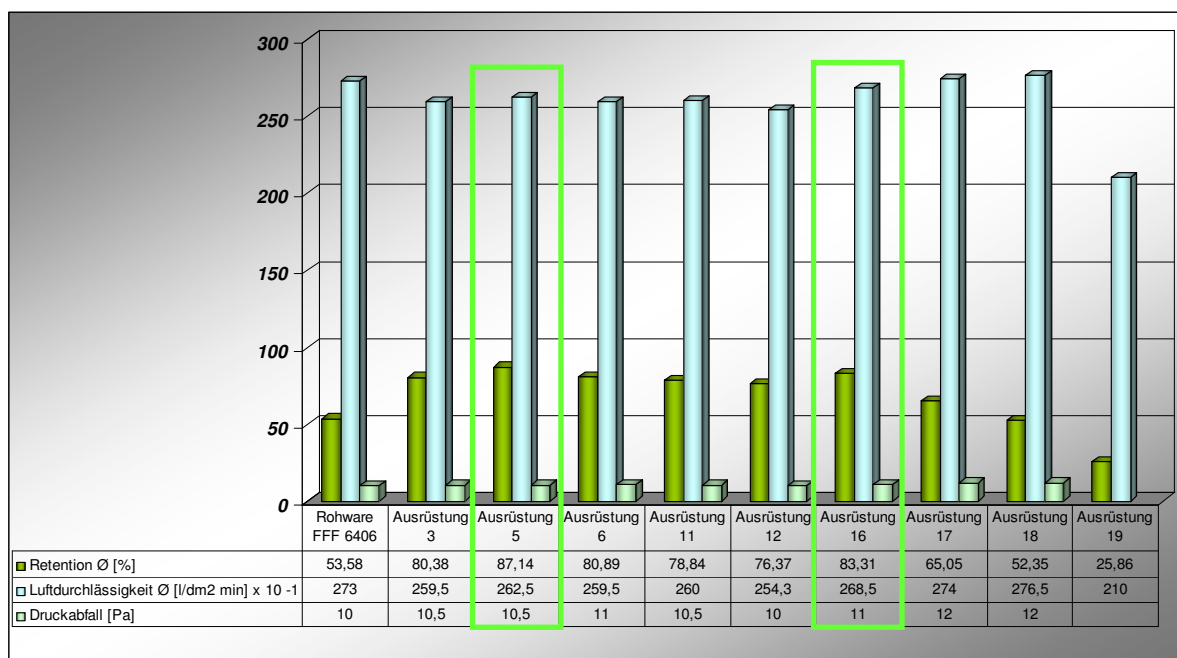


Abbildung 7 Vergleich Retention, Luftdurchlässigkeit und Druckabfall von FFF 6406 Rohware und ausgerüstet

Für das Substrat FFF V 6406 kann mit den permaStatic Ausrüstungen 5 und 16 insgesamt eine Steigerung der Retention von 53,58 % (Rohware) auf 87,14 % mit der permaStatic Ausrüstung 5 und 83,31 % mit der permaStatic Ausrüstung 16 erzielt werden (Abbildung 8). Auch hier werden Druckabfall und Luftdurchlässigkeit so wenig durch die Ausrüstungen beeinflusst, dass sich hierdurch keinerlei Nachteile beim Filterbetrieb ergeben würden (Abbildung 7).

Rüstet man das Filtermedium hingegen antistatisch aus, also so, dass Ladungen bestmöglich abfließen und nicht gespeichert werden können (Ausrüstung 18 und 19), so wird eine gegenläufige Tendenz deutlich. Antistatisch ausgerüstete Medien zeigen durchschnittliche Retentionswerte, die wesentlich unter denen der unbehandelten Rohware liegen (Abbildung 8). Im Anhang 5.2 sind die Retentionskurven der Rohware und die der Substrate mit allen Ausrüstungen zum Vergleich aufgeführt.

Vergleich Filtereffizienz (Retention) von ausgerüsteten Substraten FFF 6406 und entsprechender Rohware

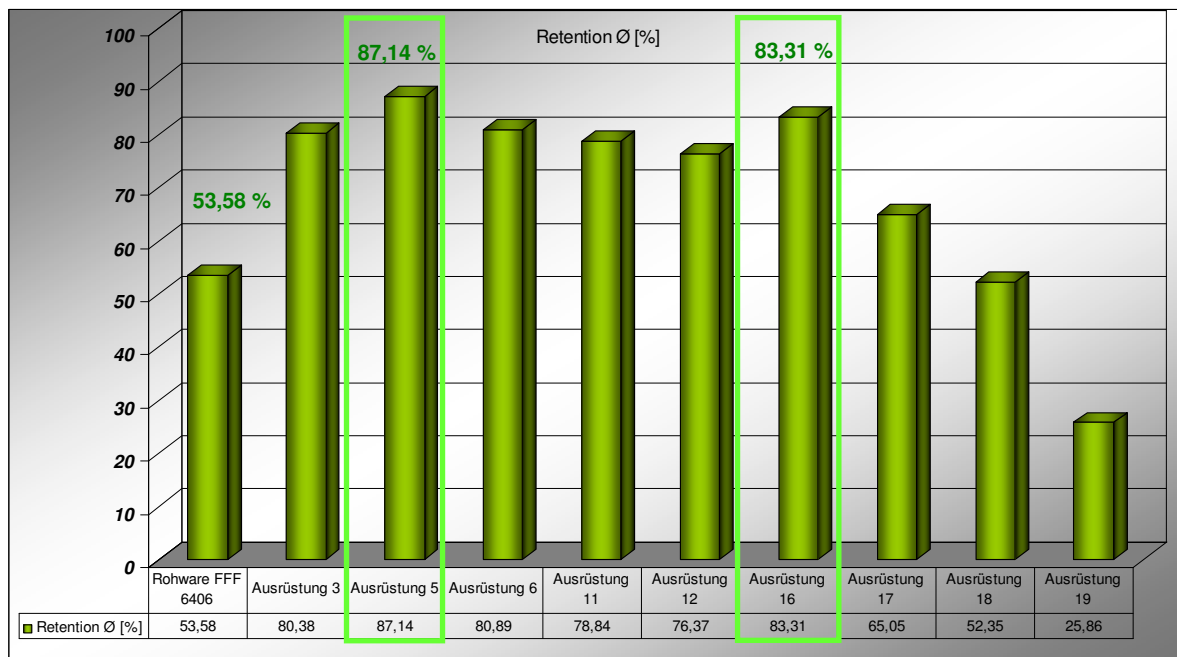


Abbildung 8 Vergleich Filtereffizienz (Retention) von FFF 6406 Rohware und ausgerüstet

2.5.3 Staubabscheidung Filtermedium FFF 6470

Aufbau des Filtermediums

Beim Filtermedium **FFF 6470** handelt es sich um ein Tiefenfiltermedium aus 100 % Polyester (Feinheit der Fasern: 4,8-6,7 dtex), bei dem die Formung der Vliesmatte auf gleiche Weise wie bei FFF 6406 erfolgt. Bevor hier jedoch eine Hitzebehandlung stattfindet, um die Bikofasern auszulösen, wird diese Fläche vernadelt. Dazu stechen Nadeln mit Kerben von beiden Seiten in die Vliesfläche ein. Die Fasern werden von den Kerben erfasst und mehr oder weniger von ihrer horizontalen Ausrichtung in die Vertikale transferiert. Dies verdichtet die Fläche und verringert die Abstände der Fasern zueinander, was die gesamte Matte verfestigt. Weiterhin läuft dieses Material in einen Bandofen und wird durch heiße Luft durchströmt. Durch den Bandofen kommt es nicht bzw. in wesentlich geringerem Maße zu einem einseitigen Verdichten der Vliesfläche, sodass sich hier kein Dichtengefälle in Richtung der Dicke ergibt. Die Heißluft führt zum Schmelzen des Mantels der

Bindefaser und verklebt so die Fasern miteinander. Die technischen Daten dieses Materials, wie Dicke, Gesamtgewicht, Luftdurchlässigkeit, maximale Temperaturbelastung und Verfestigungsart, können dem Anhang (Kapitel 5.7) entnommen werden. Das Filtermedium **FFF 6470** wird in Klimaanlage als Staubabscheide- sowie Staubspeichervlies eingesetzt.

Ausgewählte Formulierungen zur Ausrüstung von FFF 6470

Tabelle 10 Ausrüstungen für FFF 6470

Formulierung	Wirkstoff	Zusammensetzung	Bezeichnung
3	VE- Wasser	> 95,5 %	„Elektret“ permaStatic
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %	
	Nichtmagnetische Eisenoxidpartikeldispersion (30 nm)	< 0,5 %	
	Polysiloxanderivat (Dispersion in Wasser)	< 2,0 %	
5	VE- Wasser	> 97,5 %	„Elektret“ permaStatic
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %	
	Magnetische Eisenoxidpartikeldispersion (35 nm)	< 0,5 %	
6	VE- Wasser	> 95,5 %	„Elektret“ permaStatic
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %	
	Glimmer dielektrisch beschichtet	< 0,5 %	
	Polysiloxanderivat (Dispersion in Wasser)	< 2,0 %	
11	VE- Wasser	> 97,0 %	„Elektret“ permaStatic
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %	
	Dielektrische Si basierte Partikeldispersion (15 %)	< 1,0 %	
12	VE- Wasser	> 97,0 %	„Elektret“ permaStatic
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %	
	Dielektrische Al basierte Partikeldispersion (30 %)	< 1,0 %	
16	VE- Wasser	> 97,0 %	Elektret“ permaStatic
	Wässrige Fluorpolymerdispersion	< 2,0 %	

	Dielektrische Si basierte Partikeldispersion (30 %)	< 0,5 %	
	Magnetische Eisenoxidpartikeldispersion (35 nm)	< 0,5 %	
17	VE- Wasser	> 96,0 %	permaSeal
	Wässrige Fluor-Polymerdispersion	< 3,0 %	
	Reaktivharz auf Isocyanatbasis	< 1,0 %	
18	Formulierung 17	> 98 %	permaSeal + Additiv („Antistatik“ zum Vergleich)
	Polyethylenglycol	< 1,0 %	
	Phosphatsalz	< 1,0 %	
19	VE-Wasser	> 98 %	Additiv („Antistatik“ zum Vergleich)
	Polyethylenglycol	< 1,0 %	
	Phosphatsalz	< 1,0 %	

Ergebnisse der Retention und Ladung zum Versuch von FFF 6470

Tabelle 11 Retention von ausgerüsteten Substraten FFF 6470 und entsprechender Rohware

Ausrüstung	FFF 6470		
	Retention %	Retention-Ø %	Ladung kV
	min. max.		
Rohware	68,92 - 72,73	70,83	
3	88,30 - 90,20	89,25	-7,2
5	81,34 - 92,15	86,75	-3,6
6	87,10 - 90,21	88,67	-5,6
11	89,26 - 92,18	90,72	-4,9
12	87,89 - 92,82	90,36	-4,6
16	85,55 - 93,89	89,72	-5,7
17	88,57 - 89,64	89,10	-1,1
18	75,49 - 79,06	77,28	-0,06

19	57,64 - 65,12	61,38	-0,01
----	---------------	-------	-------

Beim Filtermedium FFF 6470, das unbehandelt Retentionswerte von durchschnittlich 70,83 % hat, konnten ebenfalls sowohl mit allen permaStatic und der permaSeal Ausrüstung deutliche Steigerungen bezüglich Abscheidegrad erreicht werden. Insgesamt drei Ausrüstungen (11, 12 und 16) zeigten Werte um 90 % (siehe Tabelle 11). Auch hier bestätigen die Messergebnisse, dass sich Antistatikausrüstungen (18 und 19) nachteilig auf das Staubabschneideverhalten auswirken.

Luftdurchlässigkeiten von ausgerüsteten Substraten FFF 6470 und entsprechender Rohware

Tabelle 12 Luftdurchlässigkeit von ausgerüsteten Substraten FFF 6470 und entsprechender Rohware

Substrat FFF 6470	Ausrüstung	Luftdurchlässigkeit [l/dm ² min]	Druckabfall [Pa]	Luftdurchlässigkeit [l/dm ² min] Ø	Druckabfall [Pa] Ø																																																																														
	Rohware		1540	14,00	1495	14,5																																																																													
		1450	15,00	3				1180	19,00	1215	18,5		1250	18,00	5		1290	18,00	1275	18		1260	18,00	6		1250	17,00	1230	17		1210	17,00	11		1190	19,00	1180	18,5		1170	18,00	12		1240	18,00	1265	18		1290	18,00	16		1290	17,00	1270	18,5		1250	20,00	17		1250	19,00	1285	19		1320	19,00	18		1220	18,00	1240	18		1260	18,00	19		1210	19,00	1200	18,5
3		1180	19,00		1215	18,5																																																																													
		1250	18,00	5				1290	18,00	1275	18		1260	18,00	6		1250	17,00	1230	17		1210	17,00	11		1190	19,00	1180	18,5		1170	18,00	12		1240	18,00	1265	18		1290	18,00	16		1290	17,00	1270	18,5		1250	20,00	17		1250	19,00	1285	19		1320	19,00	18		1220	18,00	1240	18		1260	18,00	19		1210	19,00	1200	18,5		1190	18,00						
5		1290	18,00		1275	18																																																																													
		1260	18,00	6				1250	17,00	1230	17		1210	17,00	11		1190	19,00	1180	18,5		1170	18,00	12		1240	18,00	1265	18		1290	18,00	16		1290	17,00	1270	18,5		1250	20,00	17		1250	19,00	1285	19		1320	19,00	18		1220	18,00	1240	18		1260	18,00	19		1210	19,00	1200	18,5		1190	18,00															
6		1250	17,00		1230	17																																																																													
		1210	17,00	11				1190	19,00	1180	18,5		1170	18,00	12		1240	18,00	1265	18		1290	18,00	16		1290	17,00	1270	18,5		1250	20,00	17		1250	19,00	1285	19		1320	19,00	18		1220	18,00	1240	18		1260	18,00	19		1210	19,00	1200	18,5		1190	18,00																								
11		1190	19,00		1180	18,5																																																																													
		1170	18,00	12				1240	18,00	1265	18		1290	18,00	16		1290	17,00	1270	18,5		1250	20,00	17		1250	19,00	1285	19		1320	19,00	18		1220	18,00	1240	18		1260	18,00	19		1210	19,00	1200	18,5		1190	18,00																																	
12		1240	18,00		1265	18																																																																													
		1290	18,00	16				1290	17,00	1270	18,5		1250	20,00	17		1250	19,00	1285	19		1320	19,00	18		1220	18,00	1240	18		1260	18,00	19		1210	19,00	1200	18,5		1190	18,00																																										
16		1290	17,00		1270	18,5																																																																													
		1250	20,00	17				1250	19,00	1285	19		1320	19,00	18		1220	18,00	1240	18		1260	18,00	19		1210	19,00	1200	18,5		1190	18,00																																																			
17		1250	19,00		1285	19																																																																													
		1320	19,00	18				1220	18,00	1240	18		1260	18,00	19		1210	19,00	1200	18,5		1190	18,00																																																												
18		1220	18,00		1240	18																																																																													
		1260	18,00	19				1210	19,00	1200	18,5		1190	18,00																																																																					
19		1210	19,00		1200	18,5																																																																													
		1190	18,00																																																																																

Durch alle Ausrüstungen kommt es auch bei diesem Substrat nur zu einer geringen Abnahme der Luftdurchlässigkeit (von 1495 l/dm² min der Rohware zu max. 1275 l/dm² min bei Ausrüstung 5) und entsprechend geringem Anstieg des Druckabfalls (von 14,5 Pa bei der Rohware auf 18 Pa bzw. 18,5 Pa bei den Ausrüstungen 11,12 und 13) (Tabelle 12).

