



forschen.
vernetzen.
anwenden.

Innovationsreport 2023

Industrielle Gemeinschaftsforschung

IGF-Forschungsvorhaben 21783 N

Entwicklung langzeitstabiler Filter mit geringem Druckverlust auf Basis elektrisch leitfähiger getufteter Strukturen zum Einsatz in Raumluftreinigern (PureAir)

Laufzeit:

01.04.2021 – 30.09.2023

Beteiligte Forschungsstelle(n):

Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik e. V. (IUTA)
Forschungsabteilung Filtration & Aerosolforschung

Institut für Bodensysteme an der RWTH Aachen e.V. (TFI)

Schlussbericht vom 29.02.2024

zu IGF-Vorhaben Nr. 21783 N

Thema

Entwicklung langzeitstabiler Filter mit geringem Druckverlust auf Basis elektrisch leitfähiger getufteter Strukturen zum Einsatz in Raumluftreinigern

Berichtszeitraum

01.04.2021 - 30.09.2023

Forschungsvereinigung

Umweltechnik

Forschungseinrichtungen

FE 1 Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik e.V. (IUTA)

FE 2 TFI – Institut für Bodensysteme an der RWTH Aachen e.V. (TFI)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	4
2	Zusammenfassung	7
3	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	9
3.1	Auswahl geeigneter Materialien und Strukturen (AP 1)	9
3.1.1	Beschreibung der Tuftingtechnologie	9
3.1.2	Anforderungsprofil	10
3.1.3	Auswahl der Polgarne	11
3.1.4	Auswahl des Trägermaterials	13
3.2	Entwicklung der Strukturen in kleinem Maßstab (AP 2)	14
3.2.1	Herstellung und Kontaktierung	14
3.2.2	Schalldämpfungseigenschaften	19
3.3	Experimentelle Überprüfung der Filterrunden (AP 3)	21
3.3.1	Messung der mechanischen Abscheideeffizienz	21
3.3.3	Untersuchung getufteter triboelektrischer Filtermedien	23
3.3.4	Aufbau eines Prüfstands zur elektrischen Kontaktierung	24
3.3.3	Messung der Abscheideeffizienz mit Kontaktierung	25
3.3.3	Einfluss der Herstellungsparameter	27
3.3.3	Proben mit einsetzender Coronaentladung	29
3.4	Konfektionierung vollformatiger Filter (AP 4)	29
3.4.1	Entwicklung und Kontaktierung von Filtern	29
3.4.2	Untersuchungen zur Plissierbarkeit	31
3.4.3	Untersuchungen zur Waschbarkeit	33
3.4.3	Konfektionierung mit Rahmen und Anschlüssen	42
3.5	Überprüfung der vollformatigen Filter (AP 5)	43
3.6	Aufbau und Erprobung eines Demonstrators (AP 6)	44
3.6.1	Auswahl eines Raumlufreinigers	44

3.6.2	Prüfkammer und -methode für Raumlufreiniger	44
3.6.3	Charakterisierung des Originalfilters	46
3.6.4	Charakterisierung des Filters mit Kontaktierung	47
3.6.5	Messungen der Schalldämpfungseigenschaften	48
4	Gegenüberstellung der Ergebnisse und Forschungsziele	50
5	Verwendung der Zuwendung	52
6	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	52
7	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen	53
8	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	56
9	Literaturverzeichnis und Quellen	59
10	Durchführende Forschungseinrichtungen	61

1 Motivation

Die negativen Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die menschliche Gesundheit sind bereits in vielfältigen toxikologischen und epidemiologischen Studien nachgewiesen worden [Pope2006, Lelieveld2015]. So kam beispielsweise die Lancet Kommission 2018 zu dem Schluss, dass jährlich weltweit 6,5 Millionen vorzeitige Todesfälle auf die Folgen verunreinigter Luft zurückzuführen sind [Landrigan2018]. Zudem hat sich im Rahmen der COVID-19-Pandemie besonders deutlich gezeigt, dass auch der Transport von Viren oder anderen Krankheitserregern über Aerosolpartikel einen relevanten Weg der Infektionsübertragung darstellt [Morawska2020]. Somit kann neben Abstands- und Hygieneregeln auch die Luftfiltration einen Beitrag zur Bekämpfung von Infektionskrankheiten leisten.

Ein wesentlicher Aspekt bei der Wahl eines für diesen Einsatzzweck geeigneten Filters ist stets, eine möglichst hohe Abscheideeffizienz bei gleichzeitig geringem Druckverlust zu erreichen. Dies ist insbesondere auch von Bedeutung bei Raumlufreinigern, die verunreinigte Luft in einem geschlossenen Raum über einen Filter zirkulieren. Da ein höherer Druckverlust bei unregulierten Ventilatoren den durchgesetzten Volumenstrom reduziert, sinkt auch die „Clean Air Delivery Rate“ (CADR), die dem Produkt von angesaugtem Volumenstrom und Abscheidegrad des Filters entspricht [Finger2015]. Gleiches gilt beispielsweise auch für die Filtration im Kfz-Innenraum oder durch Dunstabzugshauben, sofern diese im Umluftbetrieb genutzt werden. Durch immer strengere Vorgaben zu Energieeinsparungen im Zuge der voranschreitenden Elektromobilität und dem Bau von Niedrigenergiehäusern ist in Zukunft von einer zunehmend größeren Bedeutung des Umluftbetriebs auszugehen.

Eine Möglichkeit, die Abscheideeffizienz zu steigern, ohne dabei den Druckverlust zu erhöhen, bieten Elektretfilter [Wang2001]. In Elektretmedien werden die Filterfasern entweder herstellungsbedingt oder durch gezielten Einsatz einer Koronaentladung elektrisch aufgeladen, um so die mechanischen Abscheidemechanismen durch elektrostatische Kräfte zu ergänzen, ohne dabei den Druckverlust zu beeinflussen. Elektretfilter sind bei der Anwendung in Raumlufreinigern, dem Kfz-Innenraum aber auch in raumluftechnischen Anlagen weit verbreitet, besitzen jedoch einen entscheidenden Nachteil gegenüber herkömmlichen Filtern: Mit zunehmender Betriebsdauer nimmt die Faserladung meist stark ab, was teilweise zur drastischen Reduktion der Abscheideeffizienz führt. Die

Abnahme kann beispielsweise durch Beladung mit Partikeln [Ji2003, Finger2015, Kerner2020b], Exposition gegenüber Lösemitteln [Jasper2006, Choi2015, Kerner2018] oder hohe Luftfeuchte [Motyl2006] verursacht sein. So werden regelmäßige Filterwechsel nötig, um dauerhaft eine ausreichende Abscheideeffizienz zu gewährleisten. Auf der anderen Seite ist bekannt, dass die Alterung von Elektretfiltern stark von den Umgebungsbedingungen und der Art der Partikelbeladung abhängt [Schumacher2019], sodass das vom Hersteller vorgegebene turnusmäßige Filterwechselintervall ggf. zu häufigen Filterwechseln nach sich zieht, was wiederum unnötige Kosten verursacht und nicht ressourcenschonend ist.

Eine alternative Möglichkeit, elektrostatische Kräfte zur Partikelabscheidung zu nutzen, bieten elektrostatische Abscheider, die beispielsweise auch in Raumlufreinigern eingesetzt werden [Shaughnessy2006]. In diesen werden die Partikel mittels einer Koronaentladung zunächst aufgeladen und dann auf unter Hochspannung stehenden metallischen Platten abgeschieden. Diese sind waschbar, sodass kein Filterwechsel notwendig ist. Nachteil ist jedoch zum einen die Emission von Ozon durch die Koronaentladung [Siegel2016]. Dieses kann zwar durch Aktivkohlefilter vor dem Austritt in die Umgebung wieder entfernt werden, wodurch jedoch wiederum regelmäßige Filterwechsel notwendig sind. Zum anderen ist die Abscheidung von Partikeln mit sehr geringer elektrischer Mobilität aufgrund des großen Abstands der Abscheideplatten schwierig.

Ziel des Projekts war somit die Entwicklung einer Filtrationslösung, die den Vorteil einer hohen Abscheideeffizienz bei niedrigem Druckverlust ohne Ozonemission von Elektretfiltern mit der Langzeitstabilität und Waschbarkeit von elektrostatischen Abscheidern verbindet. Dazu wurden getuftete leitfähige 3D-Strukturen mit großer Oberfläche entwickelt und untersucht. Das herkömmliche Tuftingverfahren wird traditionell für die Herstellung textiler Bodenbeläge angewendet und ist maschinell auf die Verarbeitung elastischer Garne ausgelegt. Durch die Entwicklung eines innovativen Maschinenelements („E-Jerker“) können neuerdings aber auch dehnungsarme technische Garne wie z. B. Edelstahl oder Glas vertuftet werden.

Durch das Anlegen einer Spannung an das leitfähige Material bleibt die elektrostatische Abscheidung dauerhaft erhalten und durch die geringeren Abstände zwischen den Fasern können im Gegensatz zu konventionellen elektrostatischen Abscheidern bei gleicher Verweilzeit auch Partikel geringerer elektrischer Mobilität abgeschieden werden. Zudem

bilden sich an den Fasern stark inhomogene Felder aus, die zu einer effizienten Abscheidung ungeladener Partikel aufgrund der Dielektrophorese führen. Da entsprechend keine Koronaentladung nötig ist, um die Partikel aufzuladen, wird hierbei auch kein Ozon freigesetzt. Gleichzeitig soll durch die Waschbarkeit der Filter einer Steigerung des Druckverlusts während der zunehmenden Beladung entgegengewirkt werden.

2 Zusammenfassung

Konventioneller filterbasierte Raumlufreiniger verwenden bisher vorwiegend entweder Elektretfilter (niedriger Druckverlust, aber geringe Langzeitstabilität) oder elektrostatische Abscheider (ressourcenschonend da waschbar, aber häufig ozonemittierend). Ziel des Projekts war die Entwicklung einer Filtrationslösung, die eine hohe Abscheideeffizienz bei niedrigem Druckverlust mit Ozonfreiheit, Langzeitstabilität und Waschbarkeit verbindet. Dies sollte mit einer dreidimensionalen getufteten Polstruktur aus elektrisch leitenden Fasern erreicht werden, deren Herstellung erst seit kurzem technisch möglich ist. Durch das Anlegen einer elektrischen Spannung an das Material soll die elektrostatische Abscheidung dauerhaft erhalten und durch die geringen Abstände zwischen den Fasern können auch Partikel niedriger elektrischer Mobilität abgeschieden werden.

Zum Erreichen des Ziels wurde zunächst eine Auswahl an geeigneten Trägermaterialien, isolierenden und leitfähigen Polgarnen getroffen. In ersten Vorversuchen zur Bestimmung der rein mechanischen Abscheideeffizienz erwiesen sich dabei isolierende Mikrofasergarne und leitfähige Reihen aus Edelstahlgarnen auf einen Standard-Tuftingträger als am besten geeignet. Mit diesen konnten vergleichbare Abscheideeffizienzen und Druckverluste wie in konventionellen Filtermedien für Luftreiniger erreicht werden. Im nächsten Schritt wurden die Filtermedien in einem speziell dafür entwickelten Filtermediennprüfstand elektrisch kontaktiert. Dabei stellte sich eine ausreichende Isolation zwischen den benachbarten leitfähigen Reihen als erhebliche Herausforderung dar. Durch systematische Parametervariation konnten jedoch letztlich Konstruktionsparameter gefunden werden, bei denen sich Spannungen von bis zu 4,5 kV ohne Überschlänge an das Filtermedium anlegen ließen. Dadurch ließ sich eine Anhebung der minimalen Abscheideeffizienz von etwa 30 % auf über 60 % erreichen. Die Struktur wurde dabei durch Variation der Parameter wie Teilung, Stichdichte, Polhöhe, Polstruktur und Kombination isolierender und leitfähiger Polgarne weiter optimiert.

Aus dem am besten geeigneten Filtermaterial wurde schließlich ein vollformatiger Filter für einen Raumlufreiniger konfektioniert. Bei diesem traten jedoch erneut Probleme bei der elektrischen Isolierung zwischen den leitfähigen Reihen auf, die während der Laufzeit des Projekts nicht mehr gelöst werden konnten. So wurde die generelle Machbarkeit des Projektansatzes auf der Skala von Filtermedien erfolgreich demonstriert, die Übertragung auf einen kompletten Filter im Raumlufreiniger steht allerdings noch aus. Bei einigen

Proben zeigte sich eine plötzliche starke Erhöhung der Abscheideeffizienz ab einer bestimmten angelegten Spannung, die vermutlich auf eine kontrollierte Coronaentladung im Filtermedium zurückzuführen ist. Das Verhalten konnte noch nicht reproduzierbar kontrolliert werden, bietet aber einen interessanten Ansatzpunkt für weitere Entwicklungen.

3 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

3.1 Auswahl geeigneter Materialien und Strukturen (AP 1)

3.1.1 Beschreibung der Tuftingtechnologie

Die Tuftingtechnologie ähnelt dem Nähprozess: Während des Tuftvorgangs stechen bis zu 2000 nebeneinander angeordnete Nadeln senkrecht in ein Trägermaterial, das sich kontinuierlich in Produktionsrichtung bewegt (Abbildung 2). Auf der Unterseite dieses Trägermaterials wird das Polgarn von einem Greifer übernommen und zu einer Garnschleife geformt. Nadeln, Greifer und ggf. zur Erzeugung von Schnittpol (auch Velours genannt) benötigte Messer sind in Modulen auf Barren montiert und werden als Tuftwerkzeuge bezeichnet.



Abbildung 1: Tuftingtechnologie; links: Prinzipskizze der technologischen Elemente; rechts: Fotografie der Tuftingzone

Bisher konnten nur elastische Garne im Tuftingprozess eingesetzt werden, da eine kontinuierliche Garnlieferung über Garnspeisewalzen erfolgt, das Garn im Tuftprozess aber zyklisch verbraucht wird. Der E-Jerker ist ein vom TFI entwickeltes, zwischen Garnspeisewalzen und Nadeln geschaltetes Element, welches unterschiedliche Liefermengen während eines Tuftzyklus ermöglicht [Goetz2013]. So konnten beispielsweise auf Grundlage dieses Prinzips Hochleistungstuftingstrukturen aus Glas entwickelt werden [Brunke2019]. Für das aktuelle Projekt ist diese Möglichkeit entscheidend, um auch die benötigten leitfähigen Edeltahlgarne vertuften zu können.