Vergleich Retention, Luftdurchlässigkeit und Druckabfall von ausgerüsteten Substraten FFF 6470 und entsprechender Rohware

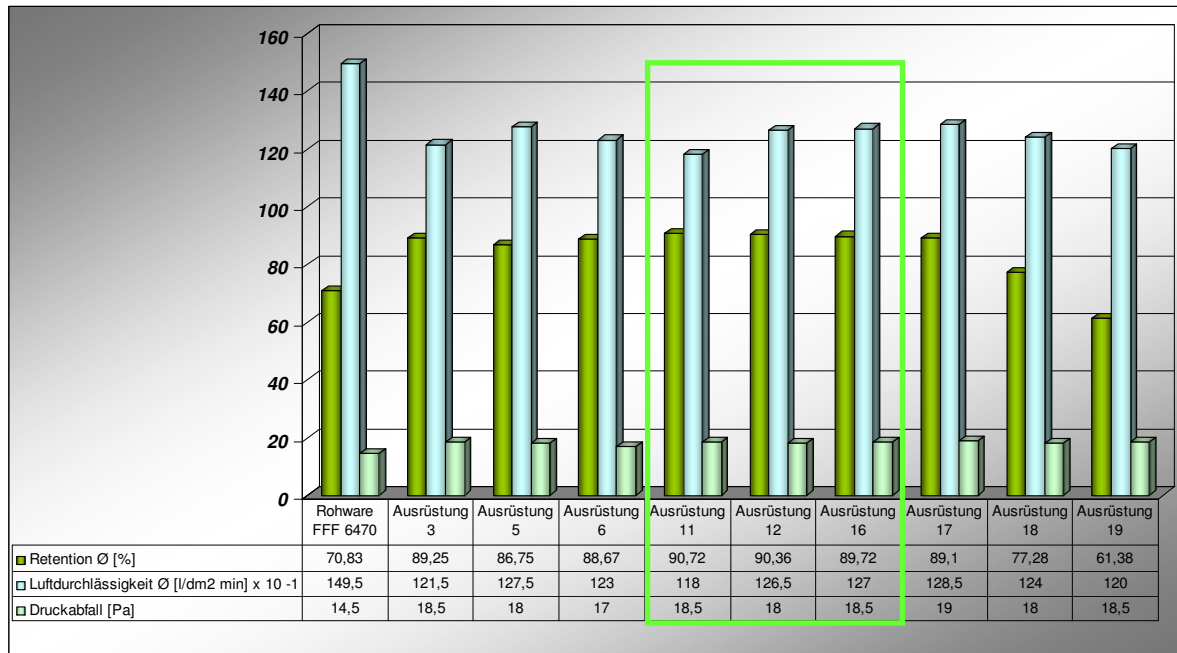


Abbildung 9 Vergleich Retention, Luftdurchlässigkeit und Druckabfall von FFF 6470 Rohware und ausgerüstet

Vergleich Filtereffizienz (Retention) von ausgerüsteten Substraten FFF 6470 und entsprechender Rohware

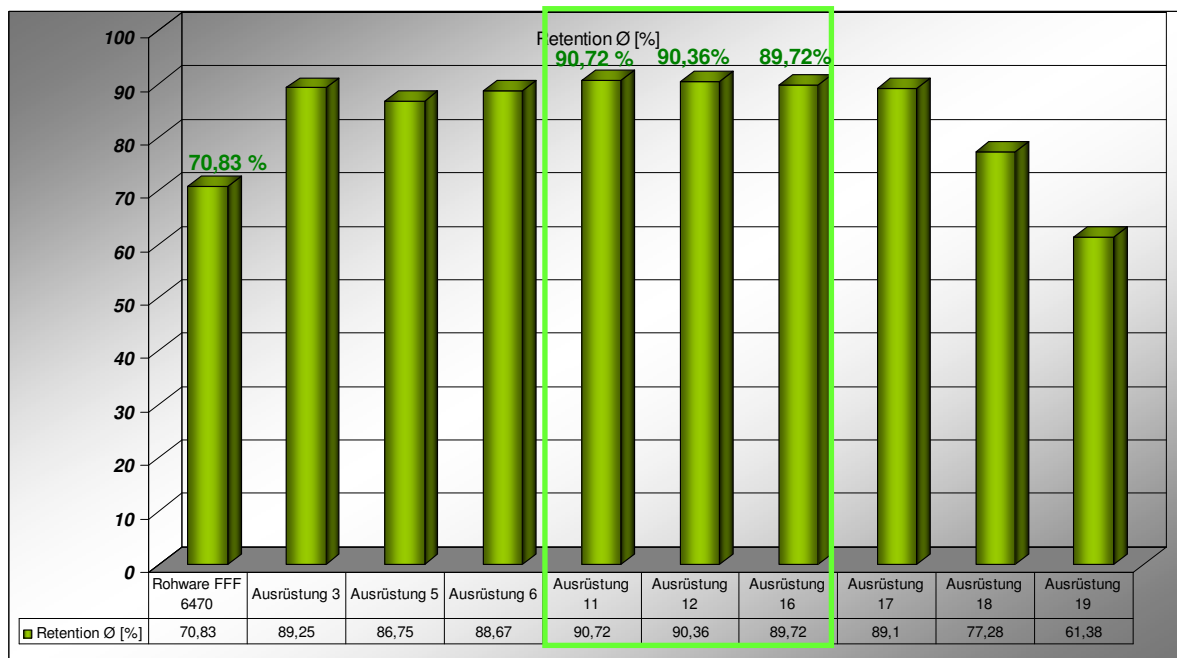


Abbildung 10 Vergleich Filtereffizienz (Retention) von ausgerüsteten Substraten FFF 6470 Rohware und ausgerüstet

Insgesamt kann bei diesem Substrat durch eine geeignete Ausrüstung (Ausrüstungen 11,12 und 16) die durchschnittliche Retention von 70 % auf 90 % gesteigert werden. Hierbei sind die Auswirkungen

der leicht gesunkenen Luftdurchlässigkeit und des minimalen Anstiegs des Druckabfalls so gering, dass von einer deutlichen Filtereffizienzsteigerung bei sonst gleichen Bedingungen gesprochen werden kann. Im Anhang 5.3 sind die Retentionskurven der Rohware und die der Substrate mit allen Ausrüstungen zum Vergleich aufgeführt.

2.5.4 Staubabscheidung Filtermedium FFF 6342

Aufbau des Filtermediums

Das Filtermedium **FFF 6342** ist im Gegensatz zu allen anderen verwendeten Substraten ein Oberflächenfilter (PES 1,7 - 2,2 dtex), bei dem die Vliesmatte durch zwei heiße Kalandervalzen verfestigt wird. Solche Medien weisen meist eine geringere Dicke (ca. 1 mm) als Tiefenfiltermedien auf. Die unverfestigte Vliesmatte läuft auf zwei beheizte Walzen auf und wird vom Walzennipp erfasst. Eine Walze verfügt über eine glatte Oberfläche die andere Walze weist eine Gravur auf. Diese Gravurpunkte drücken die Vliesmatte stark zusammen und verschweißen das Material an dieser Fläche, sodass man theoretisch annehmen kann, dass diese Gravurpunkte eine Luftdurchlässigkeit nahe 0 haben. Die Fläche, die nicht durch Gravurpunkte besetzt ist (ca. 80 %), verdichtet diese Vliesfläche nur gering, sodass auch hier die Bikofasern schmelzen, jedoch die Luftdurchlässigkeit wesentlich höher ist als auf der Vliesfläche mit Gravurpunkten. Der Filter weist also partiell stark und gering verdichtete Stellen auf. Da Luft den Weg des geringsten Widerstandes nimmt, erfolgt die Filtration fast nur über die gering verdichteten erhabenen Stellen. Die technischen Daten dieses Materials, wie Dicke, Gesamtgewicht, Luftdurchlässigkeit, maximale Temperaturbelastung und Verfestigungsart, können dem Anhang (Kapitel 5.8) entnommen werden. **FFF 6342** ist ein plissierbares Filtermedium für die Patronenfilterindustrie und für die Trockenentstaubung, z.B. bei Pulverbeschichtungsanlagen.

Ausgewählte Formulierungen zur Ausrüstung

Tabelle 13 Ausrüstungen für FFF 6342

Formulierung	Wirkstoff	Zusammensetzung	Bezeichnung
17	VE- Wasser	> 96,0%	permaSeal
	Wässrige Fluor-Polymerdispersion	< 3,0 %	
	Reaktivharz auf Isocyanatbasis	< 1,0 %	
18	Formulierung 17	> 98 %	permaSeal + Additiv („Antistatik“ zum Vergleich)
	Polyethylenglycol	<,0 %	
	Phosphatsalz	< 1,0 %	

19	VE-Wasser	> 98 %	Additiv („Antistatik“ zum Vergleich)
	Polyethylenglycol	< 1,0 %	
	Phosphatsalz	< 1,0 %	

Ergebnisse der Retention und Ladung zum Versuch von FFF 6342

Tabelle 14 Retention von ausgerüsteten Substraten FFF 6342 und entsprechender Rohware

Ausrüstung	FFF 6342 (Glatte Seite)		
	Retention %	Retention-Ø %	Ladung kV
	min. - max.		
Rohware	86,12 - 90,93	88,53	-0,3 - -0,7
17		89,04	-1,9
18		85,87	0
19		86,67	+0,01
Ausrüstung	FFF 6342 (Gravurseite)		
	Retention %	Retention-Ø %	Ladung kV
	min. - max.		-0,3 - -0,7
Rohware	92,14 - 92,69	92,42	-1,9
17		94,94	0
18		81,85	+0,01
19		87,4	

Bei dem Filtermedium FFF 6342 handelt es sich um einen Oberflächenfilter, was an der im Vergleich zu den zuvor betrachteten Medien sehr viel geringeren Luftdurchlässigkeit sowie entsprechend höherem Druckabfall deutlich wird. Bei diesem Filtermedium konnte mit der permaSeal Ausrüstung 17 eine Steigerung der ohnehin schon hohen Retentionswerte der Rohware von 88,53 % (glatte Seite) bzw. 92,42 % (Gravurseite) auf 89,04 % (Glatte Seite) bzw. 94,94 % (Gravurseite) erreicht werden. Der Druckabfall verändert sich durch die Ausrüstung nur unwesentlich von 122 Pa auf 129 Pa. Die entsprechenden Luftdurchlässigkeiten der Rohware bzw. der Ware, die mit Rezeptur 17 ausgerüstet wurde, fiel dabei von 169 l/dm² min auf 147 l/dm² min ab. Im Anhang 5.4 sind die Retentionskurven der Rohware und die der Substrate mit allen Ausrüstungen zum Vergleich aufgeführt.

Luftdurchlässigkeiten von ausgerüsteten Substraten FFF 6342 und entsprechender Rohware

Tabelle 15 Luftdurchlässigkeit von ausgerüsteten Substraten FFF 6342 und entsprechender Rohware

Substrat FFF 6342	Ausrüstung	Luftdurchlässigkeit [l/dm ² min]	Druckabfall [Pa]	Luftdurchlässigkeit [l/dm ² min] Ø	Druckabfall [Pa] Ø
	Rohware		182	115,00	169
		156	129,00		
17		143	127,00	147	129
		151	131,00		
18		146	121,00	148	118
		149	115,00		
19		146	126,00	155	119
		164	111,00		

Vergleich Retention, Luftdurchlässigkeit und Druckabfall von ausgerüsteten Substraten FFF 6342 und entsprechender Rohware (glatte Seite)

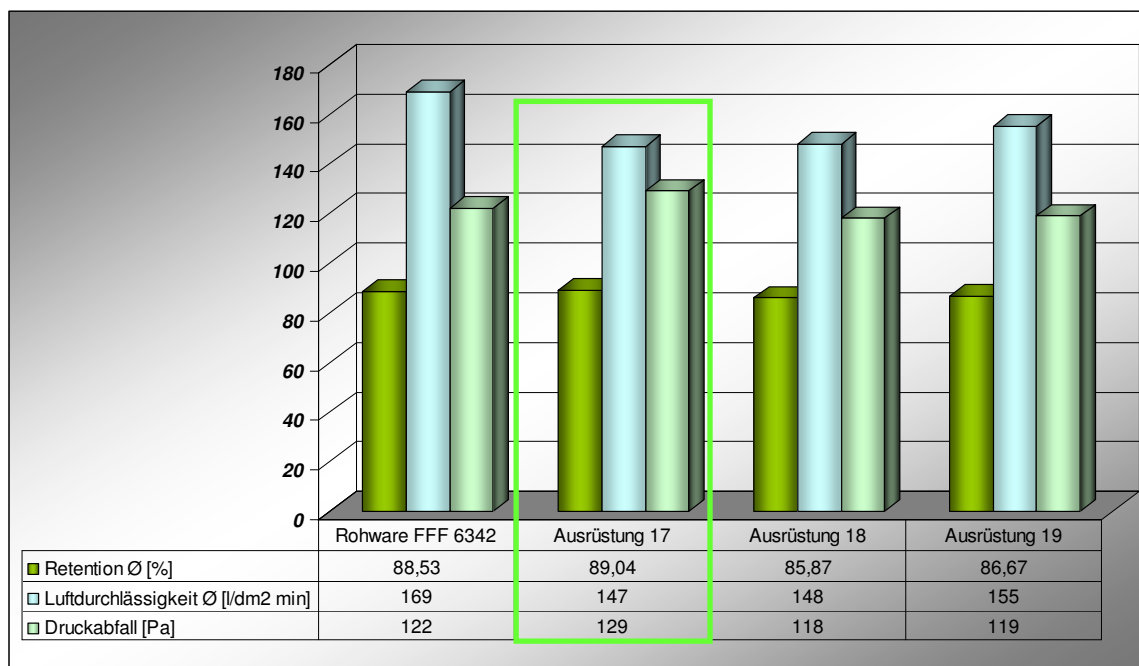


Abbildung 11 Vergleich Retention, Luftdurchlässigkeit und Druckabfall von FFF 6342 Rohware und ausgerüstet (glatte Seite)

Vergleich Filtereffizienz (Retention) von ausgerüsteten Substraten FFF 6342 und entsprechender Rohware (glatte Seite)

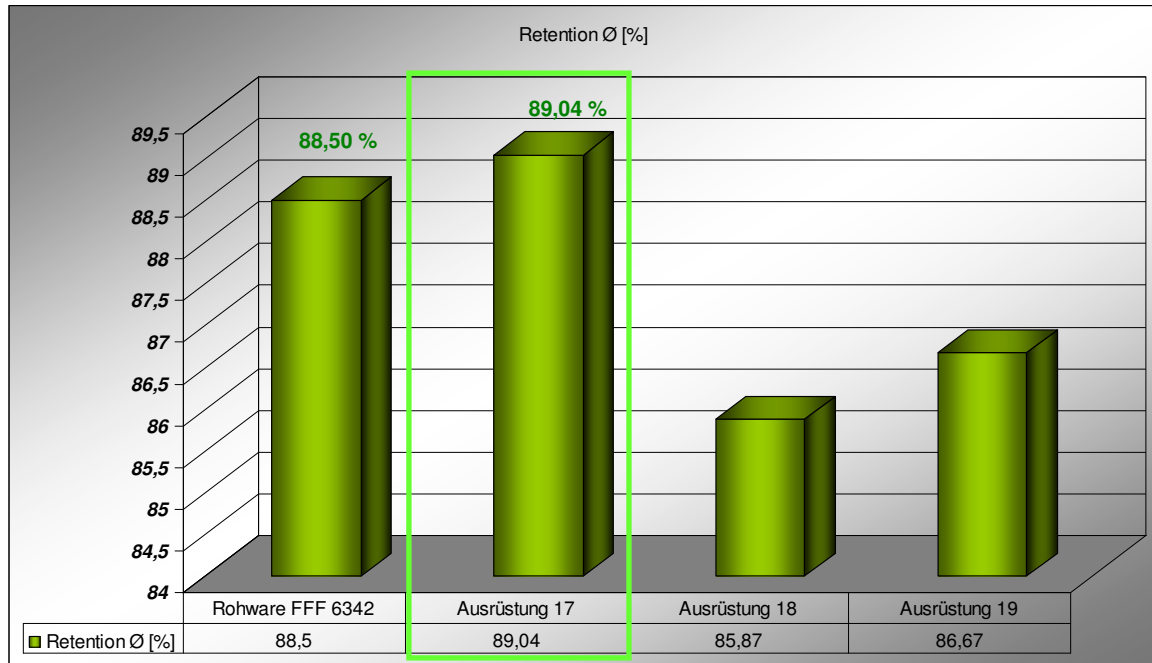


Abbildung 12 Vergleich Retention von FFF 6342 Rohware und ausgerüstet (glatte Seite)

Vergleich Retention, Luftdurchlässigkeit und Druckabfall von ausgerüsteten Substraten FFF 6342 und entsprechender Rohware (Gravurseite)

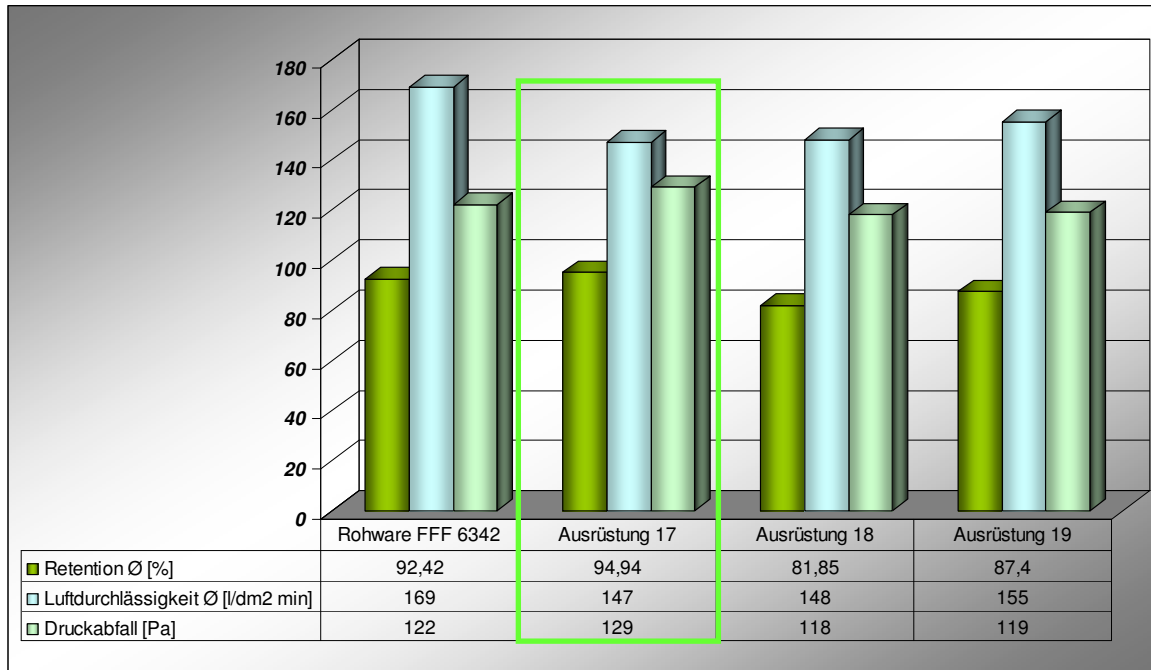


Abbildung 13 Vergleich Retention, Luftdurchlässigkeit und Druckabfall von FFF 6342 Rohware und ausgerüstet (Gravurseite)

Vergleich Filtereffizienz (Retention) von ausgerüsteten Substraten FFF 6342 und entsprechender Rohware (Gravurseite)

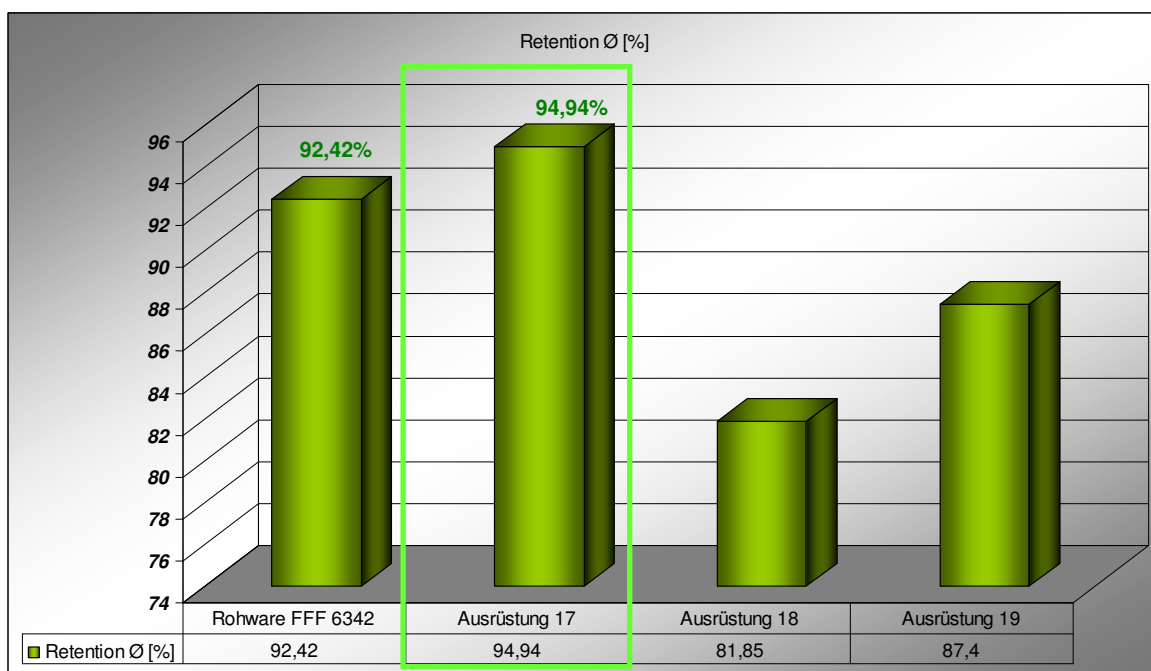


Abbildung 14 Vergleich Retention von FFF 6342 Rohware und ausgerüstet (Gravurseite)

2.6 Praxisversuch „Tunnelfilter“

Auf Basis der Ergebnisse aus den Laborversuchen wurden verschiedene ausgerüstete Filtermedien ausgewählt und in einem Praxisversuch über mehrere Monate für die Reinigung der Abluft aus Straßentunneln getestet.

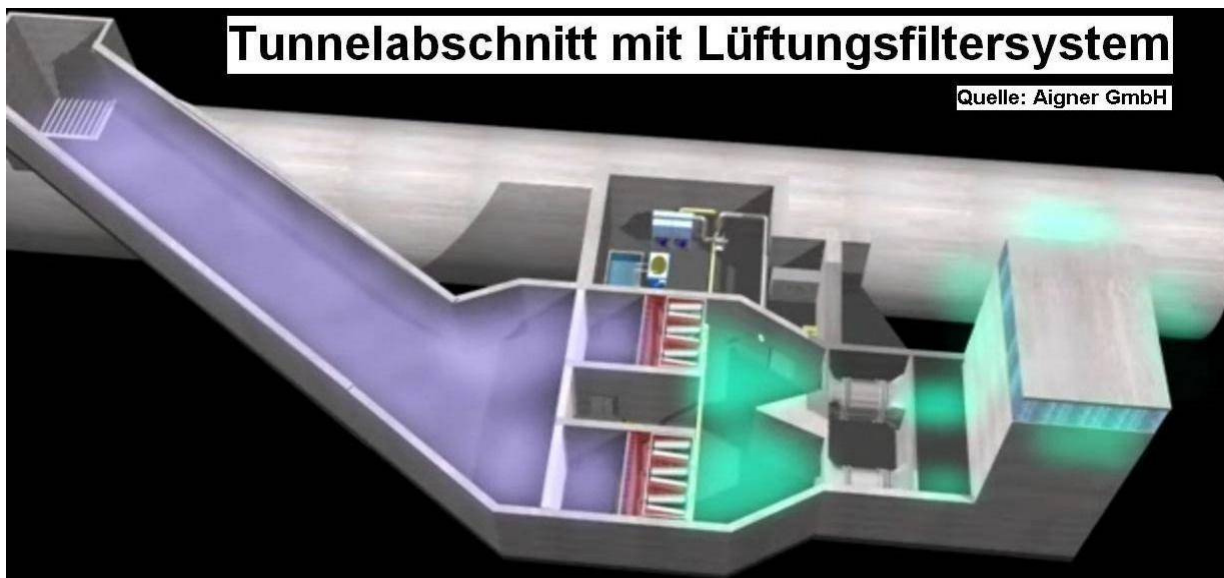


Abbildung 15 Tunnelabschnitt mit Lüftungsfiltersystem

Die Untersuchungen wurden an einer bestehenden Versuchsanlage im Plabutschunnel, Graz, Österreich, durchgeführt. Die Arbeiten seitens des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (IVT) der Technischen Universität Graz umfassten den Messaufbau, sowie die Durchführung von Messungen zur Ermittlung des Abscheideverhaltens bei unterschiedlichen Prozessparametern. Die Rohdaten dieser Messungen wurden dann der Firma Aigner Tunnel Technology GmbH, Gunskirchen, Österreich, zur Auswertung zur Verfügung gestellt.

2.6.1 Messaufbau und Messtechnik

Die Messungen wurden im sogenannten „Windhaus“ des Plabutschunnels, einem 10 km langen Umfahrungstunnel von Graz, durchgeführt. Das Windhaus Süd befindet sich genau über dem ca. 100 m hohen Südschacht des Tunnels und beherbergt die Seilwinde mit dem Fahrkorb zur Befahrung und Inspektion des Abluftschachtes. Von hier aus ist es möglich, Tunnelabluft direkt aus dem Abluftschacht zu entnehmen und der Versuchsanlage zuzuführen. Der Versuchsstand und die Messeinrichtungen sind somit an einem geschützten und sicheren Ort. Die Tunnelabluft gelangt über eine Rohrleitung mit 315 mm Durchmesser direkt aus dem Abluftschacht zu den Filtermatten (in Abb. 15 rot markiert). Die Regelung des Volumenstroms erfolgt mit Hilfe eines Ventilators und kann mittels Frequenzumformer stufenweise von 0 bis 4000 m³/h eingestellt werden.

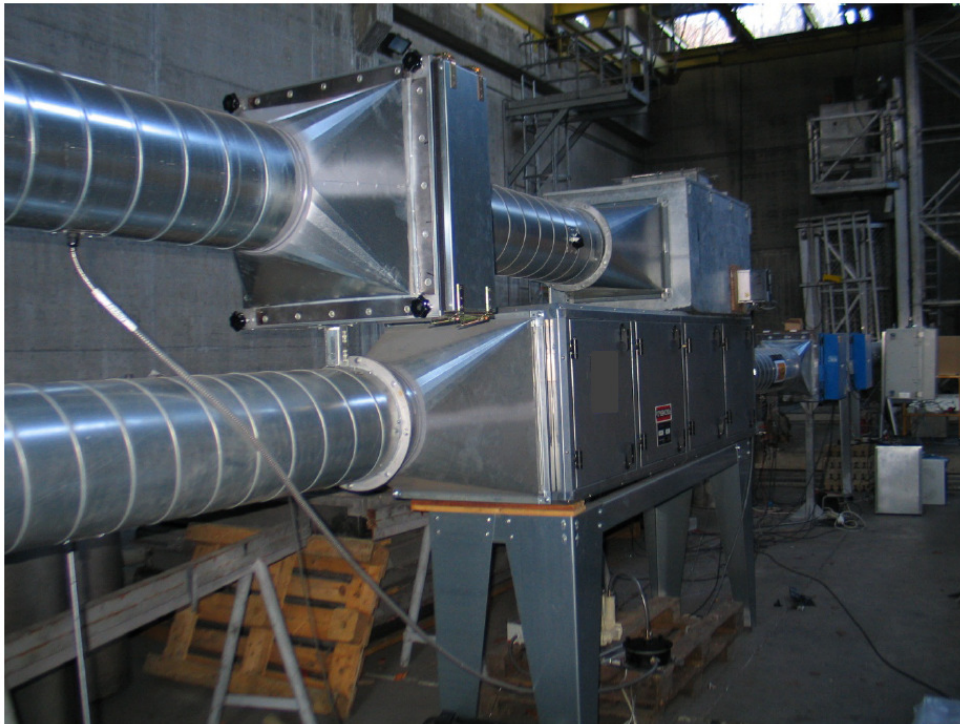


Abbildung 16 Versuchsanlage im Windhaus des Plabutschunnels

Bei den Versuchen wird die Staubmenge (Partikelmasse) vor und nach dem Filter erfasst und verglichen (MP2 (upstream) und MP3 (downstream)). Die Messung erfolgt kontinuierlich mit einem dafür geeigneten Messverfahren.

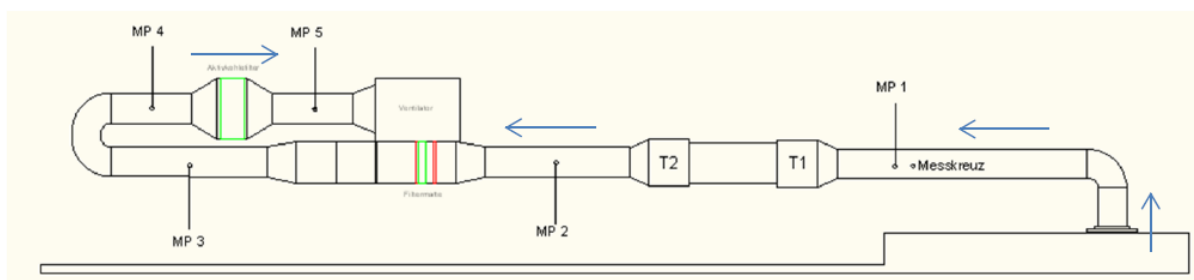


Abbildung 17 Prinzipsskizze der Versuchsanlage (blauer Pfeil = Luftweg)

Neben der Erfassung der Partikelmasse vor und nach dem Filter wurde bei den Versuchen zusätzlich die Partikelgrößenverteilung gemessen. Somit ist es möglich, die Massenströme auch für die einzelnen Größenklassen zu bestimmen. Ebenso erfolgte die Messung des jeweiligen Druckverlustes, der durch den Filter entsteht. Dieser wurde mit einem kontinuierlich messenden Differenzdruckmessgerät ermittelt.

2.6.2 Messergebnisse

In der nachstehenden Tabelle sind die Daten der Filtermattenversuche zusammengefasst.

Tabelle 16: Abscheideleistungen und Parameterdaten aller Filtermattenversuche

Type	Test-No	Datum Ende	Volume m³/h	Velocity m/s	$\Delta p_{\text{start}} - \Delta p_{\text{end}}$ Pa	Efficiency %							
						TSP	> 0,5 μm	> 1,0 μm	0,5-1,0 μm	1,0-10,0 μm	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM _{1,0}
V 4321-1 permastatic	1	16.05.2012	1 850	1.73	127-127	35	71	80	36	86	46.0	32.0	19.0
V 4321-1 permastatic	2	17.05.2012	1 050	0.98	67-62	41	62	74	27	78	48.0	38.0	27.0
V 4321-1 permastatic	3	18.05.2012	450	0.42	28-29	34	45	55	16	54	40.0	28.0	22.0
V 4321-1 permastatic	4	04.06.2012	400	0.37	23-20	12	33	37	26	38	18.0	10.0	8.0
V 4321-1 permaseal	5	19.05.2012	1 900	1.78	115-116	38	75	89	35	89	48.0	38.0	22.0
V 4321-1 permaseal	6	20.05.2012	1 200	1.12	65-69	25	58	73	15	73	35.0	22.0	13.0
V 4321-1 permaseal	7	21.05.2012	600	0.56	33-27	18	36	46	5	45	25.0	12.0	8.0
V 4321-1 permaseal	8	05.06.2012	270	0.25	19-21	20	28	32	17	30	25.0	16.0	16.0
6470-00 permastatic	9	22.05.2012	2 000	1.87	88-92	33	65	78	21	78	42.0	30.0	12.0
6470-00 permastatic	10	23.05.2012	1 260	1.18	47-51	21	49	60	13	60	28.0	15.0	8.0
6470-00 permastatic	11	24.05.2012	710	0.66	24-21	13	24	27	8	26	25.0	8.0	7.0
6470-00 permastatic	12	02.06.2012	400	0.37	13-13	8	8	8	8	8	12.0	7.0	8.0
6470-00 permaseal	13	25.05.2012	1 990	1.86	97-98	32	75	83	27	83	41.0	21.0	10.0
6470-00 permaseal	14	29.05.2012	1 230	1.15	57-55	36	59	65	12	65	47.0	20.0	11.0
6470-00 permaseal	15	31.05.2012	665	0.62	13-13	27	41	45	11	41	41.0	14.0	13.0
6470-00 permaseal	16	03.06.2012	390	0.36	14-16	1	8	10	7	7	5.0	0.0	0.0

Die bei den Tunnelversuchen unter Praxisbedingungen beobachteten Partikelgrößen (>0,5 μm – 10 μm) waren vergleichbar mit den beobachteten Partikelgrößen in den Laborversuchen (0,25 μm – 10 μm). Im Praxisversuch schnitt das Substrat FFF V 4321 mit permaStatic Ausrüstung 16 sowie mit permaSeal Ausrüstung 17 am besten ab, hatte allerdings im Vergleich zum Substrat FFF 6470 bei gleicher Ausrüstung auch einen etwas höheren Druckabfall. Betrachtet man die Fraktionsabscheidegrade, so sind diese bei hohem Luftvolumenstrom für Partikelgrößen im Bereich 1-10 μm bei allen ausgerüsteten Substraten mit 78-89% ähnlich hoch wie die in den Laborversuchen gemessenen Werte. Lediglich im Bereich 0,5-1 μm sind die Fraktionsabscheidegrade im Praxisversuch eher niedrig. Die Luftvolumenströme und Anströmgeschwindigkeiten waren bei den Tunnelversuchen wesentlich höher. Daher sind die Ergebnisse aus den Tunnelversuchen nicht direkt mit den Ergebnissen aus den Laborversuchen vergleichbar. Die Abscheidegrade für den Gesamtstaub (TSP) stiegen mit dem Volumenstrom deutlich an, blieben aber mit maximal 41% Gesamtstaub-Retention weit unter den in den Laborversuchen ermittelten Abscheidegraden der entsprechend ausgerüsteten Substrate von bis zu 90 %.