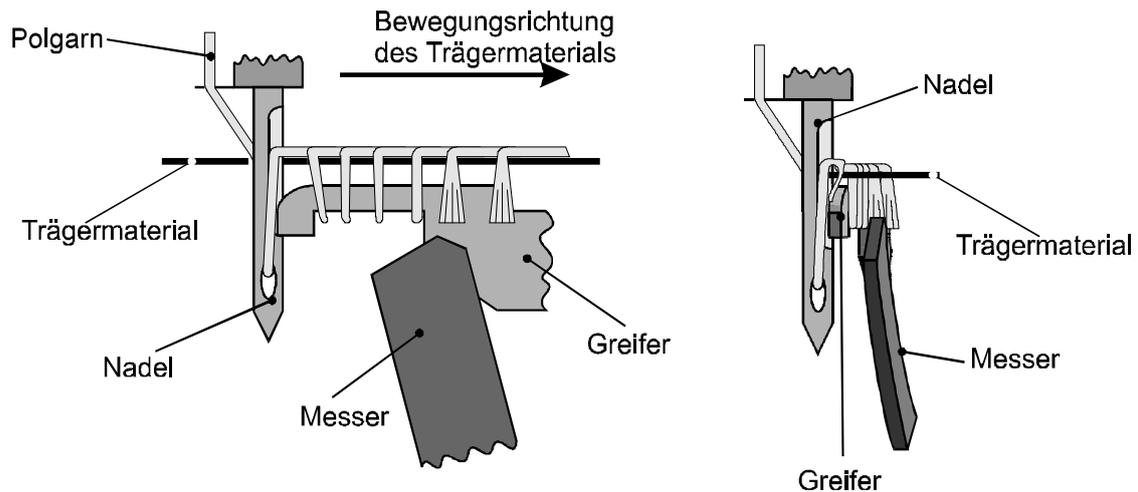


Abbildung 2: Grundprinzip der Tuftingtechnik (links Seitenansicht, rechts Frontansicht)

Getuftete Filtermedien können aufgrund ihrer porösen Struktur auch zur Schallisolierung beitragen. Die schallisolierende Wirkung getufteter Strukturen war unter anderem Thema verschiedener Projekte des TFI [z. B. Brunke2013]. Durch textile Bodenbeläge konnte dort ein bewerteter Schallabsorptionsgrad von α_w von 0,15 bis 0,35 erreicht werden, was zu einer deutlichen Reduzierung der Nachhallzeit des Raums genutzt werden kann. Die Tuftingstruktur ermöglicht auch ein gezieltes Einstellen auf bestimmte Frequenzen, wie z. B. Resonanzfrequenzen eines Raumluftreinigers [Brunke2013].

3.1.2 Anforderungsprofil

Vor Beginn der Auswahl der Materialien wurde ein Anforderungsprofil an die Tuftingstruktur erstellt. Eine grundlegende Anforderung bestand darin, dass das isolierende Polgarn eine ausreichend geringe Leitfähigkeit aufweisen sollte, um einen Stromfluss zwischen den leitenden Polgarnreihen zu verhindern. Zudem musste die Struktur ausreichend mechanisch stabil sein, um im Betrieb und insbesondere während eines Waschvorgangs intakt zu bleiben. Dazu gehört insbesondere, dass sie inert gegenüber Wasser sind, so dass sich die Fasern nicht an- oder auflösen, quellen oder schrumpfen. Da eine zusätzliche Fixierung der Garne im Trägermaterial auf Kosten der Luftdurchlässigkeit geht, sollte die Struktur möglichst ohne eine Zusatzbehandlung (z. B. thermische Verfestigung oder Beschichtung) auskommen. Als Referenzwerte für die zu erreichenden Werte von Druckverlust und Abscheideeffizienz wurden zunächst die Fraktionsabscheidegrade und Druckverluste von vier konventionellen Filtermedien bestimmt, die in Abbildung 3 gezeigt sind. Aus Vertraulichkeitsgründen sind die genauen Angaben der Filtermedien hier nicht gezeigt.

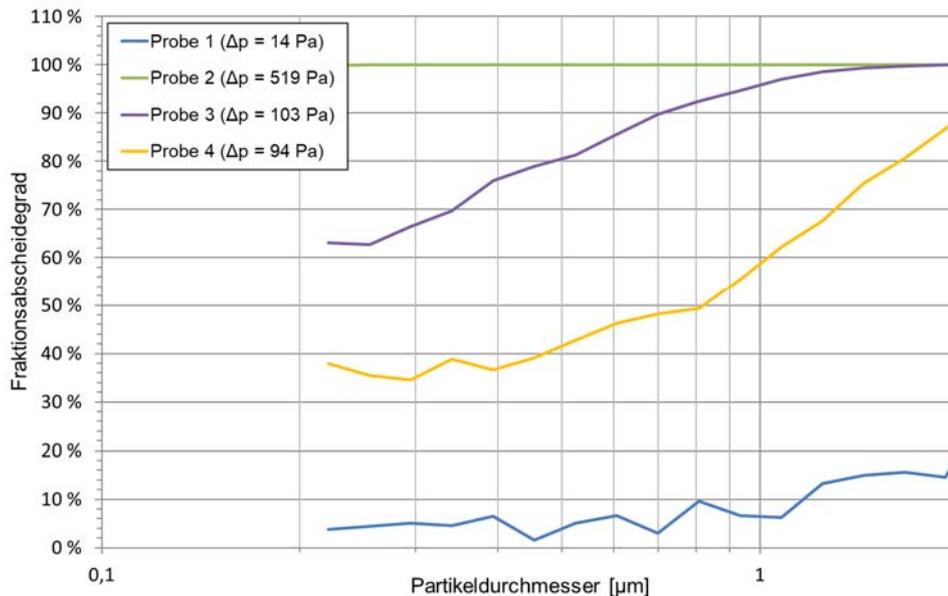


Abbildung 3: Fraktionsabscheidegrade und Druckverluste von vier konventionellen Filtermedien gemessen bei einer Anströmgeschwindigkeit von 10 cm/s.

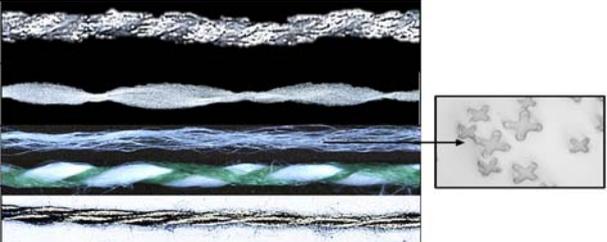
Probe 1 ist ein typisches Grobstaubfiltermedium, das zwar einen sehr geringen Druckverlust von 14 Pa, aber über einen weiten Größenbereich nur eine Abscheideeffizienz von unter 10 % aufweist. Probe 2 stellt den anderen Extremfall eines Filtermediums dar, das für die Herstellung von H13-Filtern nach EN 1822-1 verwendet wird. Dieses weist eine durchgehend hohe Abscheideeffizienz nahe 100 % auf, jedoch bei einem sehr hohen Druckverlust von 519 Pa. Die Proben 2 und 3 hingegen stellen typische Filtermedien da, die auch in Filtern von Luftreinigern zum Einsatz kommen. Sie weisen minimale Abscheideeffizienzen zwischen 30 % und 70 % bei Druckverlusten von etwa 100 Pa auf. Somit wurde als Anforderungsziel für die hier zu entwickelnde Struktur eine minimale Abscheideeffizienz zwischen 30 % und 70 % bei maximal 100 Pa Druckverlust bei einer Anströmgeschwindigkeit von 10 cm/s gesetzt.

3.1.3 Auswahl der Polgarne

Zum Erreichen des Anforderungsprofils bestand der erste Schritt in der Auswahl geeigneter Materialien. Als erster Ansatzpunkt diente dazu ein einfaches Polyestergarn. Um eine möglichst große Oberfläche für die Filtration zu erzeugen, wurden zusätzlich Garne, die eine besonders geringe Einzelfaserfeinheit besitzen, ausgewählt. Dies war zum einen ein Polyestermikrofasergarn, zum anderen x-profilierter Fasern. Die ausgewählten Garne und deren Spezifikationen sind in Tabelle 1 dargestellt. Für eine dichte getuftete Oberflä-

che besaßen alle Einzelgarne eine zu geringe Gesamtfinheit, sodass das Mikrofaser-garn und das x-profilierter Garn für die Tuftversuche gefacht und umwunden wurden (TWD PES Garn, 181-192 dtex 140 U/m, S).

Tabelle 1: Polgarne für ein getuftetes Filtermedium

	Material	Garnfeinheit	Spezifikation	
Isolierend	Polyester	2500 dtex f 416	Heatset; Z 220; S 200	
Isolierend	Polyester	690 dtex f 1152	Mikrofaser DTY	
Isolierend	Polyester	1000 dtex f 1000	X-profilierter	
Leitfähig	Edelstahl-fasergarn	Nm 11/4	Zwirn	

Für weitere Versuche zu triboelektrischen Medien wurden getuftete Materialien aus Glas-fasergewebe sowie Glasfaserpolgarn hergestellt (Spezifikationen siehe Tabelle 2; Kon-struktionsdaten siehe Tabelle 3).

Tabelle 2: Spezifikation Glasfasermaterialien

Material	Kennzeichen	Spezifikation
Glasfasergewebe	Bindung	Doppelgewebe: 2x Leinwandbindung
	Kettgarn	Texturiertes Glas, 630 tex
	Kettdichte	7 Fäden/cm
	Schussgarn 1	Texturiertes Glas 420 tex
	Schussgarn 2	Texturiertes Glas 515 tex
	Schussdichte	8 Fäden/cm
Glasfaserpolgarn	Feinheit	300 tex
	Fachung	2fach
	Drehung	Z100

Tabelle 3: Spezifikation Proben mit Glasfaserträgermaterial und -polgarn

Probe	Träger	Leitfähiges Polgarn	Isolierendes Polgarn	Polkon- struktion	Polhöhe
1	Glasfaser- gewebe	PET, DTY, dtex 230 f 384 x 3 rund matt rohweiß Einzelkapillartiter 0,6 dtex Gesamttiter 690 dtex	Glasfaser- polgarn	Schnitt	15 mm
2	Glasfaser- gewebe	PET, DTY, dtex 230 f 384 x 3 rund matt rohweiß Einzelkapillartiter 0,6 dtex Gesamttiter 690 dtex	Glasfaser- polgarn	Schlinge	15 mm
3	Glasfaser- gewebe	ohne	Glasfaser- polgarn	Schnitt	15 mm
4	Glasfaser- gewebe	ohne	Glasfaser- polgarn	Schlinge	15 mm
5	Glasfaser- gewebe	Edelstahlfasergarn Nm11/2/2 Filtec	Glasfaser- polgarn	Schnitt	15 mm

Als Alternative zum leitfähigen Edstahlgarn wurden auch Versuche mit einem Carbonfasergarn (Carbonfilamentgarn 200 tex, Tenax-E HTA40) durchgeführt. Mit diesem konnten jedoch die Kontaktierungen nicht zufriedenstellend hergestellt werden. Auch das Tuften war anspruchsvoll, da aufgrund der spröden Eigenschaft Fadenbrüche bzw. einzelne gebrochene Filamente auftraten (siehe Abbildung 4). Hierdurch steigt die Gefahr von ungewollten und unkontrollierbaren Querkontaktierungen.



Abbildung 4: Tuftmuster mit Carbongarn und gebrochenen Filamenten auf der Polseite

3.1.4 Auswahl des Trägermaterials

Vom projektbegleitenden Ausschuss wurden drei verschiedene Vliesstoffe zur Verfügung gestellt (siehe Tabelle 4, Nr. 1-3), die bereits kommerziell als Filtermedien verwendet werden. Die Vliesstoffe wurden auf ihre Vertuftbarkeit hin überprüft, indem Nadeldurchstichuntersuchungen mit einem 1/10“ Nadelmodul durchgeführt wurden. Dabei wurden die Vliesstoffe 3100305 E0130 und 3200052 2106/104 als vertuftbar identifiziert. Der vierte genannte Vliesstoff wird nicht kommerziell als Filtermedium verwendet, sondern ist ein marktübliches Tuftingträgermaterial (Spinnvliesstoff).

Tabelle 4: Übersicht der untersuchten Trägermaterialien

Nr.	Name	Materialzusammensetzung	Gesamtgewicht	Dicke
1	PP-200 μ FDA	100 % PP	365 g/m ²	3,7 mm
2	3100305 (E0130) weiß	100 % PES (70% 17 dtex, 30% 28 dtex)	425 g/m ²	3,2 mm
3	3200052 (2106/104) grau meliert	100 % PES (65% 3,3 dtex, 20% 6,7 dtex, 15% 1,7 dtex)	110 g/m ²	1,3 mm
4	SM100	BiCo Faser PET/PA (15 Dpf, 80% PET, 12% PA)	100 g/m ²	1,0 mm

Auf der Einnadel-Tuftingmaschine konnten alle vier Trägermaterialien verarbeitet werden. Der Druckverlust eines Trägermaterials ist im Systemaufbau des getufteten Textils vernachlässigbar gering gegenüber der Polschicht. Auch trägt das Trägermaterial nur einen geringen Teil zur Abscheideeffizienz des gesamten Filters bei. Da jedoch die Dimensionsstabilität der kommerziellen Filtermaterialien (Nr. 1 - 3) nicht ausreicht, um auf einer industriellen Tuftingmaschine verarbeitet zu werden, wurden alle Strukturen auf dem Standardträgermaterial Nr. 4 entwickelt.