2.7 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung

2.7.1 Ökologische Bewertung

Die im Projekt verwendeten Filtersubstrate kommen überwiegend zum Einsatz für die Feinstaubfiltration in Raumluftechnischen Anlagen. Hierzu wurde eine Berechnung der Energieeinsparpotentiale für den Bereich der privaten Haushalte durchgeführt (vgl. Projektantrag), wie sie sich für Europa und Deutschland ergeben:

Bei einer idealen RLT-Anlage mit Wärmerückgewinnung werden ca. 50 % der Druckdifferenz und des damit verbundenen Energieverbrauchs durch den Filter selbst verursacht [SS08]. Bei RLT-Anlagen ohne Wärmerückgewinnung wird dieser Prozentsatz noch weitaus höher liegen. Für das

folgende Szenario gehen wir für eine möglichst konservative Berechnung trotzdem von diesen 50 % aus.

Die Ergebnisse aus den Laborversuchen zeigen, dass mindestens 60 % der Energie zur Überwindung der durch den Filter verursachten Druckdifferenz eingespart werden können, wie es die Energieeffizienzberechnung in Kapitel 1 ergab. Im weiteren Szenario gehen wir von diesem Wert aus.

Die im Projekt erprobten neuen Filterausrüstungen können voraussichtlich auf allen gängigen Filtermedien aufgebracht werden. In diesem Szenario rechnen wir damit, dass 10 % der RLT-Anlagen ohne Filter oder mit einem nicht ausrüstbaren Filter versehen sind (eigene Schätzung).

In 23 EU-Ländern¹ wurden 2005 insgesamt ca. 21 TWh Strom durch Belüftungsanlagen in Haushalten verbraucht, für 2010 wurden ca. 23 TWh geschätzt [AGM08]. Die in dieser Studie einbezogenen RLT-Anlagen beinhalten:

- CCVHR collective centralised ventilation with heat recovery - gemeinsame zentrale Belüftung mit Wärmerückgewinnung
- ICVHR individual centralised ventilation with heat recovery - individuelle zentrale Belüftung mit Wärmerückgewinnung
- DV&HR decentralised ventilation with heat recovery - dezentrale Belüftung mit Wärmerückgewinnung
- CCV collective centralised ventilation - gemeinsame zentrale Belüftung
- ICV individual centralised ventilation - individuelle zentrale Belüftung
- DV decentralised ventilation - dezentrale Belüftung
- Hoods Abzugshauben in Küchen und Nassräumen.

Hieraus ergibt sich folgendes Rechenszenario:

Energieverbrauch _{EU} 2005:	$E_{EU} = 21 \text{ TWh}$
Anteil (Quotient) des Energieverbrauchs, der durch die vom Filter verursachte Druckdifferenz hervorgerufen wird:	$Q_{EF} = 0,5$
Anteil der RLT-Anlagen mit ausrüstbarem Filter:	$Q_{RLT} = 0,9$
Energieeffizienz der zu entwickelnden permaStatic Technologie:	$Eff_{pS} = 0,6$
Energieersparnis durch den Einsatz der neuen Filterausrüstungen:	

Formel 1: Energieeinsparung Europa

$$E_{Eu,pS} = E_{EU} \times Q_{EF} \times Q_{RLT} \times Eff_{pS} = 21 \text{ TWh} \times 0,5 \times 0,9 \times 0,6 = 5,67 \text{ TWh}$$

Bei einer 100 %igen Marktdurchdringung könnten somit ca. **5,7 TWh/a** an elektrischer Energie im Bereich der untersuchten EU-Länder eingespart werden.

¹ Einbezogen in die Studie sind: Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Italien, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Österreich, Polen, Schweden, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Im gleichen Jahr (2005) betrug der Gesamtenergieverbrauch der Haushalte in den entsprechenden EU-Ländern ca. 3190 TWh [Eur10]. Somit sind ca. 0,7 % des Energieverbrauchs der Haushalte auf RLT-Anlagen zurückzuführen. Dieses Verhältnis kann aufgrund der hohen Technisierung und trotz der recht milden Klimabedingungen auch auf Deutschland übertragen werden, gerade auch, weil in Deutschland der Bau von Niedrigenergiehäusern in den letzten Jahren stark zugenommen hat. In nationalen und internationalen Studien und Verordnungen wird häufig darauf verwiesen, dass durch RLT-Anlagen mit Wärmerückgewinnung eine effizientere Raumbelüftung erfolgen kann [Ene09] [ARS10]. Dementsprechend soll vor allem in Neubauten der Einsatz dieser Anlagen stark forciert werden. Es ist daher anzunehmen, dass der Einsatz von RLT-Anlagen in Haushalten in Zukunft stark zunehmen wird [AGM08], auch wenn der allgemeine Energieverbrauch in deutschen Haushalten rückläufig ist [Age10a, Age10b]. Dadurch vergrößert sich das Energiesparpotenzial durch den Einsatz der permaStatic Ausrüstungen in den nächsten Jahren kontinuierlich.

139,4 TWh elektrische Energie wurde in deutschen Haushalten 2008 verbraucht [Age10b]. Dies entspricht nach der obigen Annahme einem Energieverbrauch der RLT-Anlagen von 0,976 TWh bzw. 976 GWh. Nach Formel 2 ergibt sich ein Energiesparpotenzial von:

Formel 2: Energieeinsparung Deutschland

$$E_{DE,PS} = E_{DE} \times Q_{EF} \times Q_{RLT} \times Eff_{pS} = 967 \text{ GWh} \times 0,5 \times 0,9 \times 0,6 = 263,5 \text{ GWh}$$

Das Energiesparpotenzial für Deutschland liegt demnach bei ca. **264 GWh/a** mit einer Aussicht auf eine kontinuierliche Zunahme.

Die berechneten Energieeinsparpotentiale haben direkte ökologische Relevanz für die strombedingten Emissionen. Zur Berechnung des Einsparpotentials an CO₂-Emissionen wurde der Emissionsfaktor für die Stromerzeugung einer Kilowattstunde (kWh) Strom aus dem Primärenergiemix in Deutschland für das Jahr 2010 von 0,546 kg CO₂ pro kWh zugrunde gelegt [Uba12]. Danach ergibt sich europaweit ein Einsparpotential von 3,1 Mio. to. CO₂, für Deutschland ein Einsparpotential von 143871 to. CO₂.

Die Energieeinsparpotentiale für Europa und Deutschland lassen sich bezogen auf den durchschnittlichen Strompreis direkt umrechnen auf die Kosteneinsparpotentiale beim Stromverbrauch. Bei einem durchschnittlichen Preis für Haushaltsstrom in der Eurozone im Jahr 2010 von 19,34 ct pro kWh [Eur10] ergibt sich eine Kostenersparnis von 1,1 Mrd. Euro. Bei einem durchschnittlichen Preis für Haushaltsstrom in Deutschland im Jahr 2010 von 23,69 ct pro kWh [BDE13] ergibt sich eine Kostenersparnis von 62,4 Mio. Euro.

Die Ergebnisse der im Kapitel 2 gezeigten Laborversuche bestätigen die gemachten Annahmen. Wie oben in Kapitel 2.7.1 erläutert, sind die im Modell berechneten relativen Energieeinsparpotentiale mit den getesteten Ausrüstungen erreichbar.

2.7.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden von jedem der vier verschiedenen in den Laborversuchen getesteten Substrate die mit den jeweils effizientesten Ausrüstungen herangezogen:

Tabelle 17: Effizienteste Ausrüstungen auf verschiedenen Substraten

Substrat	Ausrüstung	Retention -Ø %	Druckabfall [Pa] Ø
Stand der Technik	-	97,00	122
FFF V 4321-1	16	89,82	24
FFF 6406	5	87,14	10,5
FFF 6406	16	83,31	11
FFF 6470	11	90,72	18,5
FFF 6470	12	90,36	18
FFF 6470	16	89,72	18,5
FFF 6342 (glatte Seite)	17	89,04	129
FFF 6342 (Gravurseite)	17	94,94	129

Die ausgerüsteten Substrate werden mit dem unbehandelten Filter nach Stand der Technik verglichen, wie er für die Energieeffizienzbetrachtung in Kapitel 1 zugrunde gelegt wird. Im Kapitel 1 erfolgt die Energieeffizienzbetrachtung durch den Vergleich des Druckabfalls von 122 Pa beim Betrieb des Filters nach Stand der Technik und dem Druckabfall eines ausgerüsteten Filters bei sonst gleichem Abscheidegrad (97%) und gleichem Volumenstrom ($7,2 \text{ m}^3/\text{h}$) in einer Zeit von 60 s. In der dafür zugrunde gelegten Modellrechnung ist der relative Energieverbrauch direkt proportional zum gemessenen Druckverlust. Zwar sind die Abscheidegrade der in Tabelle 16 aufgeführten ausgerüsteten Substrate etwas niedriger als der Abscheidegrad des in Kapitel 1 genannten Filters nach Stand der Technik, für eine qualitative Betrachtung können sie jedoch als gleich angesehen werden. Danach ergeben sich folgende relative Energieeinsparungen:

Tabelle 18: Energieersparnis durch Ausrüstung

Substrat	Ausrüstung	rel. Energieeinsparung
FFF V 4321-1	16	80 %
FFF 6406	5	91 %
FFF 6406	16	91 %
FFF 6470	11	85 %
FFF 6470	12	85 %
FFF 6470	16	85 %
FFF 6342 (glatte Seite)	17	- 6%
FFF 6342 (Gravurseite)	17	- 6%

Die nach dem Modell berechneten relativen Energieeinsparungen zwischen 85% und 91% fallen im Vergleich zum Ergebnis der Modellrechnung in Kapitel 1 (61 %) noch höher aus, was im wesentlichen aber durch die oben beschriebene Näherung bezüglich des Abscheidegrades begünstigt ist. Um einen Abscheidegrad wie beim Filter nach Stand der Technik aus Kapitel 1 von ebenfalls 97% erreichen zu können, müssten die ausgerüsteten Substrate dichter aufgebaut sein, was den Druckverlust erhöhen würde. Dennoch lässt sich festhalten, dass die relativen Energieeinsparungen der im Projekt getesteten Substrate mit den jeweils effizientesten Ausrüstungen in der Größenordnung liegen, wie sie in Kapitel 1 mit dem Modell berechnet wurde. Lediglich für das Substrat FFF 6342 ergibt sich mit der effizientesten Ausrüstung 17 ein Energiemehrverbrauch von 6%. Dieses Substrat kann allerdings auch nicht direkt mit dem unbehandelten Filter nach Stand der Technik verglichen werden, da es sich beim Substrat FFF 6342 um einen Oberflächenfilter handelt, während der Filter nach Stand der Technik in Kapitel 1 wie auch die anderen drei getesteten Substrate Tiefenfilter sind.

Die mit den Ausrüstungen erzielbaren Energieeinsparungen und damit resultierenden kontinuierlichen Kostenvorteile beim Betrieb der Filter müssen den Kosten entgegengestellt werden, die einmalig durch die Ausrüstung der Filter bei der Herstellung entstehen. Aufgrund gesetzlicher Anforderungen z. B. an Brandschutz und Entflammbarkeit der Filtermedien werden die meisten Filter bereits nasschemisch mit entsprechenden Wirkstoffen ausgestattet. Die in diesem Projekt verwendeten Ausrüstungen permaSeal und permaStatic können dabei im selben Prozessschritt auf das Filtermedium aufgebracht werden. Mehrkosten bei der Ausrüstung ergeben sich deshalb direkt nur durch die Kosten für die zusätzlichen Wirkstoffe und liegen für den Betreiber der Filteranlage maximal im niedrigen einstelligen Euro-Bereich pro m² Filtermedium. Diese zusätzlichen Einmalkosten bei der Herstellung der Filter amortisieren sich schon nach kurzer Zeit beim Betrieb der Filter. Neben dem Anlagenbetreiber, der direkt von der Energieeinsparung profitiert, können entlang der Wertschöpfungskette sowohl die Hersteller der Ausrüstungen selbst sowie die Hersteller der ausgerüsteten und konfektionierten Filtermedien profitieren, indem sie die beim Betrieb entstehenden Kostenvorteile anteilig auf ihren Produktpreis aufrechnen.

2.7.3 Technologische Verfahren und Weiterentwicklung

Viele Ausrüstungen für Technische Textilien und Filter werden ausschließlich an der Oberfläche des Mediums appliziert. Solche Ausrüstungen wie z.B. Fluorcarbonharze, PTFE-Emulsionen oder PTFE-Membranen, haben meist das Ziel, entweder die Abreinigbarkeit des Filters zu verbessern und/oder die Abscheideleistung zu erhöhen. Beim derzeitigen Stand der Technik verursachen solche Ausrüstungen allerdings einen erhöhten Druckabfall und damit einen deutlich steigenden Energiebedarf beim Betrieb. Durch den in diesem Projekt verwendeten Ansatz einer nasschemischen, ultradünnen, konturgetreuen Ausrüstung, bestehend aus einer polymeren Bindermatrix, in der wiederum nanoskalige funktionelle (nicht)magnetische bzw. dielektrische Partikel eingebettet sind, erhalten Tiefenfiltermedien die gewünschten Eigenschaften, wie

beispielsweise einen besseren Staubabscheidegrad. Die so veredelten Filtermedien behalten dabei aufgrund einer sehr niedrigen Trockenaufgabe ihre ursprünglichen Materialeigenschaften hinsichtlich Elastizität, Flexibilität und Luftdurchlässigkeit im Betrieb, weisen dabei aber gleichzeitig die gewünschte zusätzliche Eigenschaft einer verbesserten Staubabscheidung auf.

In den letzten beiden Jahrzehnten wurde es möglich, mit kolloid-chemischen Methoden nanoskalige Partikel größenkontrolliert aus Lösung zu synthetisieren. Hat man nun beispielsweise eine bestehende polymere Gelmatrix, so ist aufgrund ihrer sehr großen Oberfläche eine Einlagerung zusätzlicher organischer und anorganischer Komponenten möglich. Dabei werden im Rahmen dieses Projektes (nicht)magnetische bzw. dielektrische Komponenten in die Matrix eingebaut und dort fest verankert. Durch solche Matrixsysteme, die als Binder für nanopartikuläre Systeme wirken, werden trotz vollständiger Einbettung der funktionellen Partikel die gewünschten erhöhten Staubabscheidungseigenschaften der damit ausgerüsteten Filtermedien erzielt. Die entsprechenden Ausrüstungen weisen eine hohe Permanenz auf. Auf vorbehandelnde Prozessschritte kann weitestgehend verzichtet werden. Darüber hinaus wird durch die Verwendung einer derartigen Bindermatrix die unerwünschte Freisetzung der nanopartikulären, funktionellen Komponenten in die Umgebung verhindert.

Bei den dielektrischen Komponenten, die im Rahmen dieses Projektes Verwendung fanden, handelt es sich handelsübliche wässrige Dispersionen von Al_2O_3 mit einem Feststoffgehalt von 30 %, und niedrigviskose wässrige Dispersionen von SiO_2 mit einem Feststoffgehalt von 15 % (sauer eingestellt) bzw. 22 % (alkalisch eingestellt).

In den verwendeten (nicht)magnetischen wässrigen bzw. alkoholischen Eisenoxiddispersionen liegt die durchschnittliche Partikelgröße bei 20 nm, 30 nm bzw. 35 nm. Die Herstellung der Eisenoxidpartikel erfolgte nasschemisch aus Lösungen von Eisensalzen in geeigneter Umgebung (pH-Wert, Konzentration, Lösungsmittel) durch gezielte Fällung mit basischen Agenzien und anschließende Oberflächenmodifizierung. Abhängig von den gewählten Umgebungsbedingungen und von der Konzentration entstanden dabei partikuläre Systeme mit einer ausreichenden Stabilität und niedrigdispersen Verteilung hinsichtlich der Partikelgröße (vgl. Fre12).