3.2 Entwicklung der Strukturen in kleinem Maßstab (AP 2)

3.2.1 Herstellung und Kontaktierung

Aus den zuvor ausgewählten Polgarnen und Trägermaterialien wurden für die Untersuchungen in den folgenden Arbeitspaketen Filterrunden hergestellt. Dabei wurden Parameter wie Poldichte, Polhöhe, Versatzmusterung, Hoch-Tief-Strukturierung, Schnitt-/Schlingenpol sowie dem Abstand von isolierenden und leitenden Materialien systematisch variiert (siehe auch Abbildung 5). Ziel war es, eine besonders geschlossene Oberfläche der dreidimensionalen Textilkonstruktion zu erreichen, um eine gleichmäßige Filtration zu ermöglichen.

- **Stichdichte**
 - Anzahl der Noppenquerreihen oder Stiche je Längeneinheit in Herstellungsrichtung
- **Teilung**
 - Abstand zwischen den Nadeln bzw. zwischen Schnitt- oder Polnuppenreihen pro Zoll in Querrichtung
- **Polhöhe**
 - Länge der Polnuppen, gemessen von der Oberseite des Trägers bis zu den Spitzen
- **Materialien Träger / Polgarne frei kombinierbar**
 - z. B. Chemiefasern (PA, PP, PES), Naturfasern (WO, CO), dehnungsarme technische Garne (Glas, Edelstahl, Aramid)

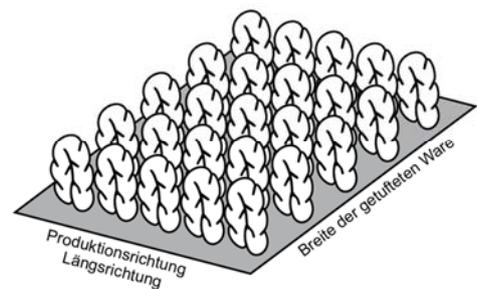


Abbildung 5: Variationsmöglichkeiten in der Tuftingtechnologie

Einen wesentlichen Einfluss hatte dabei die Entscheidung, ob die Strukturen als Schnitt- oder Schlingenpol ausgeführt werden. Dabei besteht bei Schnittpol (Velours) der Vorteil darin, dass das Garn beim Aufschneiden an der Oberfläche aufbauscht und somit eine sehr geschlossene Oberfläche generiert werden kann, durch die die Luft strömt. Bei der Herstellung von Schlingenpol entfällt das Tuftwerkzeug Messer, was den Tuftingprozess

vereinfacht und weniger anfällig macht als die Herstellung von Veloursware. Daher wurden sowohl Schnitt- als auch Schlingenkonstruktionen zur Entwicklung der Ronden genutzt.

Die leitfähigen Garne wurden als Schlingenkonstruktion eingearbeitet, da beim Aufschneiden eines Garns die Leitfähigkeit unterbrochen wird. Der sogenannte Pullback-Effekt beim Tufting sorgt dafür, dass eine Schlinge beim folgenden Stich wieder etwas zurückgezogen wird. Dieser Effekt wurde hier genutzt, um eine geringere Polhöhe für die leitfähigen Garne zu erzielen als für die nicht-leitfähigen Garne. Zum einen wird dadurch eine geschlossenerere Gesamtoberfläche generiert, andererseits sollten durch die isolierende Wirkung der höheren Reihen an nicht-leitfähigen Garnen Überschläge verhindert werden.



Abbildung 6: Einnadeltuftingmaschine Mtuft von modra

Die Muster wurden auf einer speziellen Einnadeltuftingmaschine mit einer digitalen Mustereinrichtung hergestellt, welche eine einfache Variation der verschiedenen Tuftingparameter ermöglicht. Einige wenige Varianten wurden im „staggered needle bar“ Verfahren entwickelt. Hierbei werden offene Stellen geschlossen, indem mit einer zusätzlichen Nadelbarre Stiche versetzt zur eigentlichen Nadelbarre gesetzt werden. Hierdurch kann die Dichte der Ware noch deutlich erhöht werden.

Die Tuftparameter wurden wie folgt variiert:

- Stichdichte: 28 – 40 Stiche / 10 cm
- Teilung: 1/7 – 1/10“
- Polhöhe: 12 – 20 mm
- Abstand der leitfähigen Reihen: 3 - 5

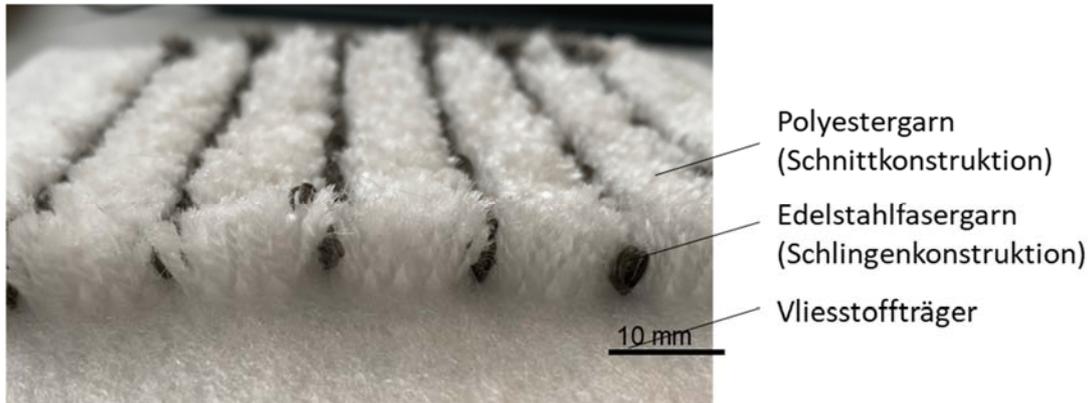


Abbildung 7: Getuftete Filterstruktur mit elektrisch leitfähigen Filterelementen

Durch die Variation der Stichdichten und Teilung konnten unterschiedlich dichte Waren erzeugt werden (vgl. Abbildung 7, Abbildung 8 und Abbildung 9).

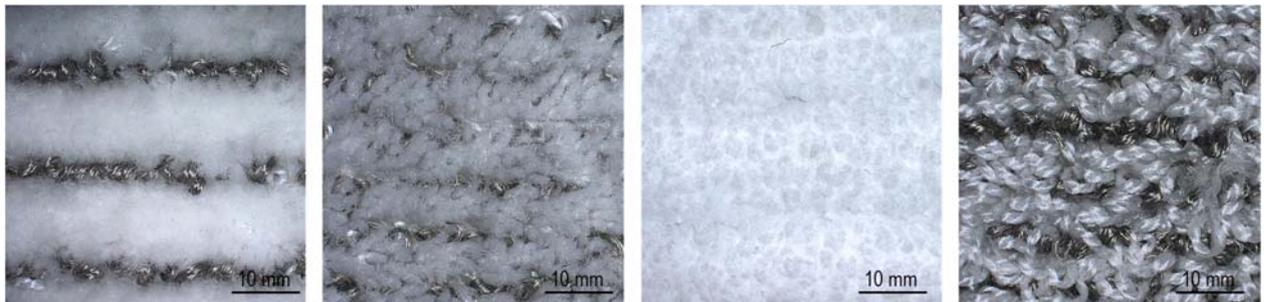


Abbildung 8: Oberseite verschiedener getufteter Filtermedienproben;
von links nach rechts:

Muster 1: 4 Reihen Polyester 5000 dtex, 1 Reihe Edelstahlgarn 2 fach Nm 11/4,

Muster 2: 2 Reihen Polyester 2500 dtex 1 Reihe Edelstahlgarn Nm 11/4,

Muster 3: 4 Reihen Mikrofaser, 2070 dtex, 1 Reihe Edelstahlgarn Nm 11/4,

Muster 4: 2 Reihen Polyester 2500 dtex, 1 Reihe Edelstahlgarn 2 fach Nm 11/4

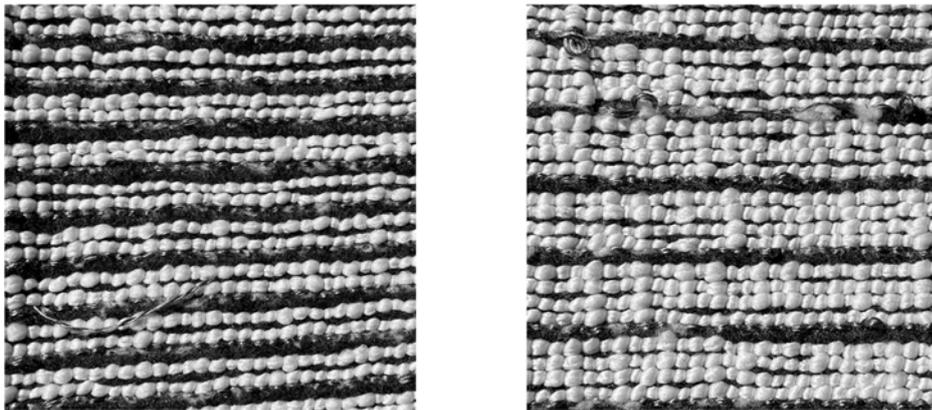


Abbildung 9: Rückseite verschiedener Filtermedien,
links: 2 Reihen Mikrofasergarn 2070 dtex, 1 Reihe Edelstahlgarn Nm 11/4,
rechts: 4 Reihen Mikrofasergarn 2070 dtex, 1 Reihe Edelstahlgarn Nm 11/4

Das Mikrofasergarn und das x-profilierter Garn haben sich für den Einsatz als Polgarn als geeignet herausgestellt. Dadurch konnten verschiedene Filterrunden entwickelt werden, um die Abscheideleistung in AP 3 zu überprüfen. Für das Anlegen einer Hochspannung an die Filterrunden wurden die elektrisch leitfähigen Edelstahlpolgarn kontaktiert. Dazu wurde zunächst ein Kupferband in Kombination mit einem leitfähigen Klebstoff genutzt (siehe Abbildung 10).

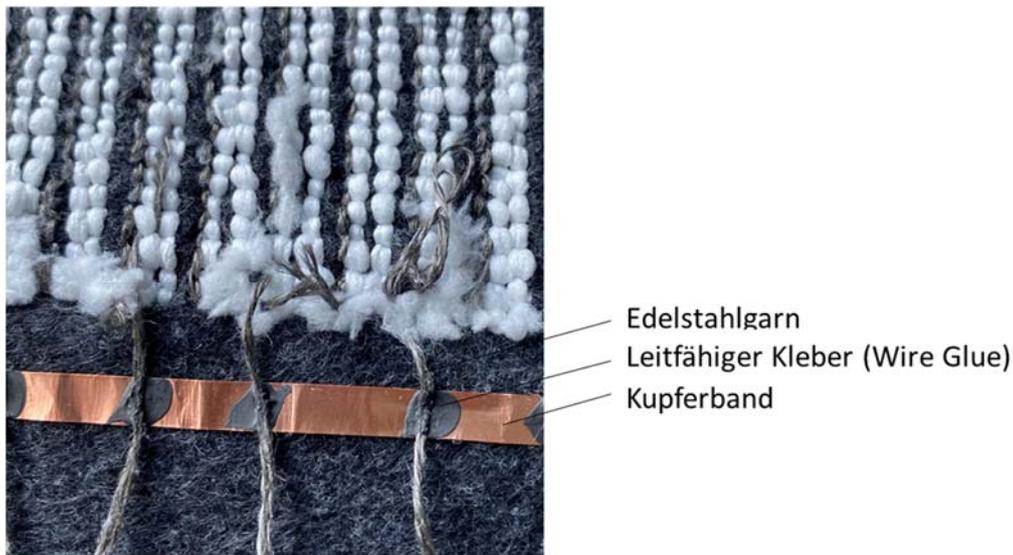


Abbildung 10: Kleben mit leitfähigem Klebstoff auf der Rückseite des getufteten Musters

Diese Art der Kontaktierung hat sich in der Handhabung nicht bewährt, da die Haftung des Kupferbands am Träger nicht ausreichte. Bei weiteren Proben wurden die leitfähigen vertufteten Polgarne miteinander verbunden, indem das Edelstahlgarn auf dem Träger vernäht wurde (Abbildung 11).

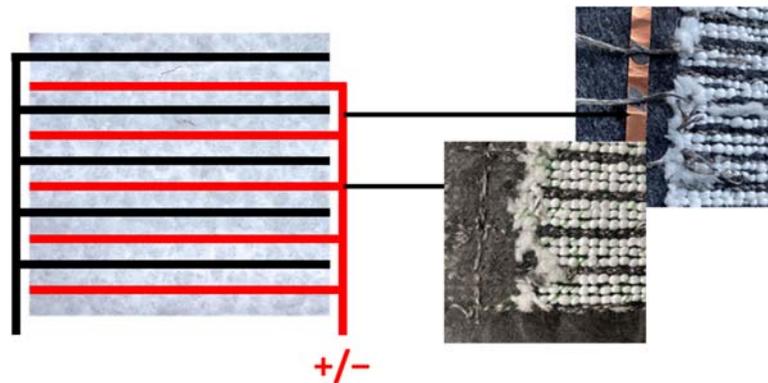


Abbildung 11: Kontaktierung der leitfähigen Polgarne

Bei der Entwicklung der Filterronden auf der Einnadeltuftingmaschine werden durch die besondere Technologie die Polreihen nacheinander und nicht parallel gebildet. Dies führte dazu, dass quer liegende Garne auftraten. Die Edelstahlgarne legten sich damit teilweise in die isolierenden Reihen. Aus diesem Grund wurden weitere Proben auf einer alternativen Tuftingmaschine entwickelt, bei der alle Polreihen zeitgleich hergestellt werden.

Auch hier – und bei parallel gestarteten Versuchen auf einer Industrieanlage eines Partners aus dem Projektbegleitenden Ausschuss – kam es zu Überschlägen bei der elektrischen Kontaktierung der Garne. Deshalb wurden erneut Filterronden auf der Einnadeltuftingmaschine hergestellt. Dabei wurde jedoch eine Luftdüse genutzt, die im Bereich der Nadel senkrecht auf die bereits gebildeten Tuftreihen bläst. Durch diesen Luftstrom werden die Polnoppen, die beim vorherigen Tuftprozess gebildet wurden von der aktuellen Einstichposition der Nadel weggedrückt. Hierdurch wird verhindert, dass die getufteten Edelstahlgarnschlingen in die isolierenden Polgarne eingearbeitet werden und es möglicherweise zu ungewollten Querkontaktierungen kommt.

In weiteren Variationen wurden die Abstände zwischen den leitfähigen Garnen erhöht. Damit konnten die Proben ohne Überschläge elektrisch kontaktiert werden. Der Abstand von 5:1 (5 Reihen nicht-leitfähiges Garn, 1 Reihe leitfähiges Garn) hat sich hier als für die Abscheideeffizienz und für die Kontaktierung als optimale Kombination herausgestellt.

Um die Überschläge noch sicherer zu vermeiden, wurde das leitfähige Edelstahlfasergarn auf der Umwindanlage des TFI umwunden. Dazu wurde ein texturiertes Polyester-garn von TWD, 181-192 dtex mit 65 U/m in S-Richtung eingesetzt. Das umwundene Garn ließ sich zudem deutlich besser auf der Einnadeltuftingmaschine verarbeiten als das reine Edelstahlfasergarn, da dieses schnell bricht schnell und eine hohe Reibung an den Maschinenteilen erzeugt.

Die im Arbeitspaket geplanten Untersuchungen zur Polnoppenauszugskraft und Fasereinbindung der getufteten Proben wurden in Rücksprache mit dem Projektbegleitenden Ausschuss nicht durchgeführt, da bereits in den ersten Versuchen zur Abscheideeffizienz eine für diese Anwendung ausreichende Polnoppenauszugskraft und Fasereinbindung zu erkennen war. Stattdessen wurden die Tuftingversuche mit mehr Variationen als vorgesehen ausgeweitet, besonders im Hinblick auf ein Vermeiden der Überschläge beim Anlegen der Hochspannung.

3.2.2 Schalldämpfungseigenschaften

Als Nebenziel des Projekts sollte untersucht werden, inwiefern die voluminösen getufteten Strukturen zu einer Verminderung des Geräuschpegels des Luftreinigers erzielt werden. Dazu wurden zunächst die akustischen Eigenschaften der kleinformatigen Filterronden im Impedanzrohr nach DIN EN ISO 10534-2 (siehe Abbildung 12, Abbildung 13 und Abbildung 14) untersucht.

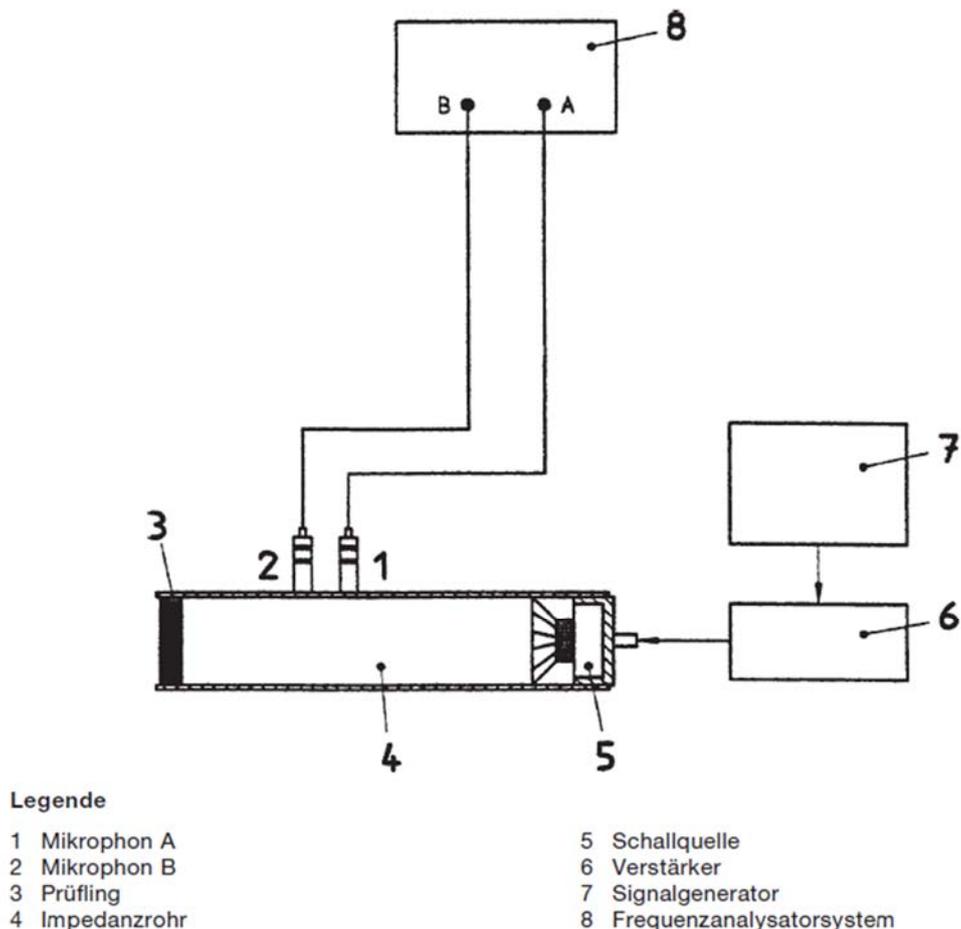


Abbildung 12: Prinzip der Messung im Impedanzrohr nach DIN EN ISO 10534-2

Bei der Prüfung wird eine Schallwelle gegen die Probe ausgesendet und der resultierende Schalldruck wird mit den zwei vor der Materialprobe befindlichen Mikrofonen gemessen. Die einfallenden und reflektierten Schallenergien werden gemessen, um so das Schallabsorptionsvermögen des Materials zu bestimmen. Als Referenz wurden zusätzlich zu den getufteten Filterronden herkömmliche Filtermedien und der Tuftingträger ohne Polschicht geprüft. Gemessen wurde in einem Frequenzbereich von 50 – 5000 Hz.



Abbildung 13: Fotografie des Impedanzrohrs mit eingebauter Filterprobe



Abbildung 14: Impedanzrohr mit eingebauter Schlingen- bzw. Schnittpolprobe

Die Ergebnisse zeigen, dass ab einem Frequenzbereich von 630 Hz die Schallabsorption bei allen geprüften Proben ansteigt. Die ermittelte Schallabsorption der Proben zeigt, dass die getufteten Filtermedien wie ein poröser Schallabsorber wirken. Somit hat die

Tuftingstruktur eine messbar positive Auswirkung auf die Schallabsorption im hohen Frequenzbereich. Zudem zeigt sich, dass ein höherer Materialeinsatz im Pol durch eine erhöhte Polhöhe oder Garnfeinheit zu einer höheren Schallabsorption führt.

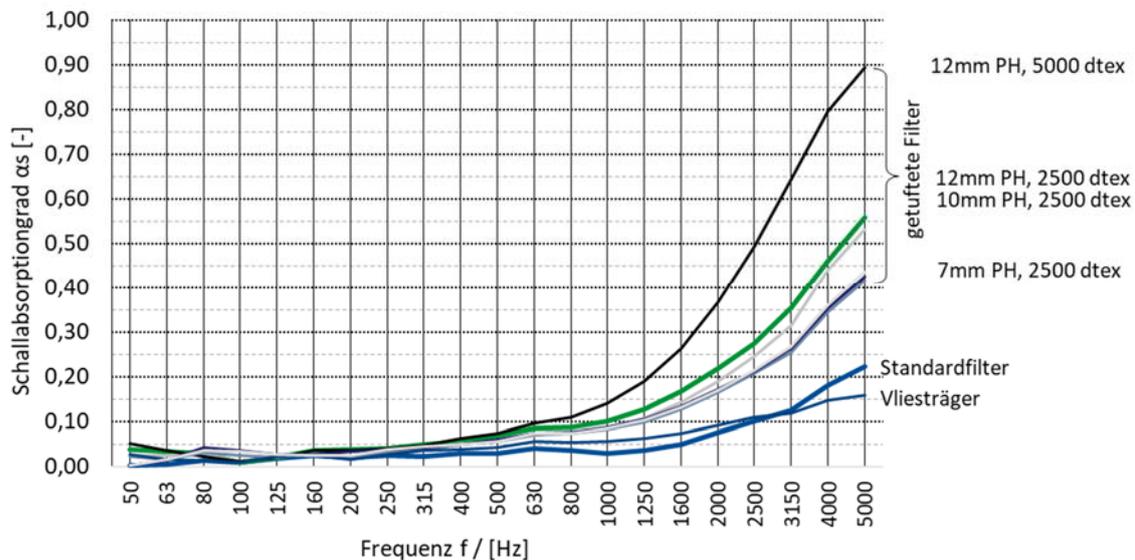


Abbildung 15: Schallabsorptionsgrad der getufteten Filterrunden im Vergleich zu einem Standardfilter und dem Tuftingträger

3.3 Experimentelle Überprüfung der Filterrunden (AP 3)

3.3.1 Messung der mechanischen Abscheideeffizienz

Es wurden verschiedene im Rahmen von AP 2 hergestellte Strukturen am Filtermedienprüfstand des IUTA in Hinblick auf ihre Abscheideeffizienz untersucht. Dabei wurde eine für Luftreiniger typische Anströmgeschwindigkeit von 10 cm/s gewählt. Als Prüfaerosol wurde ein polydisperses Aerosol aus Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS) verwendet, welches mit einem optischen Partikelzähler vermessen wurde, um den Größenbereich von etwa 0,2 – 2 μm abzudecken. Da in diesem Bereich die Partikelgröße mit der höchsten Penetration (Most Penetrating Particle Size, MPPS) zu erwarten ist, kann so die minimale Effizienz bestimmt werden.

In einem ersten Schritt wurden zwölf verschiedene Konstruktionen mit Polyestergeräten in Hinblick auf ihre Abscheideeffizienz geprüft (siehe Abbildung 16). Diese unterschieden sich in Parametern wie Polhöhe, Teilung, Stichdichte und Feinheit des leitfähigen Polgarns. Es konnten jedoch keine systematischen Unterschiede zwischen den Proben in Abhängigkeit der Herstellungsparameter identifiziert werden. Bei allen Proben zeigten sich zwar geringe Druckverluste von etwa 4 bis 12 Pa im Vergleich zum Trägermaterial, jedoch lag die Abscheideeffizienz mit etwa 5 % im MPPS auch nicht signifikant höher als

ohne die Tuftingstruktur. In Hinblick auf das zuvor definierte Anforderungsprofil erwiesen sich diese Garne also als ungeeignet und wurden deshalb nicht weiter genutzt.

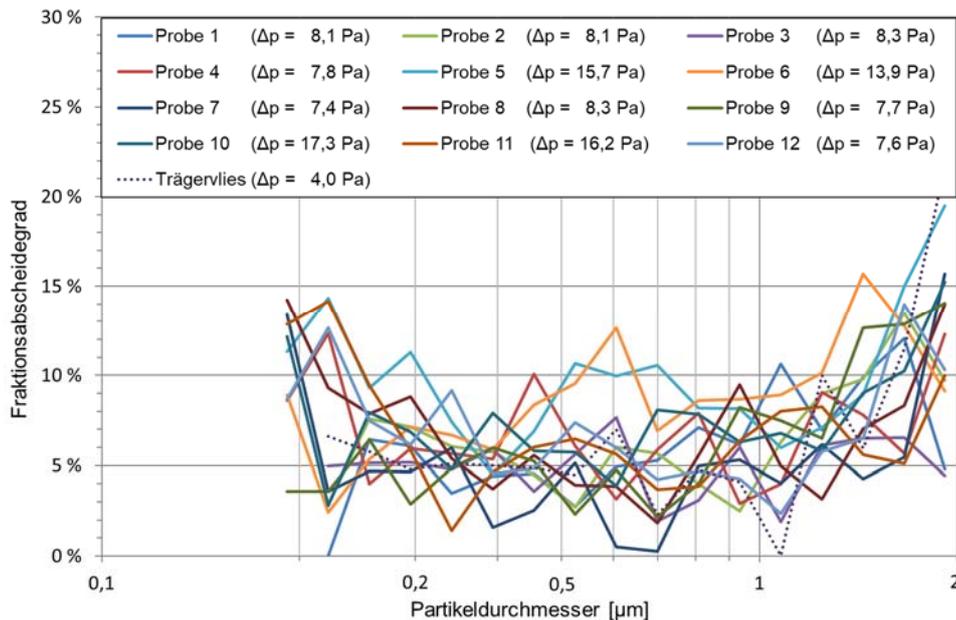


Abbildung 16: Fraktionsabscheidegrade für zwölf verschiedene Tuftingstrukturen aus Polyestergerne mit dem zugehörigen Trägervlies (gepunktete Linie).

Da sich die Polyestergerne als für den Anwendungszweck nicht geeignet erwiesen haben, wurden in einem nächsten Schritt isolierende Mikrofasergarne untersucht. Die Fraktionsabscheidegrade und Druckverluste für zehn verschiedene Strukturen sind in Abbildung 17 gezeigt. Die Proben sind dabei grundsätzlich nach absteigendem Druckverlust sortiert. Dabei lassen sich verschiedene Gruppen unterscheiden. Probe 3 weist den höchsten Abscheidegrad mit etwa 65 % im MPPS, jedoch beim höchsten Druckverlust von 148 Pa auf (grüne Kurve). Im Mittelfeld (blaue Kurven) liegen mehrere Medien mit minimalen Abscheideeffizienzen von etwa 40 bis 50% und Druckverlusten zwischen 70 und 140 Pa. In einer dritten Gruppe (rote Kurven) liegen schließlich Medien mit deutlich geringeren minimalen Abscheideeffizienzen von etwa 20 bis 30 % bei Druckverlusten von 34 bis 58 Pa. Die mechanische Abscheideeffizienz ist also wie erwartet eng mit dem Druckverlust korreliert. Den besten Kompromiss bildet dabei Probe 11, die die zweithöchste minimale Abscheideeffizienz von etwa 50 % bei einem im Mittelfeld liegenden Druckverlust von 78 Pa aufweist. Somit diene die hier verwendete Struktur als Ausgangspunkt für die weiteren Entwicklungen.