3. Fazit

In den Laborversuchen wurden aus einer Vielzahl möglicher Feinstaubfilter-Substrate insgesamt drei verschiedene Tiefenfilter-Substrate ausgewählt, die mit verschiedenen funktionellen nasschemischen wasserbasierten Ausrüstungen gemäß dem Projektziel jeweils eine stark verbesserte Filtereffizienz bei gleichzeitig nahezu unverändertem Druckabfall im Vergleich zum nicht ausgerüsteten Substrat zeigten. Die Abscheidegrade der nicht ausgerüsteten Substrate von ca. 50 bis 70 % konnten mit verschiedenen funktionellen Ausrüstungen auf 80 bis 90 % gesteigert werden. Von insgesamt 19 ausführlich getesteten verschiedenen Ausrüstungen zeigten vier Ausrüstungen besonders deutliche Verbesserungen. Die besonders positiv getesteten Ausrüstungen enthielten neben einer Hydrophobierungskomponente auch (nicht)magnetische bzw. dielektrische anorganische Partikel. Eine Ausrüstung mit einer Kombination aus einer hydrophobierenden Polymerdispersion und dielektrischen siliziumoxidbasierten Partikeln (Ausrüstung Nr. 16) zeigte als einzige Ausrüstung auf allen drei Substraten die besten Ergebnisse. Für ein ebenfalls im Rahmen dieses Projekts untersuchtes Oberflächenfilter-Substrat konnte dagegen mit den Ausrüstungen nur eine vergleichsweise geringe Steigerung des Abscheidegrads von 88 bzw. 90 % auf 92 bzw. 94 % erreicht werden. Wie eine Modellrechnung im Vergleich zum Stand der Technik zeigt, lassen sich mit den hier ausgerüsteten Tiefenfilter-Substraten Energieeinsparungen im zweistelligen Prozentbereich erzielen.

Im Rahmen eines Praxistests wurden zwei Substrate mit den in den Laborversuchen besonders effizienten Substrat-Ausrüstungs-Kombinationen in der Lüftungsanlage eines Straßentunnels bei laufendem Betrieb getestet. Die teilweise unterschiedlichen Prozessbedingungen lassen keinen direkten Vergleich mit den Ergebnissen aus den Laborversuchen zu. Die Werte für Gesamtstaub-Retentionen lagen im Praxistest deutlich unter den Werten, die mit den gleichen Substraten und entsprechenden Ausrüstungen in den Laborversuchen erzielt wurden.

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Laborversuche und Praxistests lassen noch keine verlässlichen Aussagen über die Verbesserungen bezüglich der Standzeit der ausgerüsteten Filtermedien zu. Hierzu sind weitere standardisierte Praxistests erforderlich, die vergleichende Aussagen zu Abscheidegrad und Druckabfall über einen längeren Prüfzeitraum möglich machen.

Die in diesem Projekt verwendeten Tiefenfilter-Substrate werden bereits heute kommerziell hergestellt und für die Feinstaubfiltration eingesetzt. Die Rohstoffe für die dazu entwickelten Ausrüstungen bestehen aus kommerziell erhältlichen Einzelkomponenten. Zudem sind für jedes der getesteten Substrate mehrere verschiedene Ausrüstungen geeignet. Damit wird eine praktische Anwendung der Erkenntnisse aus diesem Projekt stark begünstigt.

4. Literaturverzeichnis

- [Age10a]** AG Energiebilanzen e. V.: *Energieflussbild 2008 Deutschland*. Berlin, Köln - Stand 2010 (<http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=64>).
- [Age10b]** AG Energiebilanzen e. V.: *Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2009*. Berlin, Köln - Stand Juli 2010 (<http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=139>).
- [AGM08]** ADNOT, J., GRIGNON-MASSE, L., MARCHIO, D., et al.: *ECODESIGN Lot 10 Draft study on ventilation, Preparatory study on the environmental performance of residential room conditioning appliances (airco and ventilation) - Study on residential ventilation*. Final report after SH comments, November 2008.
- [ARS10]** ADNOT, J., RIVIERE, P., SPADARO, J., et al.: *Sustainable Industrial Policy – Building on the Ecodesign Directive – Energy-Using Product Group Analysis/2; Lot 6. Air-conditioning and ventilation systems*, Draft report of Task 1, Juni 2010.
- [Bau87]** BAUMGARTNER, H.-P.: VDI Fortschritt-Berichte Nr. 146. VDI-Verlag GmbH, 1987.
- [BDE13]** Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., *BDEW-Strompreisanalyse Mai 2013, Haushalte und Industrie*. Berlin, 2013.
- [Bec06]** BECKER, M.: *Neue ultradünne Polymerfasern und Kompositfasern durch Elektrospinnen und Coelektrospinnen von Polymerlösungen und Polymerschmelzen aus Einzel- und Mehrdüsenanordnungen*. Dissertation, Universität Marburg, 2006.
- [Ber90]** BERGMANN, L.: *Elektret-Vliesstoffe - ein schnell wachsender Markt bei Filtermedien*. Chemiefasern/Textilindustrie, 40/92, Seiten T123-127, Juli/August 1990.
- [BK10]** BENDJABALLAH, S., KLAUSNITZER, S.: „*Elektretausrüstung*“. EP 2 059 343 B1, Europäische Patentschrift, erteilt am 09.06.2010, Patentblatt 2010/23.
- [DGM93a]** DAHRINGER, J., GROH, W., MACHOLDT, H.-T., *Elektretfasern mit verbesserter Ladungsstabilität, Verfahren zu ihrer Herstellung, und Textilmaterial enthaltend diese Elektrasern*. DE 43 21 289 A1, Patentanmeldung Hoechst AG, 09.03.1993, Offenlegungsschrift 01.12.1994.
- [DGM93b]** DAHRINGER, J., GROH, W., MACHOLDT, H.-T., *Elektretfasern mit verbesserter Ladungsstabilität, Verfahren zu ihrer Herstellung, und Textilmaterial enthaltend diese Elektrasern*. DE 43 21 289 A1, Patentanmeldung Hoechst AG, 26.06.1993, Offenlegungsschrift 05.01.1995.
- [Dro00]** DROUIN, B.: *Triboelectric Blend Enhances Air Filtration*. Filtration & Separation. Seiten 20-23, Band 37, Ausgabe 9, 2000.
- [Ene09]** EnEV 2009 - *Energieeinsparverordnung für Gebäude Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden*. Seiten 954 – 989, Bundesgesetzblatt Teil I, Nr. 23, 2009, Bundesanzeiger Verlag, 2009.

- [Ern05]** ERNST, M.: *Innovative Filtermedien mit Elektretbeschichtung: experimentelle Untersuchungen zum Ladungszustand und zur Partikelabscheidung*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2005.
- [Eur10]** Eurostat: *Europe in figures - Eurostat yearbook 2010: Environment and energy (tables and graphs)*. 2010. (http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/product_details/publication?p_product_code=CH_11_2010_XLS).
- [Fre12]** FREUND, B.: *Synthese und in vivo Charakterisierung von ⁵⁹Fe-markierten, monodispersen, superparamagnetischen Eisenoxid-Nanopartikeln*. Dissertation, Universität Hamburg, 2012.
- [GG03]** GRAFE, T. H., GRAHAM, K. M.: *Nanofiber webs from electrospinning*. Proceedings of the 5th International Conference on Nonwovens in Filtration, Seiten 1-5, Stuttgart, 2003.
- [Hoe95]** Hoechst AG, *Vliese aus Elektretfasermischungen mit verbesserter Ladungsstabilität*. Gebrauchsmuster, G 94 14 040.5, Patentblatt 02.03.1995.
- [JLR04]** JONES, E., LYONS, S., REDMOND, B., et al., *Fluoriertes Elektret*. DE 699 20 227 T2, Patent, Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim Europäischen Patentamt 15.09.2004.
- [LF89]** LATRACHE R., FISSAN, H.: *Grundlegende Untersuchungen zum Abscheideverhalten der Elektret-Filter. I: Bestimmung der Abscheidegrade und Grundlegende Untersuchungen zum Abscheideverhalten der Elektret-Filter. II: Bewertung der Filtrationseigenschaften*. Seiten 309-314 und 365-370, Staub-Reinhaltung der Luft 49, Springer Verlag, Berlin 1989.
- [SS08]** SCHLOSSER, T., SCHMIDT, M.: *Energetische Bewertung von raumluftechnischen Anlagen*. Seiten 20-24, Kälte Luft Klimatechnik, Hüthing GmbH, Heidelberg, 2008.
- [Uba12]** Umweltbundesamt: *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2012*. ISSN 1862-4359, 2013.