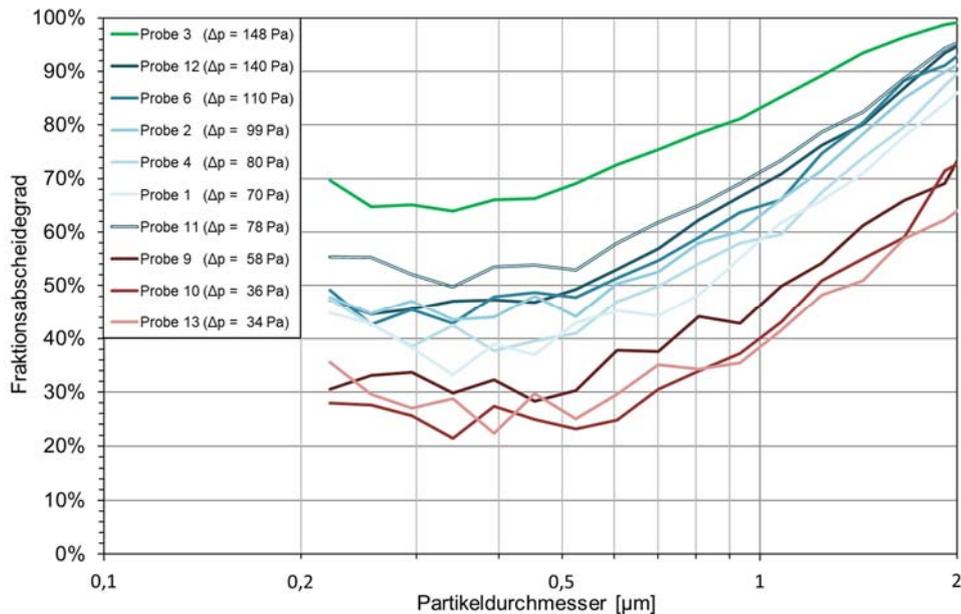


Abbildung 17: Fraktionsabscheidegrade für zehn Tuftingstrukturen basierend auf Mikrofasergarnen.

3.3.3 Untersuchung getufteter triboelektrischer Filtermedien

Als Nebenstudie wurde im Rahmen des Projekts untersucht, inwiefern sich mittels der Tuftingtechnologie triboelektrische Filtermedien herstellen lassen. Solche Medien nutzen das Prinzip der Triboelektrizität, bei dem sich elektrische Ladungen durch Reibung zwischen verschiedenen Materialien lokal separieren lassen. Durch gezielte Kombination von Materialien von unterschiedlichen Enden der triboelektrischen Reihe lassen sich die Eigenschaften entsprechend optimieren. Die triboelektrische Reihe gibt die Elektronenaffinität eines Materials an. Je weiter ein Material am positiven Ende der Reihe steht, desto mehr Elektronen gibt es bei Reibung an ein Material ab, welches weiter am negativen Ende der Reihe steht. Für die hier dargestellten Versuche wurde deshalb ein Polyestergergarn vom positiven Ende der triboelektrischen Reihe mit Glasfasern kombiniert, welches am negativen Ende der triboelektrischen Reihe zu finden ist. Als Referenz wurde ein reines Glasfasermedium getuftet und zur Untersuchung der triboelektrischen Eigenschaften in zweiten Medium jede fünfte Reihe durch das Polyestergergarn ersetzt. Beide Proben wurden sowohl als Schling- als auch als Schnittware ausgeführt. Die gemessenen Fraktionsabscheidegrade sind in Abbildung 18 gezeigt. Dabei konnten jedoch keine Unterschiede zwischen der Fasermischung und der reinen Glasfaser beobachtet werden. Offenbar ist also die makroskopische Durchmischung der beiden Materialien nicht ausreichend, um eine ausreichende triboelektrische Ladungsseparation zu erhalten, sondern es bedarf einer mikroskopischen Durchmischung auf der Größenskala der Einzelfasern.

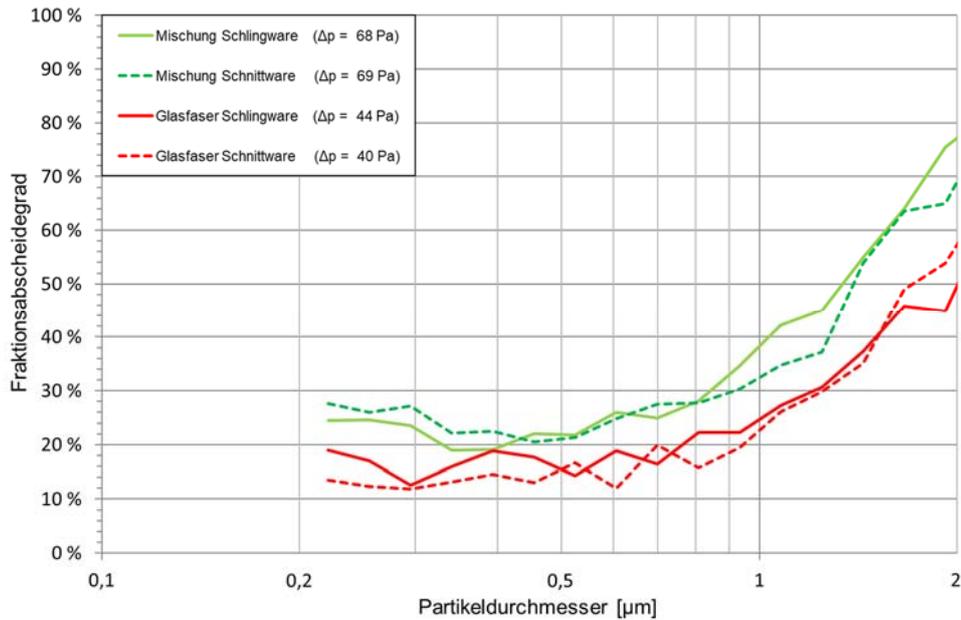


Abbildung 18: Fraktionsabscheidegrade für zwei Glasfaser/Polyester-Mischungen im Vergleich zu reinen Glasfaser-Tuftingstrukturen.

3.3.4 Aufbau eines Prüfstands zur elektrischen Kontaktierung

Nachdem sich getuftete Strukturen auf Basis von Mikrofasergarnen als geeignete Kandidaten für die weiteren Untersuchungen erwiesen haben, wurde als nächster Schritt ein Prüfstand zu elektrischen Kontaktierung der Proben entwickelt, da der standardisierte Filtermedienprüfstand dies nicht erlaubt. Der neu entwickelte Prüfstand ist in Abbildung 19 gezeigt und besteht aus mehreren miteinander verbindbaren zylindrischen Rohrteilen. Am Anfang des Kanals wird ein über einen Massenflussregler kontrollierter Luftstrom in den Kanal eingebracht und das Prüfaerosol zudosiert. In der Mitte des Kanals wird das Filtermedium in eine individuell gefertigte Maske mit geeignetem Querschnitt platziert und vom Prüfaerosol durchströmt. Die Kontaktierung erfolgt über mit einem Hochspannungsnetzteil verbundene Kabel, welche von Kanalende aus zur Probe geführt werden. Über zwei Probenahmestellen können die Roh- und Reingaskonzentration vor und hinter dem Filter gemessen werden.



Abbildung 19: Selbstentwickelter Prüfkanal zur elektrischen Kontaktierung der getufteten Proben und Messung des Fraktionsabscheidegrads.

3.3.3 Messung der Abscheideeffizienz mit Kontaktierung

Bei der Untersuchung der ersten Proben stellte sich jedoch heraus, dass der elektrische Widerstand zwischen den alternierend angeordneten leitfähigen Garnreihen zu gering war, um diese auf unterschiedliche Potenziale zu legen. Bereits bei geringen angelegten Spannungen von wenigen Volt wurde die Strombegrenzung der Mittelspannungsquelle von 1 mA erreicht, was auf Isolationswiderstände in der Größenordnung von einigen k Ω hindeutet. Es wurde untersucht, ob querliegende leitfähige Fäden ein Problem darstellen, was jedoch als Ursache ausgeschlossen werden konnte. Um auszuschließen, dass eine hydrophile Avivage auf dem isolierenden Garn dessen Leitfähigkeit erhöht, wurden die Proben gewaschen und anschließend erneut kontaktiert, was das Problem jedoch nicht beseitigen konnte.

Da zunächst keine Lösung für die mangelnde Isolation zwischen den leitfähigen Garnreihen gefunden werden konnte, wurden zunächst Vorversuche durchgeführt, bei denen alle leitfähigen Garne auf das gleiche Potential gelegt wurden und die geerdete Kanalwand als Gegenelektrode diente. Wie in Abbildung 20 dargestellt, zeigte sich jedoch bei Spannungen bis zu 4,5 kV am Filtermedium keine signifikante Erhöhung der Abscheideeffizienz, da die Feldstärken aufgrund der großen Abstände nicht ausreichten. Auch die zusätzliche Aufladung der Partikel mit einem selbstentwickelten Diffusionsauflader konnte keine erkennbare Verbesserung der Abscheidung erzielen.

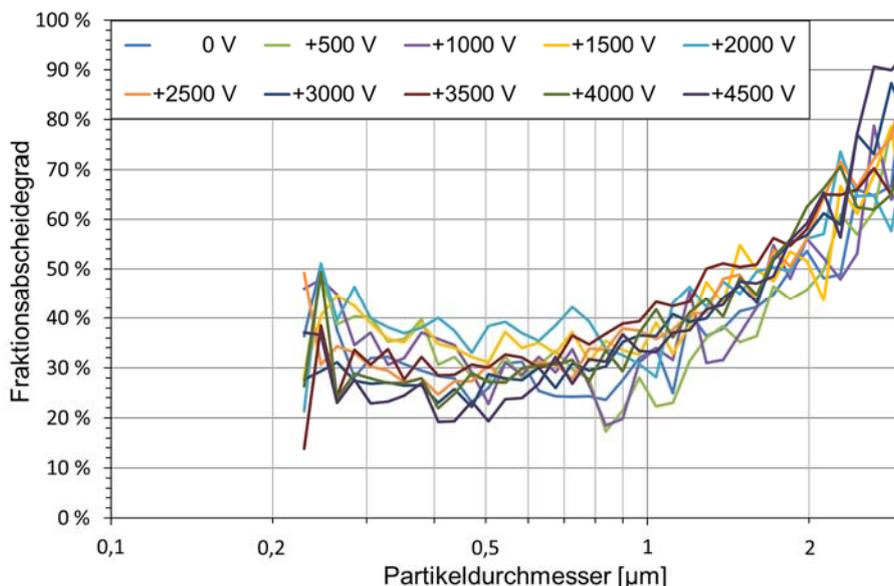


Abbildung 20: Fraktionsabscheidegrade eines getufteten Filtermediums bei Anlegen zunehmender positiver Spannung an jede alle leitfähigen Garnreihen. Die geerdete Kanalwand bildet dabei die Gegenelektrode.

Da die Ergebnisse gezeigt haben, dass offenbar das ursprünglich geplante Ansatz der Schaffung interdigitaler Strukturen mit entgegengesetzter Polarität essentiell für eine Erhöhung der Abscheideeffizienz durch eine angelegte Spannung ist, wurde weiter intensiv nach einer Lösung des Problems gesucht. Dazu wurde systematisch der Abstand zwischen den leitfähigen Reihen erhöht, bis schließlich bei einer Aufteilung von fünf isolierenden Reihen gefolgt von einer leitfähigen Reihe Spannungen bis zu etwa 4 kV ohne Überschläge angelegt werden konnten. Eine dieser Proben ist in Abbildung 21 für positive und negative Polarität der angelegten Spannung gezeigt.

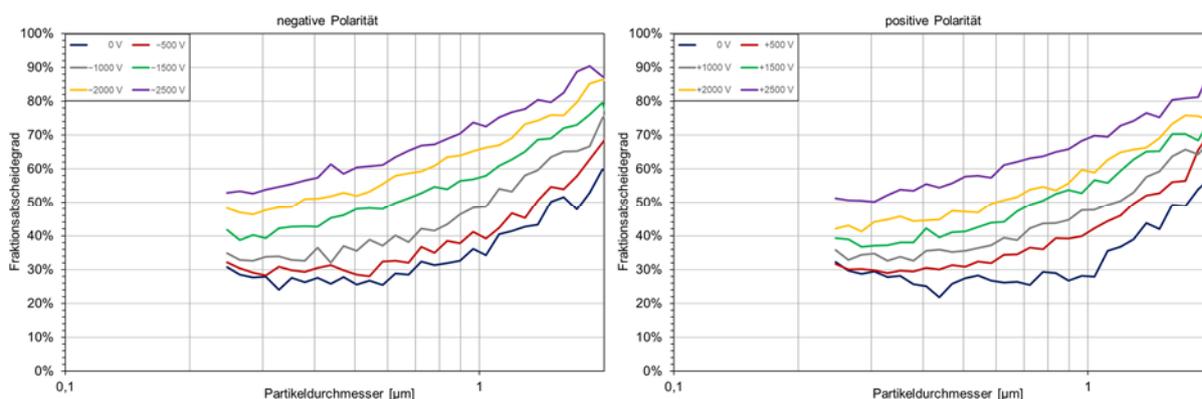


Abbildung 21: Steigerung des Fraktionsabscheidegrads eines getufteten Filtermediums bei Anlegen zunehmender negativer (links) oder positiver (rechts) Spannung an jede zweite leitfähige Garnreihe. Die übrigen Garnreihen sind geerdet und bilden so die Gegenelektrode.

Durch das Anlegen einer Spannung von bis zu 2,5 kV konnte eine Erhöhung der Abscheideeffizienz im MPPS von etwa 30 % auf etwa 50 % erreicht werden. Gleichzeitig verschiebt sich die Lage des MPPS von etwa 0,5 µm zur kleineren Partikelgrößen von etwa 0,3 µm. Der Anstieg erfolgt dabei graduell mit ansteigender Spannung, wobei es keine deutlichen

Unterschiede zwischen negativer und positiver Polarität gibt. Zum Vergleich wurde in Abbildung 22 ein weiteres Medium mit ähnlicher Struktur untersucht, welches einen ähnlichen Effekt zeigt. Hier konnte eine höhere Spannung von bis zu 4,5 kV angelegt werden, bevor es zu Überschlägen kam, sodass hier eine noch deutlichere Erhöhung der Abscheideeffizienz von etwa 30 % auf über 60 % im MPPS erreicht werden konnte.

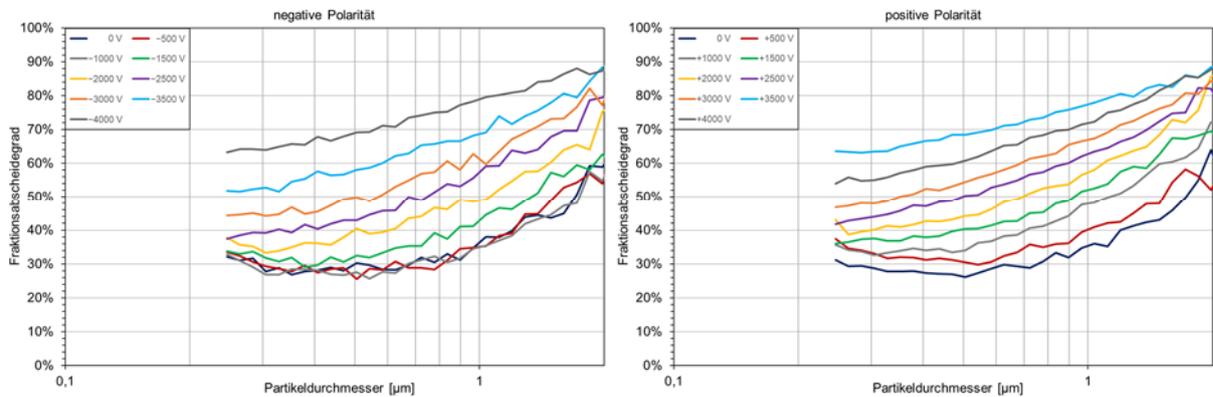


Abbildung 22: Steigerung des Fraktionsabscheidegrads eines getufteten Filtermediums bei Anlegen zunehmender negativer (links) oder positiver (rechts) Spannung an jede zweite leitfähige Garnreihe. Die übrigen Garnreihen sind geerdet und bilden so die Gegenelektrode.

3.3.3 Einfluss der Herstellungsparameter

Im Folgenden wurden verschiedene Herstellungsparameter der Tuftingstruktur variiert. Ursprünglich wurde davon ausgegangen, dass Schnittpol zu einer höheren Abscheideeffizienz führt, da die einzelnen Filamente an den aufgeschnittenen Enden aufbauschen können. Der in Abbildung 23 gezeigte Vergleich mit einer Schlingware bei ansonsten gleichen Parametern zeigt jedoch keine signifikanten Unterschiede in der Abscheideeffizienz. Auch der Druckverlust von 42 Pa bei der Schnitt- und 36 Pa bei der Schlingware liegt auf vergleichbarem Niveau. Da bei der Schlingware ein zusätzlicher Verarbeitungsschritt entfällt und die Struktur in sich stabiler ist, führt dies zu der Schlussfolgerung, dass die Schlingware für das zu entwickelnde Produkt besser geeignet ist.

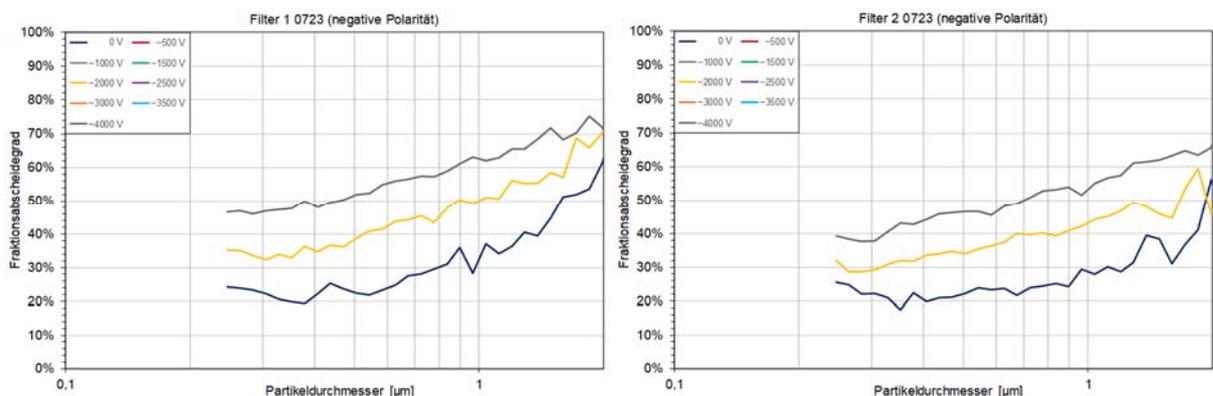


Abbildung 23: Steigerung des Fraktionsabscheidegrads der gleichen Tuftingstruktur als Schnittware (links) und Schlingware (rechts) gemessen bei negativer Polarität.

Darüber hinaus wurde untersucht, wie sich Teilung und Stichdichte auf den Fraktionsabscheidegrad auswirken. Der Vergleich in Abbildung 24 zeigt, dass durch eine feinere Teilung und höhere Stichdichte der Fraktionsabscheidegrad zwar erhöht werden kann, jedoch auf Kosten eines Druckverlustanstiegs von 42 Pa auf 115 Pa. Gemäß dem zu Beginn definierten Anforderungsprofil stellt sich somit die gröbere Teilung und niedrigere Stichdichte für den hier verfolgten Anwendungszweck als geeigneter heraus.

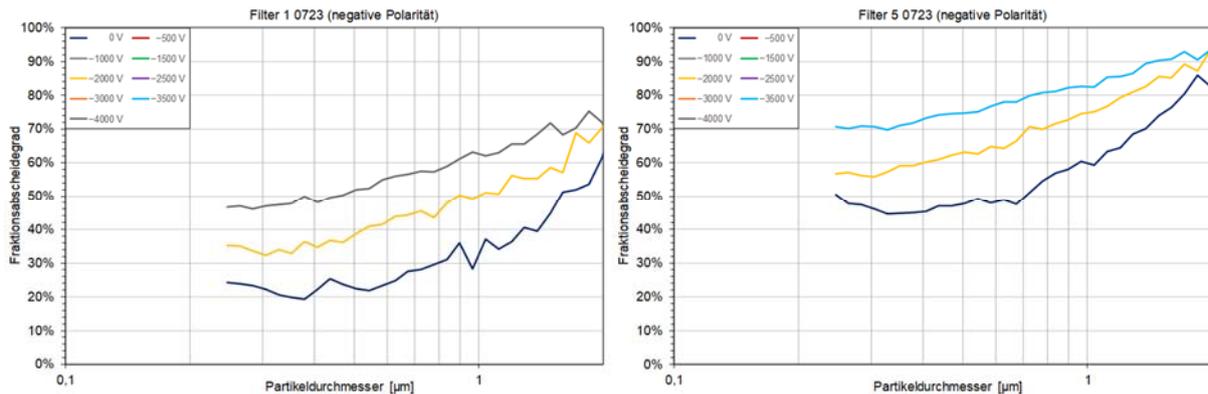


Abbildung 24: Steigerung des Fraktionsabscheidegrads einer Tuftingstruktur mit gröberer Teilung und niedrigerer Stichdichte (1/7", 35 Stiche pro 10 cm, links) sowie feinerer Teilung und höherer Stichdichte (1/10", 40 Stiche pro 10 cm, rechts) gemessen bei negativer Polarität.

Einen ähnlichen Effekt zeigt auch die Polhöhe. Durch eine geringere Polhöhe wird das Material kompakter, sodass wie in Abbildung 25 gezeigt zwar die Abscheideeffizienz leicht steigt, wiederum allerdings zu Lasten eines Druckverlustanstiegs von 42 Pa auf 65 Pa. Eine möglichst große Ausnutzung der Dreidimensionalität der getufteten Strukturen ist also von Vorteil.

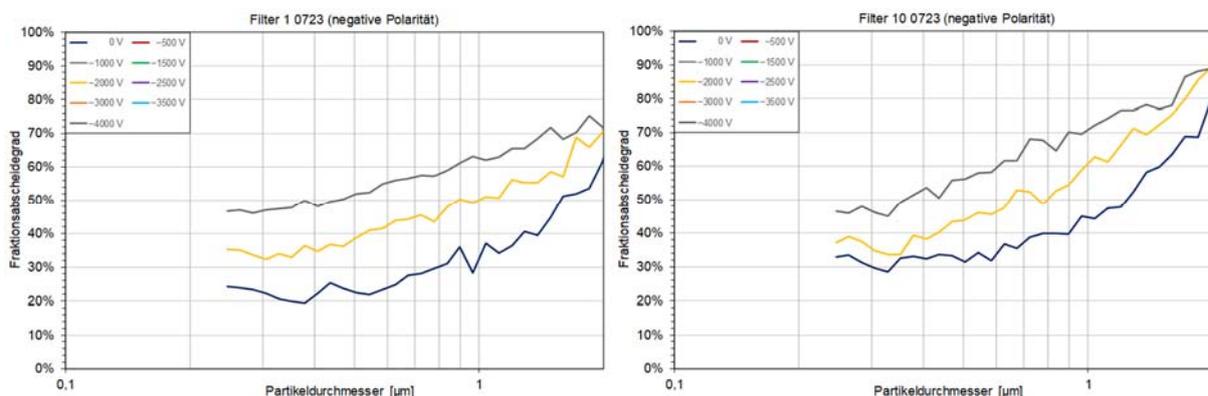


Abbildung 25: Steigerung des Fraktionsabscheidegrads einer Tuftingstruktur mit größerer Polhöhe (19/10 mm für isolierendes/leitfähiges Garn, links) und niedrigerer Polhöhe (13/5 mm für isolierendes/leitfähiges Garn, rechts) gemessen bei negativer Polarität.

3.3.3 Proben mit einsetzender Coronaentladung

Bei einzelnen Proben wurde ein plötzlicher sprunghafter Anstieg der Abscheideeffizienz auf über 90 % beim Überschreiten einer gewissen Spannung beobachtet. Bei der in Abbildung 26 gezeigten Probe war dies beispielsweise für negative Spannungen ab -2 kV und für positive Spannungen ab $+3$ kV der Fall. Da gleichzeitig auch der an der Spannungsquelle gemessene Emissionsstrom anstieg, wird dieser Effekt darauf zurückgeführt, dass im Filtermedium eine stabile Coronaentladung an den leitfähigen Garnen eingesetzt hat, die zu einer lokalen Aufladung der Partikel und damit einer erhöhten Abscheideeffizienz führt. Es wurde untersucht, inwiefern der Effekt mit den Konstruktionsparametern korreliert, jedoch konnten keine systematischen Zusammenhänge festgestellt werden. Es wurde eine weitere Probe mit den gleichen Parametern gefertigt, die jedoch wieder den oben beschriebenen graduellen Anstieg der Abscheideeffizienz auf maximal 60 % zeigte. Der Effekt bietet somit einen interessanten Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen, konnte jedoch im Rahmen des Projekts nicht reproduzierbar erreicht werden. Zudem bleibt zu überprüfen, ob ihm Rahmen der Coronaentladung auch Ozon produziert wurde, was es für reale Anwendungsfälle zu vermeiden gilt.

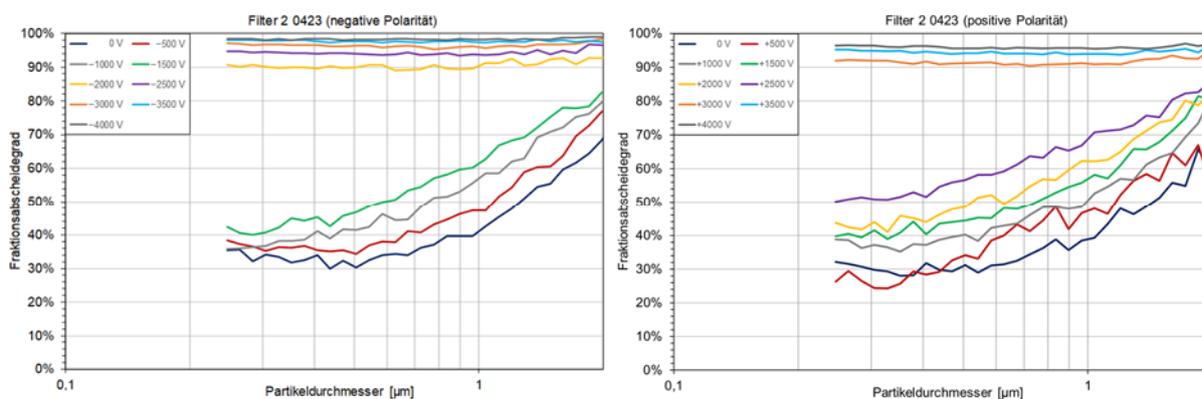


Abbildung 26: Sprunghafter Anstieg der Abscheideeffizienz beim Überschreiten einer bestimmten negativen (links) oder positiven (rechts) Spannung am Filter.

3.4 Konfektionierung vollformatiger Filter (AP 4)

3.4.1 Entwicklung und Kontaktierung von Filtern

Nachdem die Filterronden hergestellt und erprobt wurden, wurden die optimalen Maschineneinstellungen vom Labor- auf den Pilotmaßstab übertragen und adaptiert, um den daraus gefertigten Filter in einen handelsüblichen Raumlufreiniger einbauen zu können. Die Parameter der in Hinblick auf Abscheideeffizienz und Druckverlust besten Konstruktion sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Spezifikation vollformatiger Filter

Parameter	Spezifikation
Trägermaterial	SM 100 (siehe Tabelle 4)
Isolierendes Polgarn	Polyester, 690 dtex, f 1152,
Leitfähiges Polgarn	Edelstahlfasergarn Nm11/2/2 Filtec, umwunden mit PET, DTY,
Polart	Schlingenpol
Polhöhe leitfähiges Garn	10 mm
Polhöhe isolierendes Garn	19 - 20 mm
Teilung	1/7"
Stichdichte	35 Stiche / 10 cm
Konstruktion isolierend – leitfähig	5 - 1

Zur elektrischen Kontaktierung der vollformatigen Filter wurde der umlaufende Rand stabilisiert. Dazu wurde eine TPU-Folie (thermoplastisches Polyurethan) mit einem Polyestervlies aufkaschiert.