5. Anhang

5.1 Retentionskurven von FFF V 4321-1

Rohware

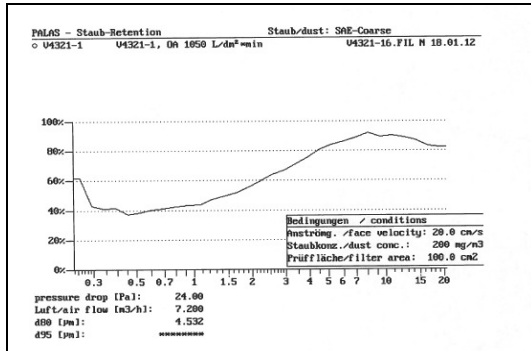


Abbildung 18 Retentionskurve von FFF V 4321-1 Rohware

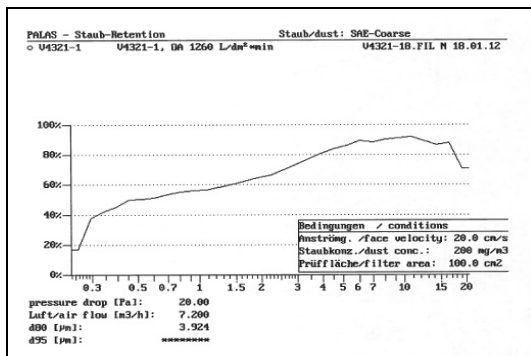


Abbildung 19 Retentionskurve von FFF V 4321-1 Rohware

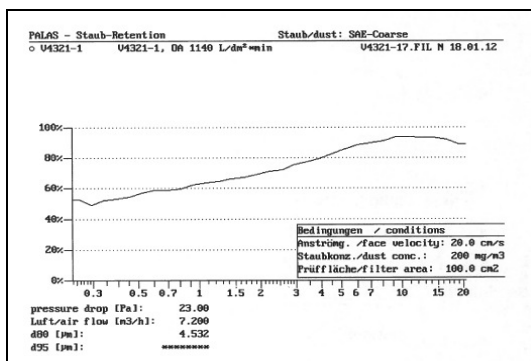


Abbildung 20 Retentionskurve von FFF V 4321-1 Rohware

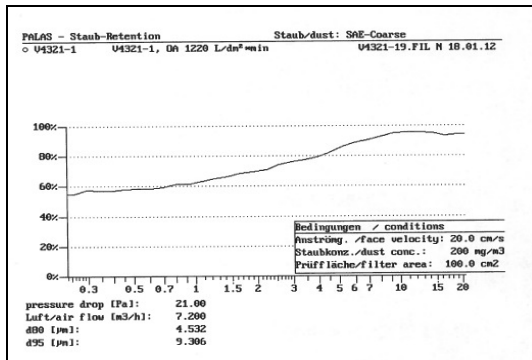


Abbildung 21 Retentionskurve von FFF V 4321-1 Rohware

Ausrüstung 5

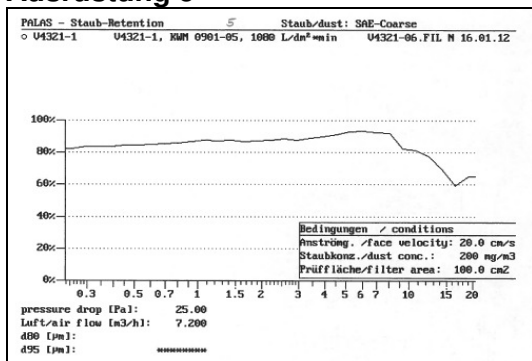


Abbildung 22 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 5

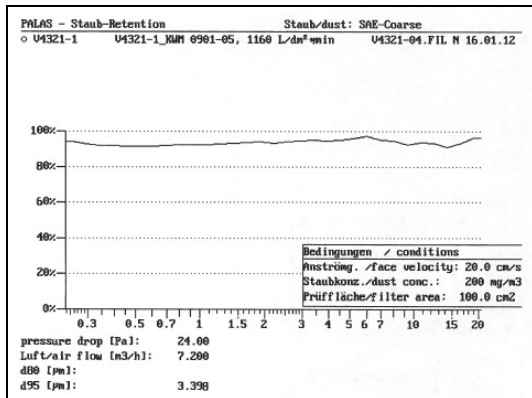


Abbildung 23 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 5

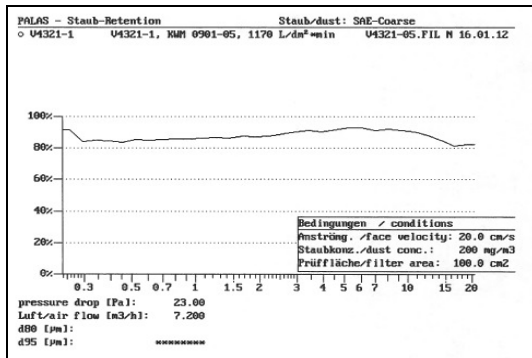


Abbildung 24 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 5

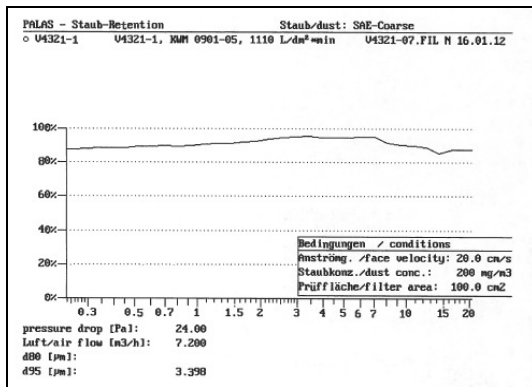


Abbildung 25 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 5

Ausrüstung 11

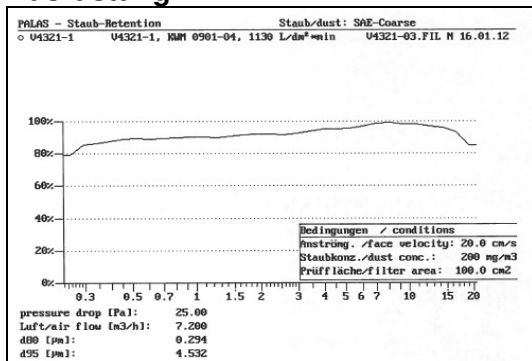


Abbildung 26 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 11

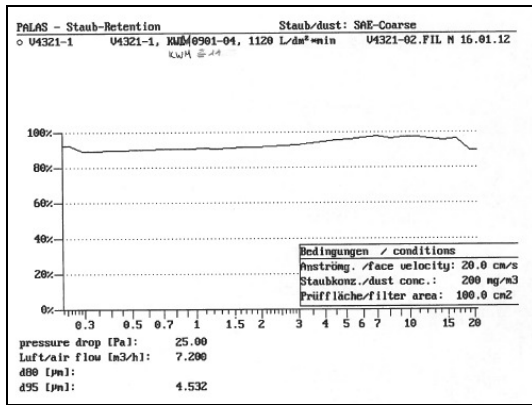


Abbildung 27 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 11

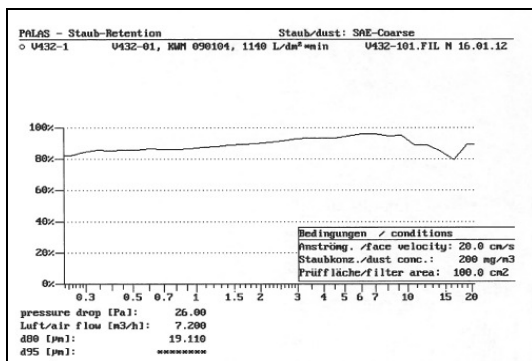


Abbildung 28 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 11

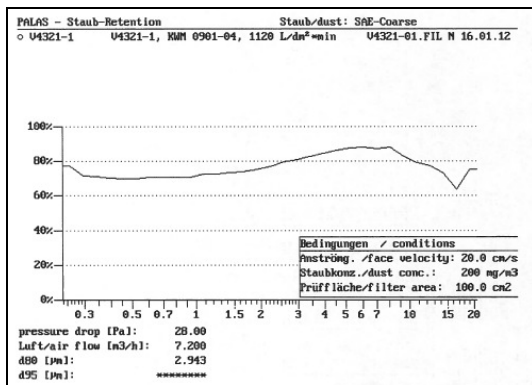


Abbildung 29 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 11

Ausrüstung 16

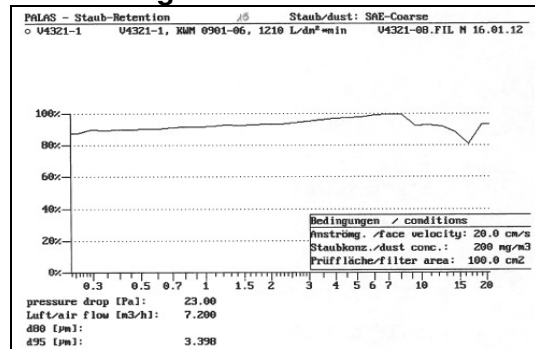


Abbildung 30 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 16

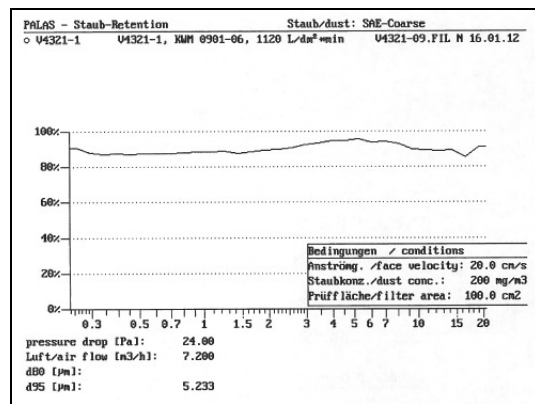


Abbildung 31 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 16

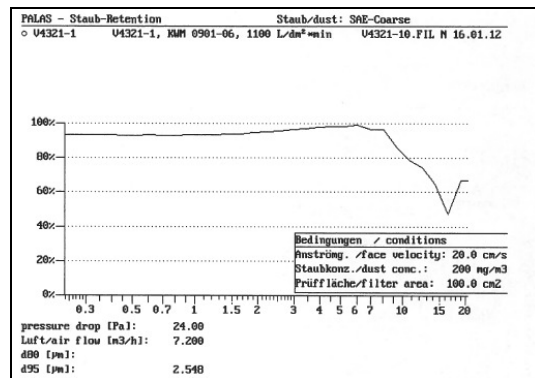


Abbildung 32 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 16

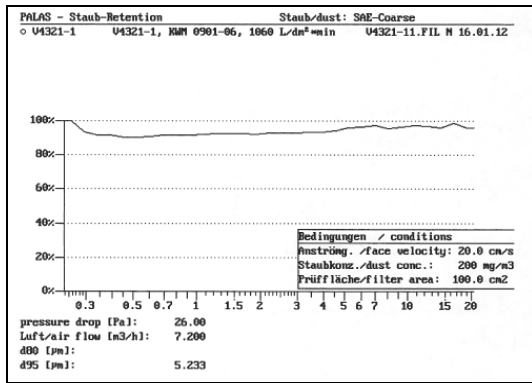


Abbildung 33 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 16

Ausrüstung 17

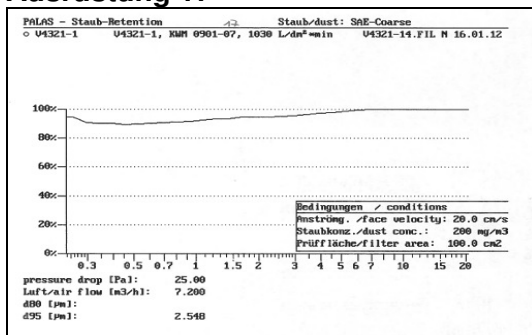


Abbildung 34 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 17

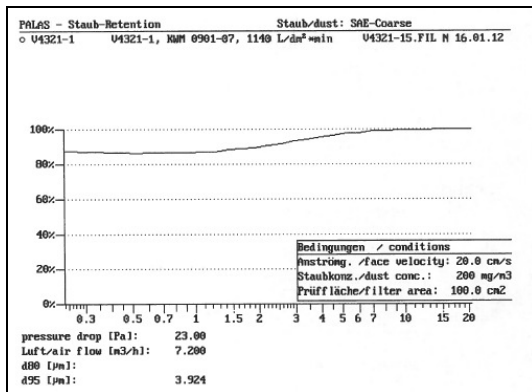


Abbildung 35 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 17

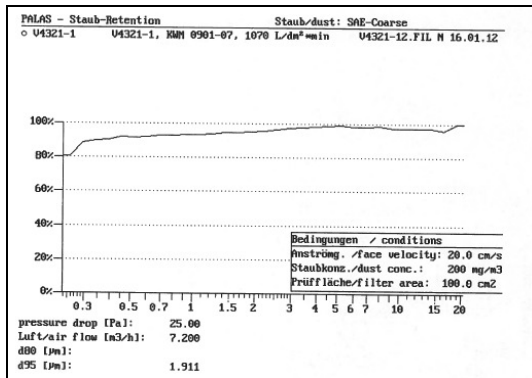


Abbildung 36 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 17

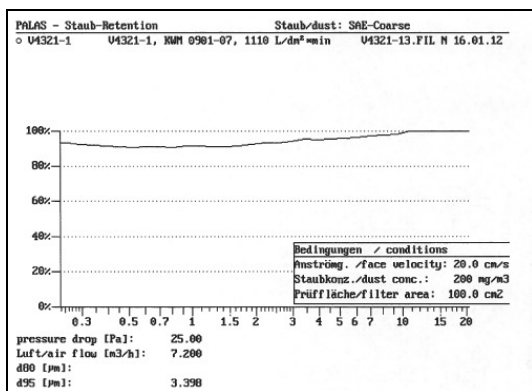


Abbildung 37 Retentionskurve von FFF V4321-1 mit Ausrüstung 17

5.2 Retentionskurven von FFF 6406

Rohware

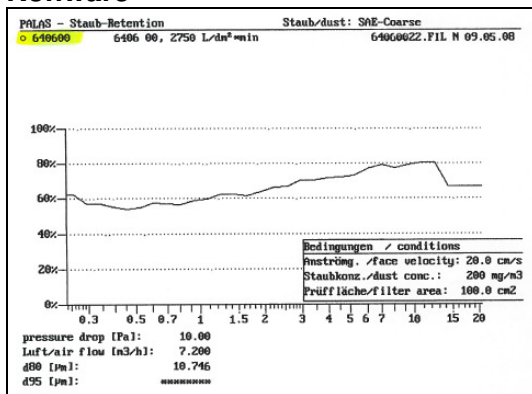


Abbildung 38 Retentionskurve von FFF 6406 Rohware

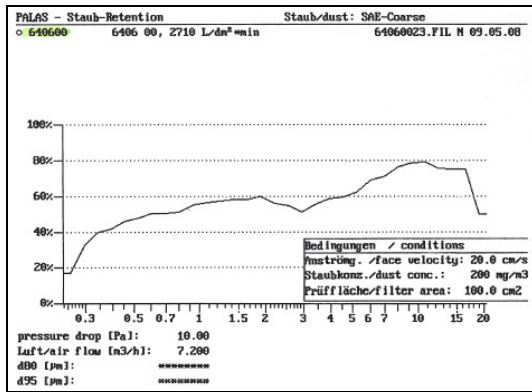


Abbildung 39 Retentionskurve von FFF 6406 Rohware

Ausrüstung 3

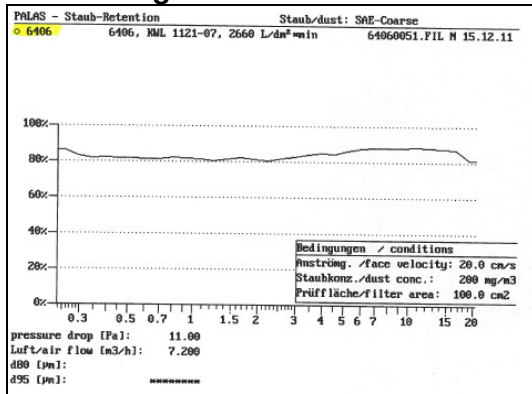


Abbildung 40 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 3

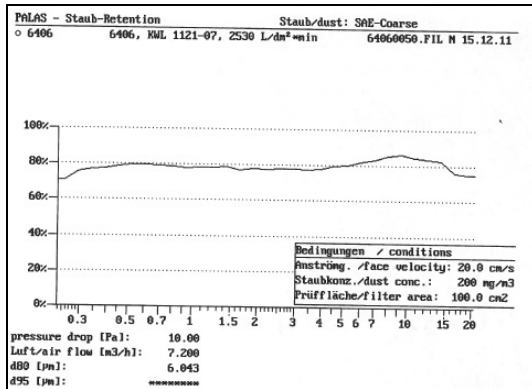


Abbildung 41 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 3

Ausrüstung 5

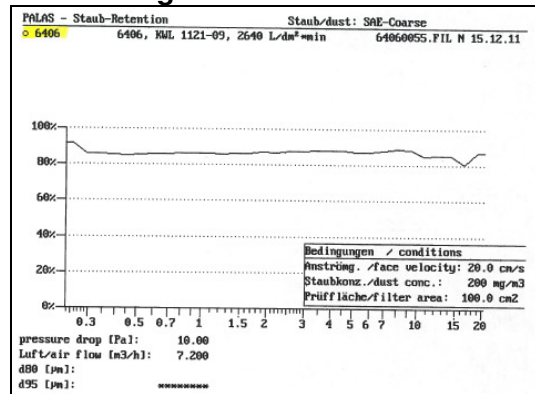


Abbildung 42 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 5

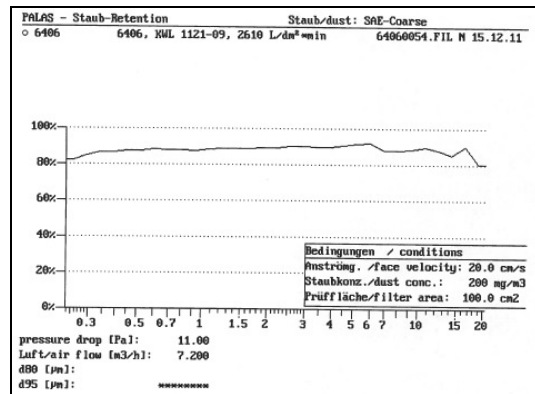


Abbildung 43 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 5

Ausrüstung 6

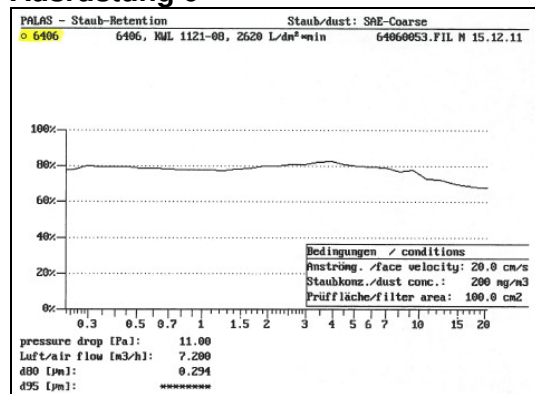


Abbildung 44 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 6

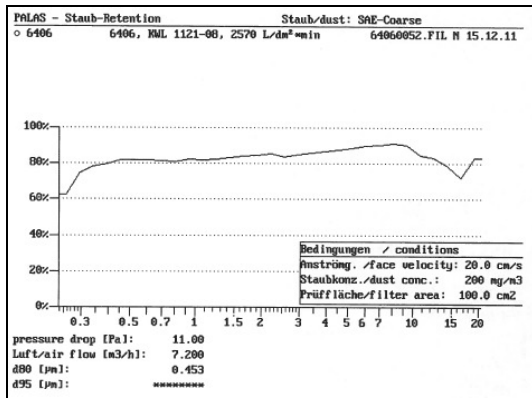


Abbildung 45 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 6

Ausrüstung 11

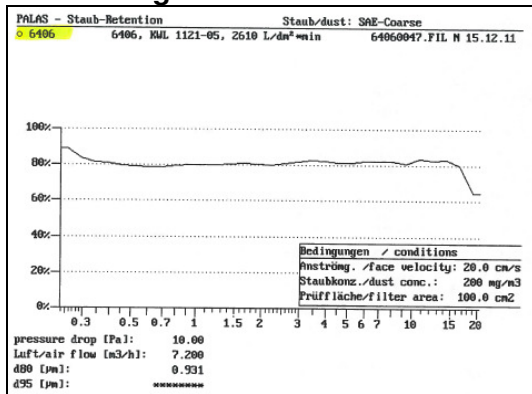


Abbildung 46 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 11

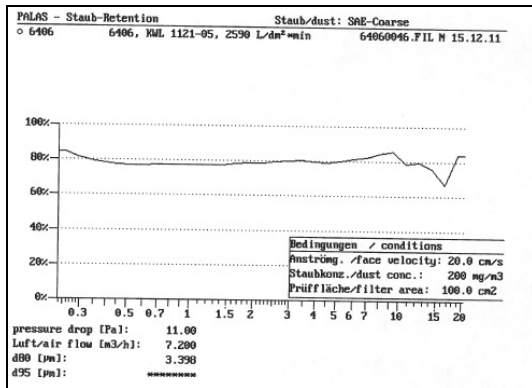


Abbildung 47 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 11

Ausrüstung 12

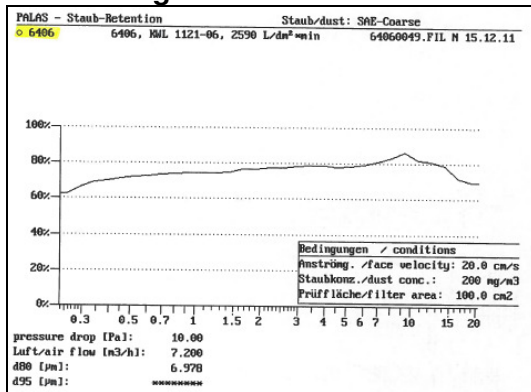


Abbildung 48 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 12

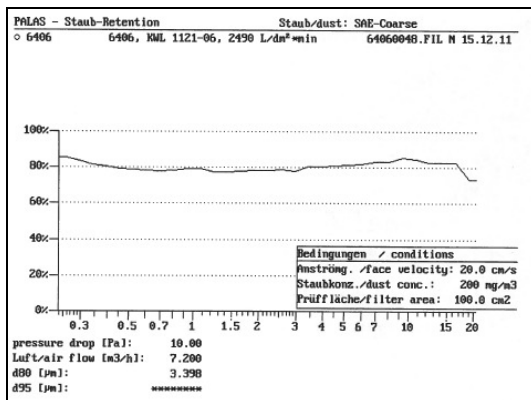


Abbildung 49 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 12

Ausrüstung 16

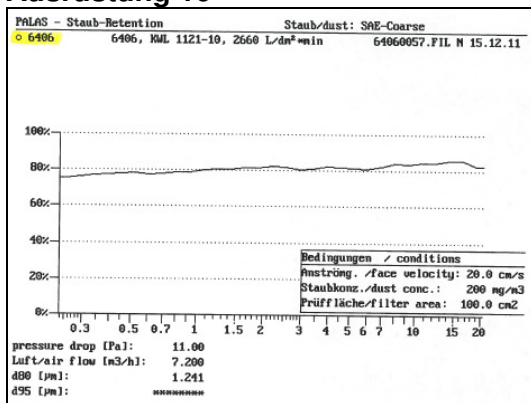


Abbildung 50 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 16

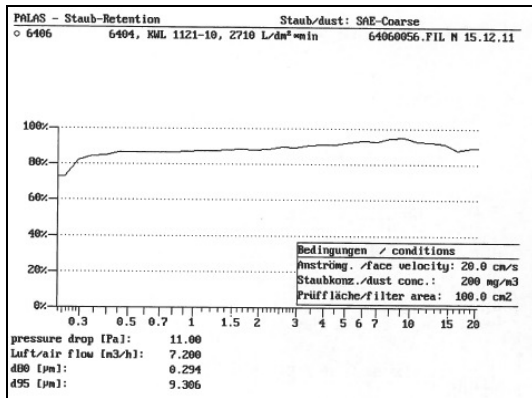


Abbildung 51 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 16

Ausrüstung 17

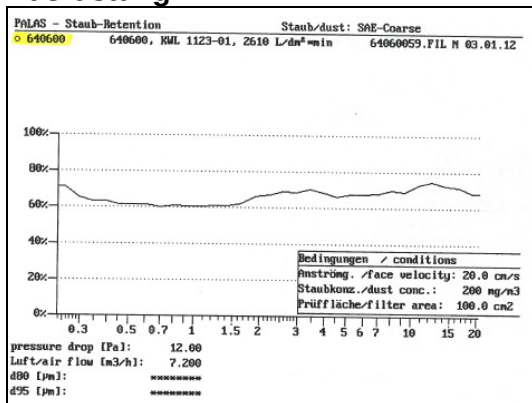