Abbildung 27: Randverstärkter Filter

Als Leiterbahn wurde ein Kupferstreifen aufgebracht (siehe Abbildung 28).



Abbildung 28: Kupferstreifen auf umlaufendem Rand auf der Rückseite des Filters

Anschließend wurden die Garne mit leitfähigem Klebstoff kontaktiert (siehe Abbildung 29 und Abbildung 30).



Abbildung 29: Leitfähiger Klebstoff zur Kontaktierung der leitfähigen Garne



Abbildung 30: Rückenansicht eines Filters inkl. Kupferstreifen und Kontaktierung der leitfähigen Garne

3.4.2 Untersuchungen zur Plissierbarkeit

Zur Überprüfung der Plissierbarkeit der getufteten Filterstrukturen wurden ein Prüfstand für die entwickelt. Dazu wurde ein Blech in 90° Winkeln abgekantet. Die Schenkellänge beträgt jeweils 45 mm (siehe Abbildung 31). Das Plissieren wurde als Thermoformprozess mit Heißluft durchgeführt (siehe Abbildung 32).



Abbildung 31: Abgekantetes Blech für den Plissierprüfstand

Zunächst wurde mit Hilfe eines reinen Tuftingträgervliesstoffs die Funktionsfähigkeit des Plissierprüfstands überprüft.



Abbildung 32: Thermoformprozess zur Plissierung mit Heißluft

Nach der Abkühlung des Trägermaterials blieb die plissierte Struktur erhalten (siehe Abbildung 33).



Abbildung 33: Plissierter Tuftingträgervliesstoff

Zur Untersuchung der Plissierbarkeit getufteter Strukturen wurden zunächst textile Strukturen auf der Einnadeltuftingmaschine getuftet und anschließend am Plissierprüfstand plissiert. Prinzipiell konnte eine Plissierung erreicht werden, jedoch wurde bei der angestrebten Polhöhe von 20 mm (18,8 mm real) und der möglichen Filterdicke von 34 mm die Oberfläche zu stark verdichtet bzw. aufgelöst (siehe Abbildung 34). Über dem konvexen Radius fächert sich die Polschicht auf, während sie sich über dem konkaven Radius verdichtet. Dies führt zu ungleichmäßigen Filterleistungen über die Fläche des Filters. In komprimierten Bereichen ist der Pol zu dicht für die Durchströmung, während er in den aufgefächerten Bereichen zu offen wird und zu viel Luft hindurchströmt, die nicht mehr optimal gefiltert werden kann. Daher wurde das Plissieren von getufteten Strukturen für den hier angestrebten Einsatz nicht weiterverfolgt.

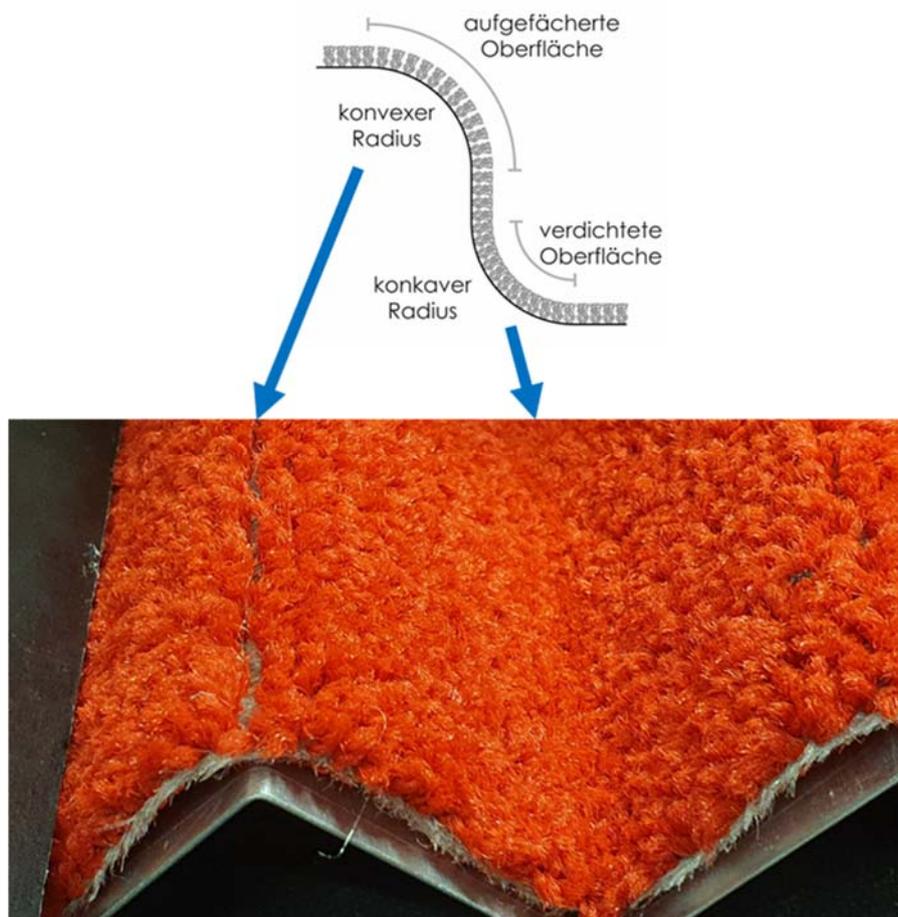


Abbildung 34: Verdichten und Aufzeilen der Polstruktur

3.4.3 Untersuchungen zur Waschbarkeit

Die Waschbarkeit des vollformatigen Filtermaterials wurde in einer handelsüblichen Spülmaschine (Constructa CG5IS01ITE) untersucht. Dabei wurde die Auswirkung von zwei

unterschiedlich intensiven Waschprogrammen und der Einsatz einer Waschsubstanz auf den Filter untersucht.

Tabelle 6: Parameter der beiden genutzten Waschprogramme

Eco 50 °C ½ Load → 3 h 50 min	Intensive 70 °C ½ Load → 1 h 50 min
Vorspülen	Vorspülen
Reinigen 50 °C	Reinigen 70 °C
Zwischenspülen	Zwischenspülen 69 °C
Klarspülen 68 °C	-
Trocknen	Trocknen

Für den Waschversuch wurden drei vollkonfektionierte Filtermedien mit einer provisorischen Rahmenkonstruktion versehen, um die Filter möglichst realitätsnah in der Spülmaschine zu platzieren (siehe Abbildung 35). Aufgrund der Größe der in die Rahmen eingespannten vollkonfektionierten Filter konnten diese nur horizontal in die Spülmaschine eingebracht werden (siehe Abbildung 36)

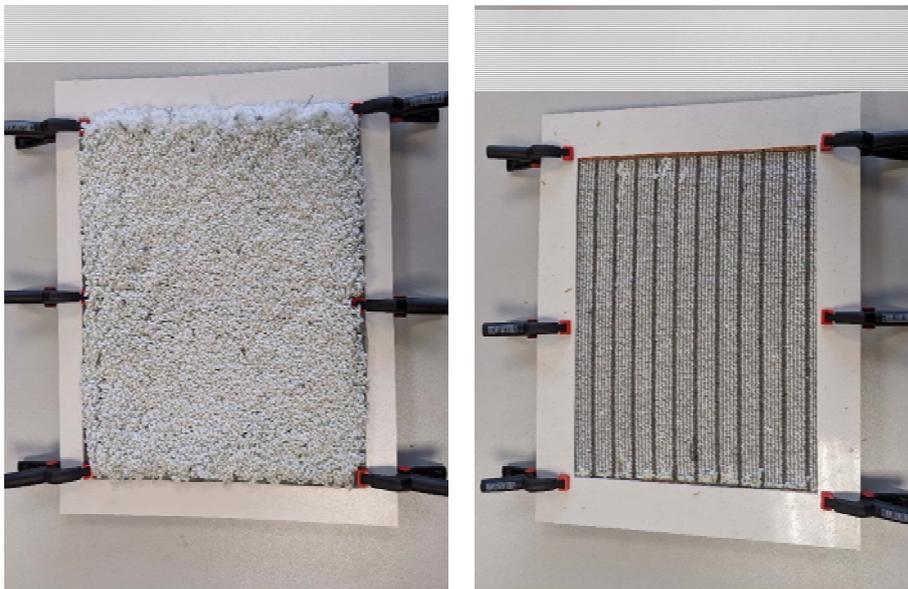


Abbildung 35: Vorder- und Rückseite der Rahmenkonstruktion für den Waschversuch mit Einspannung

Pro Probe wurde je ein Waschversuch durchgeführt, der sich in der gewählten Temperatur und Waschsubstanz unterscheidet (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Darstellung der verschiedenen Waschversuche

Probe	Waschprogramm	Waschsubstanz
1	Eco 50 °C ½ Load	ohne
2	Eco 50 °C ½ Load	Spülmaschinentab (Somat Classic)
3	Intense 70 °C ½ Load	Spülmaschinentab (Somat Classic)



Abbildung 36: Platzierung des Filters mit Rahmen in der Spülmaschine

Vor und nach den Waschversuchen wurde der elektrische Widerstand gemessen, um eine Beeinträchtigung der Leitfähigkeit durch den Waschvorgang und durch die Kontamination mit der Waschsubstanz zu ermitteln. Zusätzlich wurde die Stromaufnahme gemessen (siehe Abbildung 37).



Abbildung 37: Messung der Stromaufnahme

An beiden Kupferstreifen wurden Klemmen fixiert und eine Spannung von 30 V angelegt. Es wurde kein Stromfluss zwischen den Polen gemessen. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Reihen der leitfähigen Garne sich auch nach dem Waschen nicht kontaktieren.

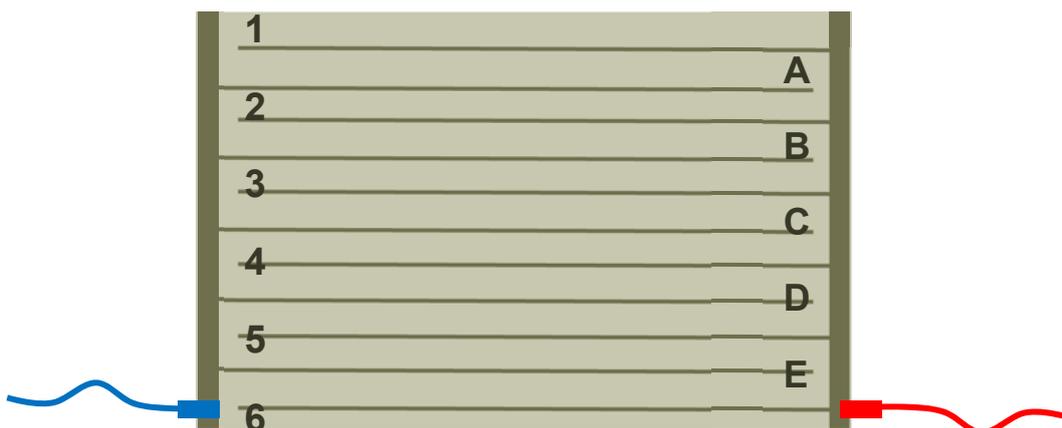


Abbildung 38: Schematische Darstellung der Widerstandsmessung

Der Widerstand der leitfähigen Garne wurde anhand eines Multimeters mit 20 K Ω gemessen. Eine Klemme wurde fest auf dem Kupferstreifen fixiert. Von diesem Punkt (blau \rightarrow A - E, rot \rightarrow 1 - 6) aus wurde der Widerstand bis zum Ende der jeweiligen getufteten Reihe gemessen (siehe Abbildung 38).

Tabelle 8: Messergebnisse der Widerstandsmessung aller drei Proben, ungewaschen und gewaschen

Probe	Widerstand in k Ω											Durchschnitt
	1	2	3	4	5	6	A	B	C	D	E	
I a.	2,5	0,7	3,4	2,1	1,6	0,7	0,6	0,5	0,8	0,8	0,6	1,30
I b.	1,2	0,8	1,1	1,2	1,6	3,3	0,9	0,8	1,4	1,7	1,5	1,41
II a.	0,5	0,5	1,9	2,5	0,7	0,8	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,81
II b.	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	4,0	0,7	0,8	0,7	0,6	1,1	0,99
III a.	1,4	1,1	0,5	0,5	0,4	0,6	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,59
III b.	1,0	0,4	0,3	0,4	0,4	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,46

a. = ungewaschen, b. = gewaschen

Die Durchschnittswerte der gemessenen Widerstände unterscheiden sich nicht signifikant zwischen den Proben im gewaschenen und ungewaschenen Zustand (siehe Tabelle 8). Ausreißer in den Messungen der Widerstände sind vermutlich auf schwache Kontaktierungen der leitfähigen Garne auf dem Kupferstreifen zurückzuführen. Durch das Waschen haben sich einige der Kontaktierungen (besonders bei Probe 2 und 3) gelöst und mussten vor der Messung erneuert werden.

Gravimetrische Untersuchungen sollten Aufschluss darüber geben, ob durch die Waschvorgänge ein Faserverlust auftritt. Vor dem Wiegen der Proben wurden diese über 24h im Normklima für Bauprodukte gelagert. Für die Messung nach den Waschversuchen wurden die Proben getrocknet und vor dem Wiegen erneut 24h im Normklima gelagert.

Die Proben wurden jeweils eine Minute auf der Waage gehalten, um eventuelle Schwankungen auszutarieren.