Abbildung 52 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 17

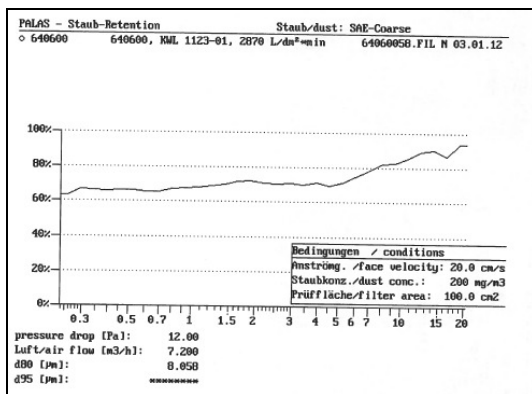


Abbildung 53 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 17

Ausrüstung 18

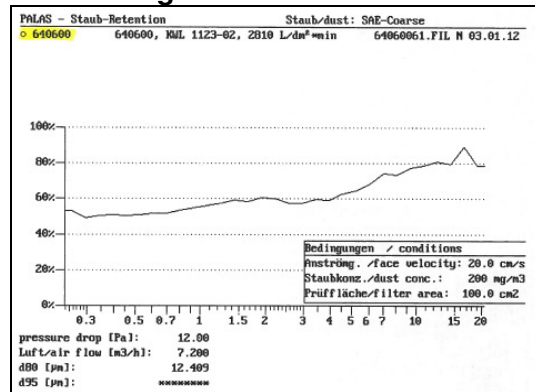


Abbildung 54 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 18

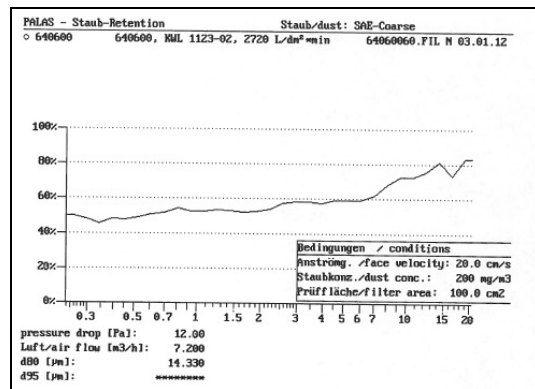


Abbildung 55 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 18

Ausrüstung 19

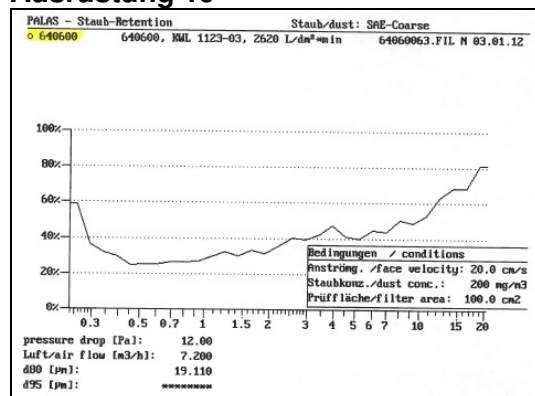


Abbildung 56 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 19

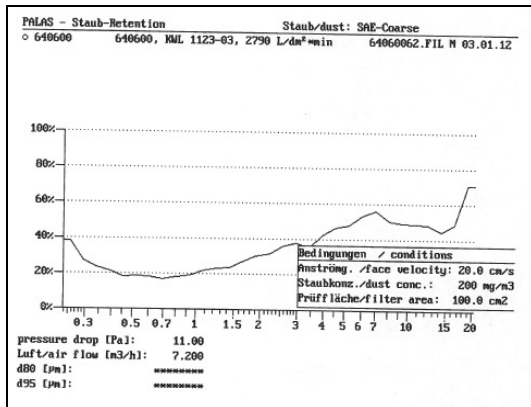


Abbildung 57 Retentionskurve von FFF 6406 mit Ausrüstung 19

5.3 Retentionskurven von FFF 6470

Rohware

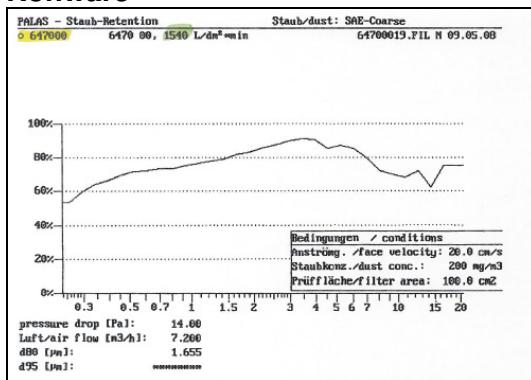


Abbildung 58 Retentionskurve von FFF 6470 Rohware

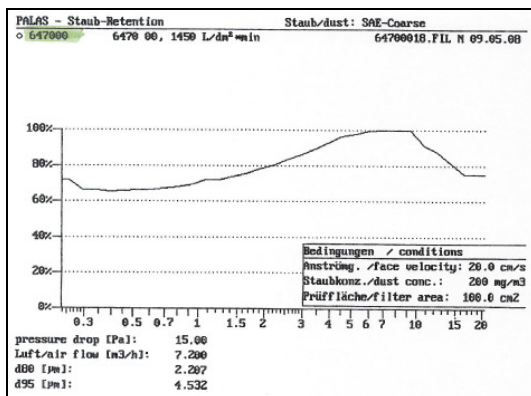


Abbildung 59 Retentionskurve von FFF 6470 Rohware

Ausrüstung 3

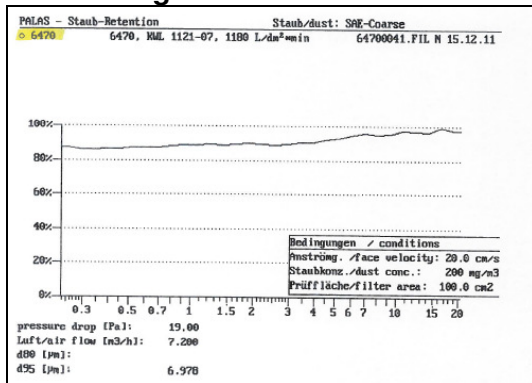


Abbildung 60 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 3

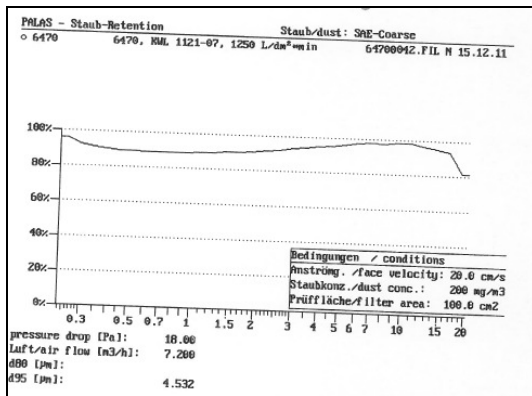


Abbildung 61 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 3

Ausrüstung 5

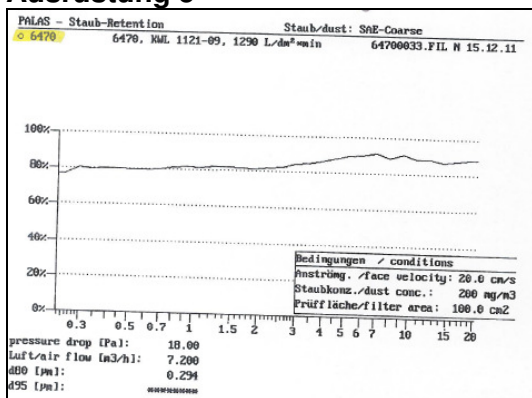


Abbildung 62 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 5

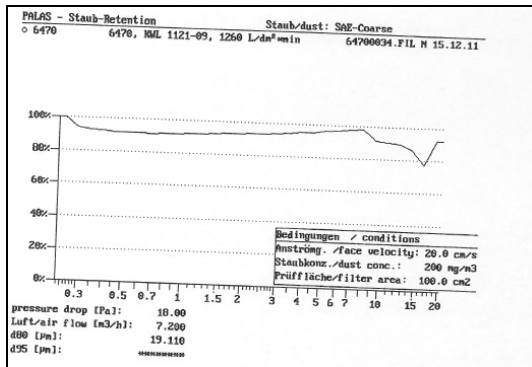


Abbildung 63 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 5

Ausrüstung 6

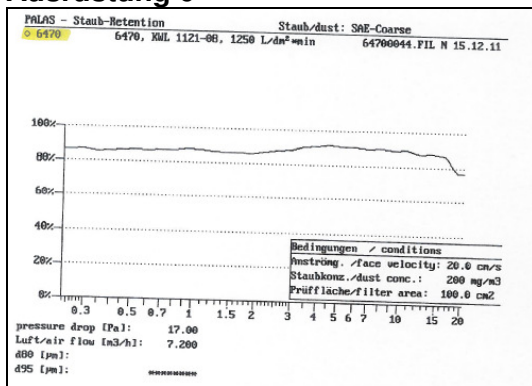


Abbildung 64 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 6

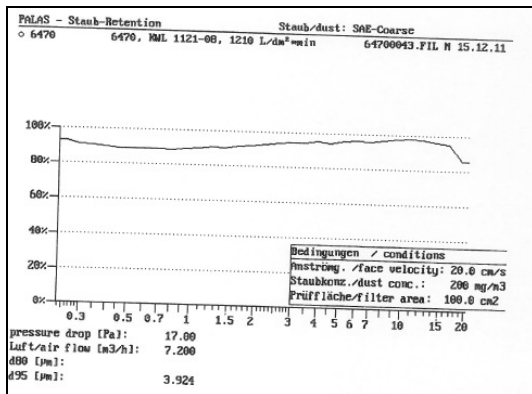


Abbildung 65 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 6

Ausrüstung 11

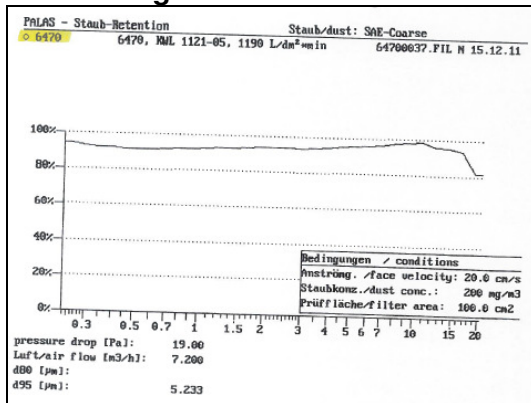


Abbildung 66 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 11

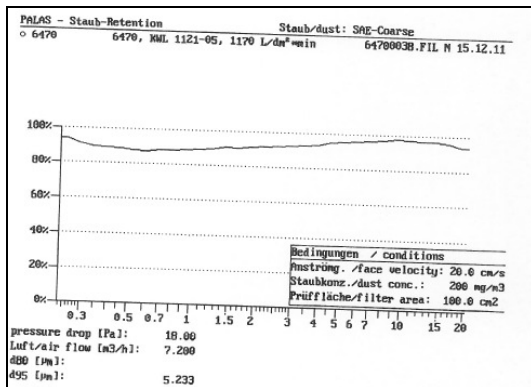


Abbildung 67 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 11

Ausrüstung 12

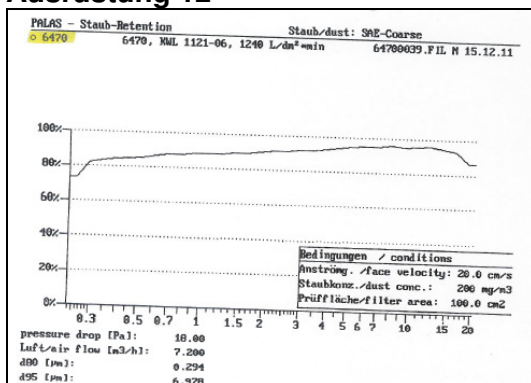


Abbildung 68 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 12

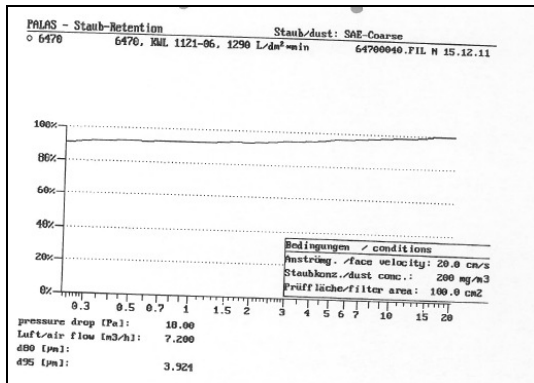


Abbildung 69 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 12

Ausrüstung 16

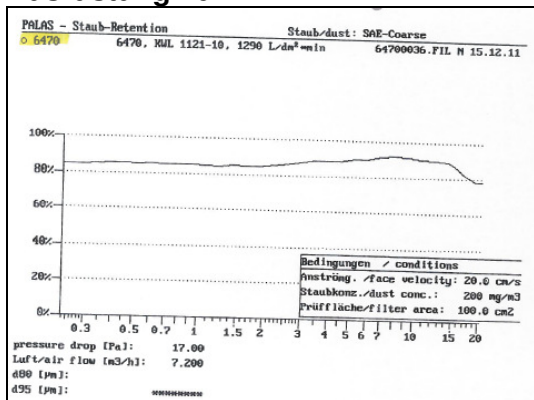


Abbildung 70 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 16

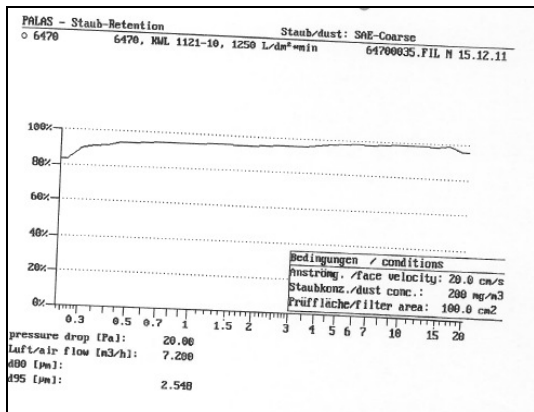


Abbildung 71 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 16

Ausrüstung 17

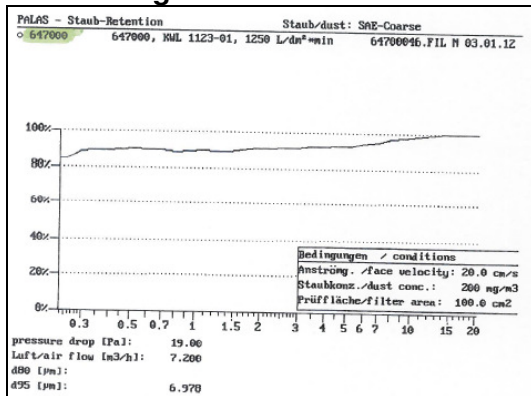


Abbildung 72 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 17

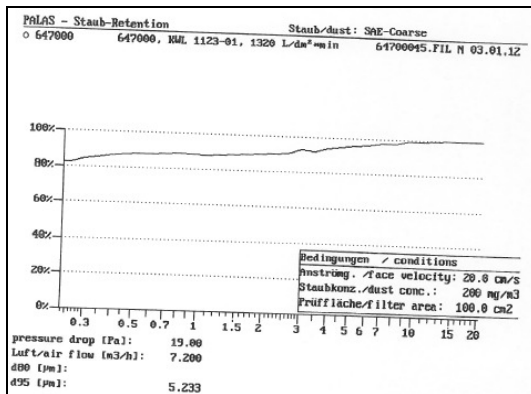


Abbildung 73 Retentionskurven von FFF 6470 mit Ausrüstung 17

Ausrüstung 18

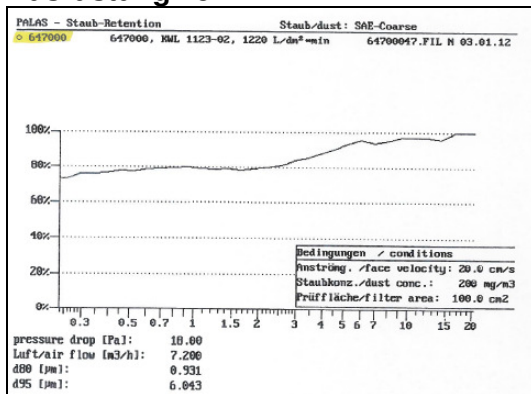


Abbildung 74 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 18

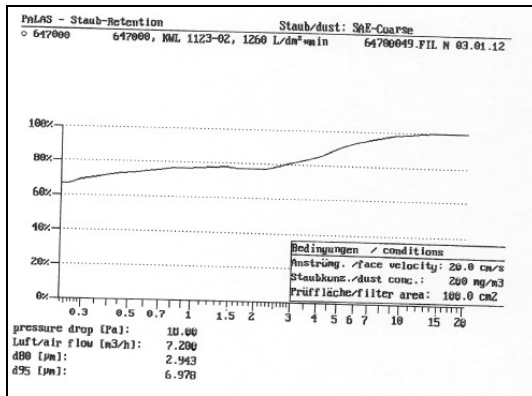


Abbildung 75 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 18

Ausrüstung 19

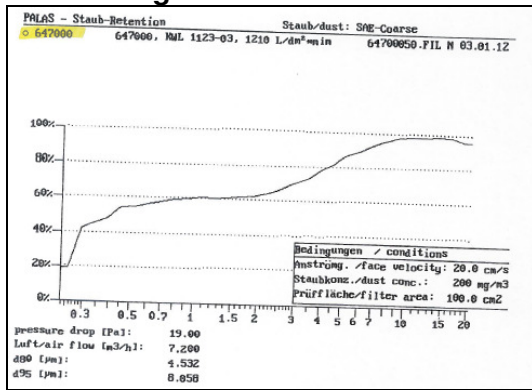


Abbildung 76 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 19

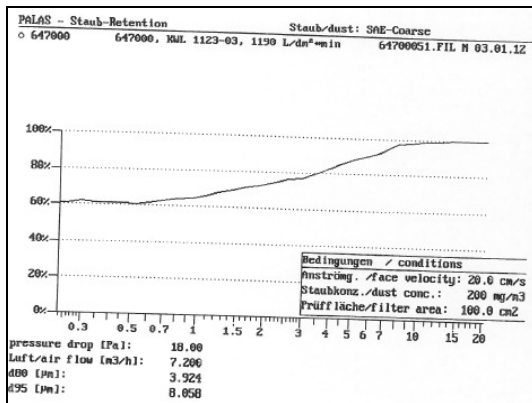


Abbildung 77 Retentionskurve von FFF 6470 mit Ausrüstung 19

5.4 Retentionskurven von FFF 6342

Rohware

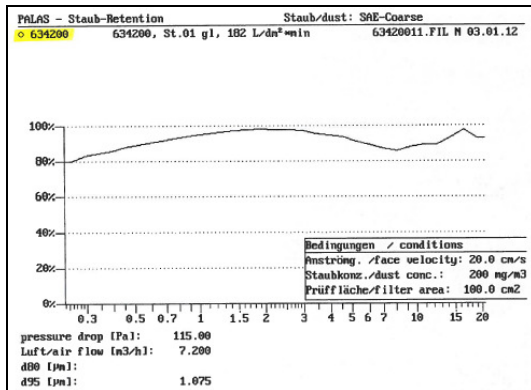


Abbildung 78 Retentionskurve von FFF 6342 Rohware

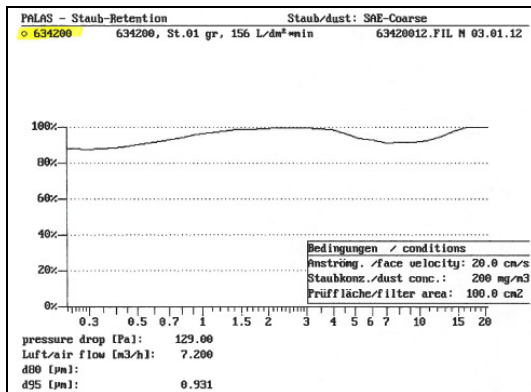


Abbildung 79 Retentionskurve von FFF 6342 Rohware

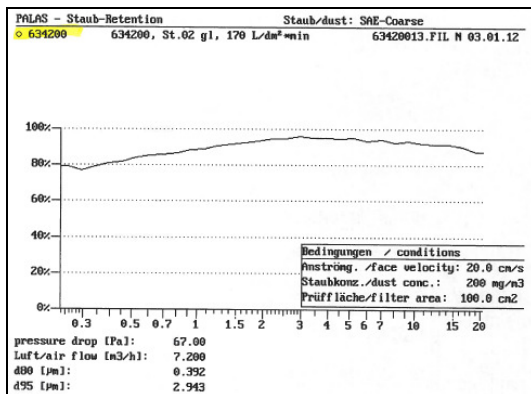


Abbildung 80 Retentionskurve von FFF 6342 Rohware

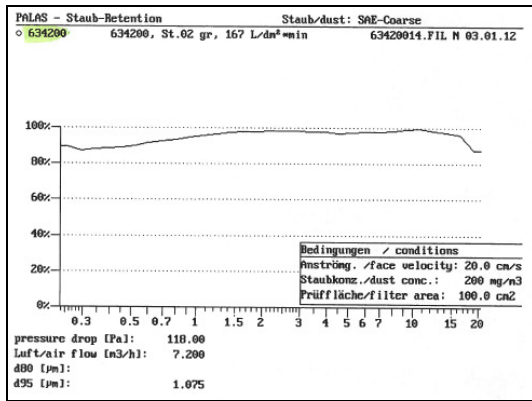


Abbildung 81 Retentionskurve von FFF 6342 Rohware

Ausrüstung 17

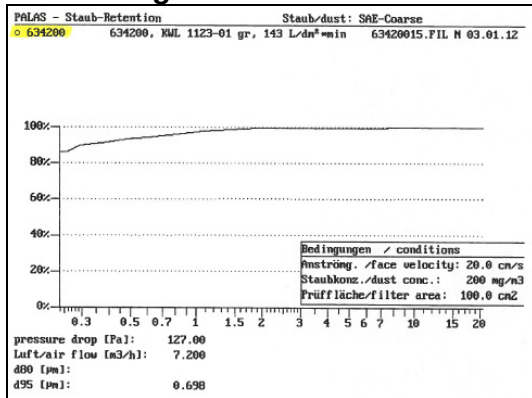


Abbildung 82 Retentionskurve von FFF 6342 mit Ausrüstung 17

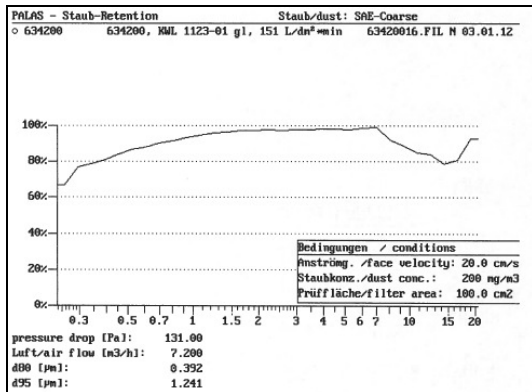


Abbildung 83 Retentionskurve von FFF 6342 mit Ausrüstung 17

Ausrüstung 18

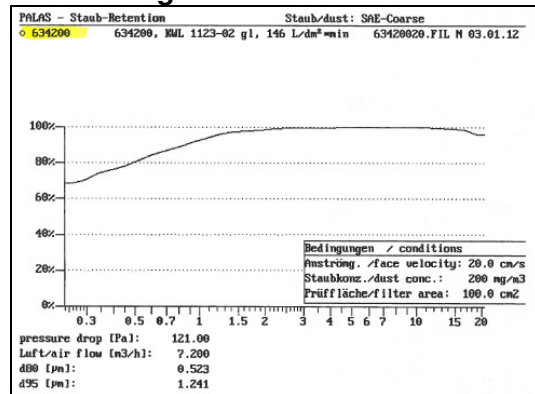


Abbildung 84 Retentionskurve von FFF 6342 mit Ausrüstung 18

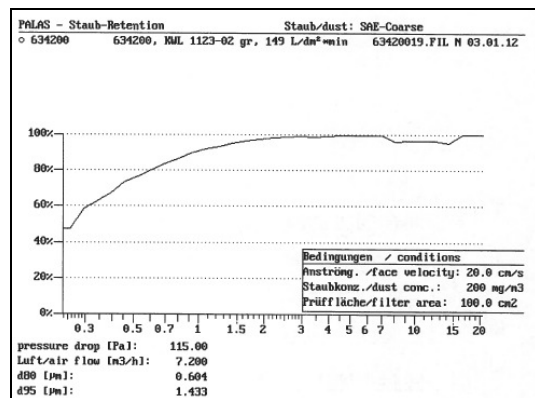


Abbildung 85 Retentionskurve von FFF 6342 mit Ausrüstung 18

Ausrüstung 19

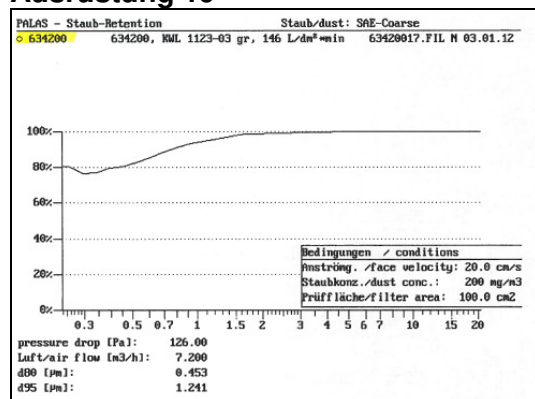


Abbildung 86 Retentionskurve von FFF 6342 mit Ausrüstung 19

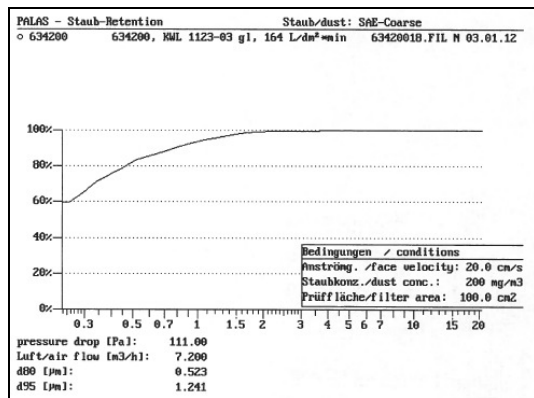


Abbildung 87 Retentionskurve von FFF 6342 mit Ausrüstung 19

5.5 Technische Daten Filtersubstrat FFF V 4321

Technische Vliese

Technische Daten

Vorläufige Materialspezifikation

Technische Daten

Artikel		V 4321-1 weiß 01
Faserzusammensetzung:	%	100 Polyester
Gewicht (DIN EN ISO 9073-1):	g/m ²	250 - 300
Dicke (DIN EN ISO 9073-2):	mm	3,5 – 4,0
Luftdurchlässigkeit: (DIN EN ISO 9237)	l/dm ² x min	1200 - 1400
Imprägnierung:		keine
Verfestigungsart:		mechanisch u. thermisch
Einsatz:		Filtermedium


10/2011

Die technischen Daten wurden nach DIN ermittelt und dienen der Beratung. Weiterverarbeiter und Endverbraucher sind nicht von der Pflicht entbunden, die Eignung des obigen Artikels für den konkreten Einsatzzweck zu überprüfen.

Filzfabrik Fulda GmbH & Co. KG · Frankfurterstrasse 62 · 36035 Fulda
 Telefon 0661 / 101-0 · Telefax 0661 / 101-224 · www.fff-fulda.de



5.6 Technische Daten Filtersubstrat FFF 6406



Technische Vliese

Technische Daten

Artikel:	6406 00 weiß 01	
Materialzusammensetzung:	100% Polyester	
Gesamtgewicht: (DIN EN 29073-T1)	g/m ²	150 ± 15
Dicke: (DIN EN ISO 9073-2)	mm	6,5 ± 0,7
Luftdurchlässigkeit: (DIN EN ISO 9237)	V/(dm ² x min) V/(m ² x sec)	2200 ± 20% 3670 ± 20%
max. Temperaturbelastung (trocken): K(°C)	413 (140)	
Verfestigung:	thermisch	
Imprägnierung:	keine	
Einsatz:	Filtermaterial	

05/2010


Die technischen Daten wurden nach DIN ermittelt und dienen der Beratung. Weiterverarbeiter und Endverbraucher sind nicht von der Pflicht entbunden, die Eignung des obigen Artikels für den konkreten Einsatzzweck zu überprüfen.

Filzfabrik Fulda GmbH & Co. KG - Frankfurterstrasse 62 - 36035 Fulda
 Telefon 0661 / 101-0 - Telefax 0661 / 101-224 - www.fff-fulda.de



FB-FFF-03-02-015 / Rev. A 20.11.08

5.7 Technische Daten Filtersubstrat FFF 6470



Technische Vliese

Technische Daten

Artikel:		6470 00 weiß 01
Materialzusammensetzung:		100% Polyester
Gewicht: (DIN EN 29073-T1)	g/m ²	320 ± 32
Dicke: (DIN EN ISO 9073-2)	mm	16 ± 2
Luftdurchlässigkeit: (DIN EN ISO 9237)	l/(dm ² x min) l/(m ² x sec)	1500 ± 300 2500 ± 500
Brennverhalten: (DIN 53438)		K1; F1
Verfestigungsart:		thermisch
Einsatz:		voluminöses Filtermedium

01/2010

Die technischen Daten wurden nach DIN ermittelt und dienen der Beratung. Weiterverarbeiter und Endverbraucher sind nicht von der Pflicht entbunden, die Eignung des obigen Artikels für den konkreten Einsatzzweck zu überprüfen.

Filtzfabrik Fulda GmbH & Co. KG · Frankfurterstrasse 62 · 36035 Fulda
 Telefon 0661 / 101-0 · Telefax 0661 / 101-224 · www.fff-fulda.de



FR-FFF-03-02-015 / Rev. A 20.11.08

5.8 Technische Daten Filtersubstrat FFF 6342

 TECHNISCHE DATEN
 TECHNICAL DATA

TECHNISCHE VLIESE
TECHNICAL NONWOVEN
6342 00

 weiß 01
 white 01

Materialzusammensetzung <i>Fibre composition</i>		100% Polyester <i>100% Polyester</i>
Gesamtgewicht (DIN EN 29073-T1) <i>Weight</i>	g/m ²	200 ± 20
Dicke (DIN EN ISO 9073-2) <i>Thickness</i>	mm	0,70 ± 0,1
Luftdurchlässigkeit (DIN EN ISO 9237) <i>Air permeability</i>	l/(dm ² x min) l/(m ² x s)	160 ± 32 267 ± 53
Max. Temperaturbelastung (trocken) <i>Max. Temperature stability</i>	K (°C)	413 (140)
Verfestigungsart <i>Bonding method</i>		thermisch; feine Gravur <i>thermal; finer pattern</i>
Einsatz <i>End use</i>		Filtermedium <i>Filter Media</i>

Diese technischen Daten sind nach DIN ermittelt worden und dienen als Hinweise. Technische Änderungen bzw. Verbesserungen sowie handelsübliche Farbabweichungen vorbehalten.
 Vor der Verarbeitung oder der Ingebrauchnahme ist die Eignung des Produkts für die jeweilige Anwendung zu prüfen.

*These technical data have been determined in accordance with DIN and serve as advice. Subject to modifications, improvements and usual colour deviations.
 Before processing one is still obligated to check the suitability of the product for the specific application involved.*

07/2013

FB-FFF-03-02-015 / Rev. E 19.02.2013

 Filzfabrik Fulda GmbH & Co KG // Frankfurter Str. 62 // 36043 Fulda // Germany
 Phone +49 661 101-0 // Fax +49 661 101-224 // info@fff-fulda.de // www.filzfabrik-fulda.de
MEMBER OF  GROUP

WWW.FFF-GROUP.DE