Tabelle 9: Darstellung der Masseveränderungen der Proben durch das Waschen

Probe	Masse [g]		Masseverlust [g]	Masseverlust [%]	Waschprogramm	Waschsubstanz
	Ungewaschen	Gewaschen				
1	143,174	142,362	0,812	1,2	Eco 50°C	ohne
2	137,128	136,293	0,835	1,1	Eco 50°C	Spültab
3	141,935	141,135	0,800	1,1	Intense 75°C	Spültab

Bei allen drei gewaschenen Proben zeigte sich ein sehr geringer Masseverlust von ca. 1% (siehe Tabelle 9). Zudem zeigten sich bei visueller Betrachtung der Polnoppen nach dem Waschen keine ersichtlichen Veränderungen. Die Faser- und Polnoppeneinbindung war damit auch ohne eine zusätzliche Verfestigung nach dem Tufting für diese Anwendung ausreichend.

Zusätzlich wurden vor und nach dem Waschen Aufnahmen mit einem KEYENCE digital Mikroskop gemacht und unter Normlicht fotografiert, um Veränderungen in der Garnstruktur nachzuweisen, welche mit bloßem Auge nicht erkennbar sind.



Abbildung 39: Probe 1; Draufsicht, links ungewaschen, rechts gewaschen



Abbildung 40: Probe 2; Draufsicht, links ungewaschen, rechts gewaschen



Abbildung 41: Probe 3; Draufsicht, links ungewaschen, rechts gewaschen

Abbildung 39, Abbildung 40 und Abbildung 41 zeigen eine Draufsicht der Proben vor und nach dem jeweiligen Waschvorgang. Hier ist bei den gewaschenen Proben ein mittiger Kreis zu erkennen, in dem die Polgarne verdichtet wirken. Dies ist auf die horizontale Einbringung der Filterproben in die Spülmaschine zurückzuführen. Der Kreis entsteht durch die Wirkung des horizontal oberhalb der Proben gelagerten Spülarms. Da in einer wirtschaftlichen Umsetzung der Forschungsergebnisse die Größe der Filter so konzipiert würde, dass eine vertikale Einbringung der Filter möglich ist, würde dieses Bild in der Praxis nicht entstehen.



Abbildung 42: Probe 1; Seitenansicht, links ungewaschen, rechts gewaschen



Abbildung 43: Probe 2; Seitenansicht, links ungewaschen, rechts gewaschen



Abbildung 44: Probe 3; Seitenansicht, links ungewaschen, rechts gewaschen

Abbildung 42, Abbildung 43 und Abbildung 44 zeigen Seitenansichten der ungewaschenen und gewaschenen Proben. Hier ist ein Aufquellen und Verdichten der gewaschenen Proben zu sehen. Besonders stark ist dies zu beobachten bei Probe 3, die die höhere Waschintensität in Kombination mit dem Einsatz eines Spültabs erfahren hat. Dies ist auch in den folgenden Abbildungen (Abbildung 45, Abbildung 46, Abbildung 47) zu beobachten.



Abbildung 45: Probe 1; Nahansicht, links ungewaschen, rechts gewaschen



Abbildung 46: Probe 2; Nahansicht, links ungewaschen, rechts gewaschen



Abbildung 47: Probe 3; Nahansicht, links ungewaschen, rechts gewaschen

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 48, Abbildung 49 und Abbildung 50) sind die Rückseiten der Filter dargestellt. Auch hier sind die Kreise zu sehen, die durch die Wirkung des Spülarms hervorgerufen werden. Zudem ist deutlich zu erkennen, dass die Polgarne durch den Waschvorgang aufquellen und sich verdichten. Auch hier ist die Wirkung bei dem intensivsten Waschvorgang an Probe 3 am stärksten zu beobachten. Des Weiteren treten nach dem Waschen vermehrt einzelne Noppen der leitfähigen Garne an die Oberfläche der Filter.



Abbildung 48: Probe 1; Rückseite, links ungewaschen, rechts gewaschen



Abbildung 49: Probe 2; Rückseite, links ungewaschen, rechts gewaschen

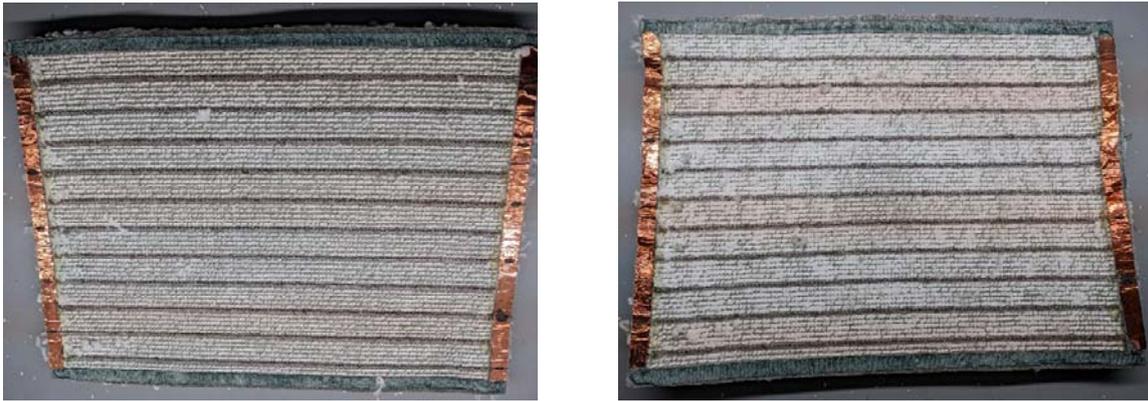


Abbildung 50: Probe 3; Rückseite, links ungewaschen, rechts gewaschen

Das Kupferband hat sich durch das Waschen teilweise (Proben 1 und 2) und etwas stärker bei Probe 3 gelöst. Zusätzlich wurde die Kontaktierung der leitfähigen Garne an das Kupferband durch das Spülmittel bei den Proben 2 und 3 (Abbildung 51) gelöst. Bei Probe



Abbildung 51: Probe 3; Nahaufnahme der Kontaktabbrüche

1 haben die Kontaktierungen besser gehalten, jedoch gab es auch hier zwei Kontaktabbrüche. Die digitalmikroskopischen Aufnahmen des leitfähigen Polgarns vor dem Waschen und nach den drei unterschiedlichen Waschvorgängen (Abbildung 52) zeigen in 20-facher Vergrößerung keine Veränderungen.

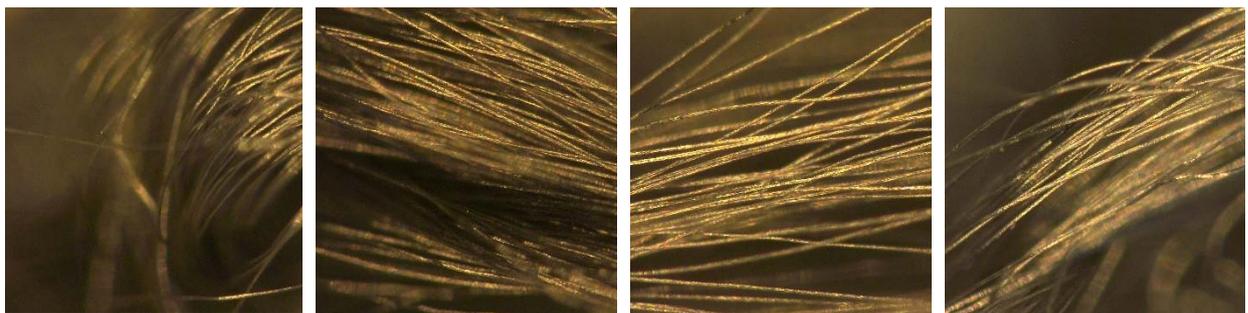


Abbildung 52: Digitalmikroskopische Aufnahmen des leitfähigen Garns; von links nach rechts: vor dem Waschen, Probe 1, Probe 2, Probe 3

Die rückseitigen digitalmikroskopischen Aufnahmen in 20-facher Vergrößerung (Abbildung 53) verdeutlichen das Aufquellen und Verdichten des Polgarns nach den Waschvorgängen. Dies ist verstärkt bei Probe 3 zu erkennen.



Abbildung 53: Digitalmikroskopische Aufnahmen des rückseitigen Polgarns; von links nach rechts: vor dem Waschen, Probe 1, Probe 2, Probe 3

Die Waschbarkeit der Filter wurde mit dieser Versuchsreihe bestätigt: Die Filter sind dimensionsstabil, die Leitfähigkeit der Garne wird nicht beeinträchtigt und es wird vermutet, dass die strukturellen Veränderungen der Fasern die Funktionalität der Filter nicht einschränken. Sowohl die unterschiedlichen Spülprogramme als auch die Verwendung von einer Waschsubstanz haben keine signifikanten Auswirkungen auf die mechanische Stabilität der Filter. Jedoch scheint das Waschen auf geringerer Temperatur geeigneter, da die Fasern der Probe 3, welche bei 70 °C gewaschen wurde, stärker aufgequollen sind als die der Proben 1 und 2. Alle drei Proben verloren ca. 1% an Masse. Die Verwendung der Spülmaschine scheint für das Waschen der Filter angemessen. Wobei sich die Faserstruktur durch das horizontale Einbringen und die damit einhergehende Beanspruchung durch die rotierenden Spülelemente bei einem Waschzyklus deutlich verändert hat.

3.4.3 Konfektionierung mit Rahmen und Anschlüssen

Für die Überprüfung der vollformatigen Filter im tatsächlichen Raumlufreiniger wurde die getuftete Struktur in einen Originalrahmen eingebaut. Dazu wurde der plissierte Vliesstofffilter vorsichtig aus dem Kartonrahmen entfernt, während Aktivkohle- und Vorfilter im Rahmen verblieben. Anschließend wurde der Vliesstofffilter durch ein passendes Stück der zuvor entwickelten getufteten Struktur ersetzt und mit Holzleisten am Rand abgedichtet. Durch die dreidimensionale Filterstruktur füllt das Medium die Lücke auch ohne eine Plissierung (siehe Abbildung 54).



Abbildung 54: Einbau der getufteten Filterstruktur in den Originalrahmen des Raumlufreinigers für die Überprüfung der vollformatigen Filter

3.5 Überprüfung der vollformatigen Filter (AP 5)

Im ursprünglichen Antrag war vorgesehen, die vollformatigen Filter vor Einbau in den Demonstrator zunächst an einem Filterprüfstand zu testen, der gemäß DIN 71460 für die Prüfung von Kfz-Innenraumfiltern konzipiert ist, die von Geometrie und Druckverlust ähnlich zu den in Raumlufreinigern verwendeten Filtern sind. Im Prüfstand lassen sich Volumenströme von 60 m³/h bis 600 m³/h realisieren, sodass der gesamte typische Volumenstrombereich von Raumlufreinigern abgedeckt ist. Vor Beginn der Messungen sind Anpassungen am Prüfstand erforderlich, um die Filter gegen die geerdete Wandung elektrisch zu isolieren und ein Potenzial anzulegen.

Da sich bei der zuvor beschriebenen Entwicklung der Filtermedien unerwartete Schwierigkeiten aufgetan haben, wurde im Projektverlauf entschieden, auf die Prüfungen an Filtern zu verzichten und stattdessen umfangreichere als ursprünglich geplante Untersuchungen an den kleinformatischen Filterrunden durchzuführen. Da sich Anströmgeschwindigkeiten und Prüfaerosole zwischen den Medien- und Filterprüfungen nicht unterscheiden, können somit grundsätzlich die gleichen Ergebnisse gewonnen werden, jedoch zeit-effizienter, da Anpassungen auf der Medienskala schneller umzusetzen sind als auf der Skala kompletter Filter. Somit ist durch die Umplanung kein nennenswerter Erkenntnisverlust zu erwarten, zumal die konfektionierten Filter im Demonstrator geprüft werden.

3.6 Aufbau und Erprobung eines Demonstrators (AP 6)

3.6.1 Auswahl eines Raumlufthereinigers

Im Rahmen der ersten Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses wurden Anforderungsparameter an einen Demonstrator definiert. Angestrebt wurde eine für den Haushaltsgerätebereich übliche CADR im Bereich von 200 m³/h bis 400 m³/h, idealerweise mit mehreren Intensitätsstufen, um den Einfluss der Anströmgeschwindigkeit untersuchen zu können. Zusatzfunktionen wie Ionisatoren sollten abschaltbar sein. Der Raumlufthereiniger sollte einen rechteckigen anstelle eines zylindrischen Filters besitzen, da dies die Fertigung erleichtert. Um die elektrische Kontaktierung zu erleichtern, sollte ein leichter Zugang z.B. durch die Rückwand des Raumlufthereinigers möglich sein. Gemeinsam mit dem Projektbegleitenden Ausschuss wurde der Raumlufthereiniger LR 500 der Beurer GmbH für die Untersuchungen als Demonstrator ausgewählt, da dieser alle oben genannten Anforderungen erfüllt. Da der Filter des Raumlufthereinigers durch zwei seitliche Öffnungen zwischen Gehäuse und Abdeckplatte abgeströmt wird, können die Kabel zur Kontaktierung dort herausgeführt und an eine Mittelspannungsquelle angeschlossen werden. Somit entfallen die ursprünglich vorgesehenen Modifikationen am Raumlufthereiniger, was den Wechsel auf einen alternativen Filtertyp erleichtert.

3.6.2 Prüfkammer und -methode für Raumlufthereiniger

Zur Prüfung des Raumlufthereinigers kam die in Abbildung 55 schematisch gezeigte Prüfkammer nach GB/T 18801:2022 zum Einsatz. Die Innenmaße der Kammer betragen 3,45 m × 3,40 m × 2,50 m, was einem Volumen von 29,3 m³ entspricht. Die Wände der Prüfkammer wurden für die Messungen mit antistatischer Folie ausgekleidet, um elektrostatische Partikelverluste zu minimieren. Mittels eines zweiten Raumlufthereinigers wurden vor Beginn der Messungen vorhandene Partikel entfernt und mittels einer Klimaanlage und eines mobilen Luftbefeuchters eine Temperatur von (25 ± 3) °C und eine relative Luftfeuchte von (50 ± 10) %rF eingestellt. Während der eigentlichen CADR-Messungen wurden Lüftung, Klimaanlage und Luftbefeuchter ausgeschaltet. Lediglich ein Wandventilator sowie ein zentral angebrachter Deckenventilator liefen wie von der Norm gefordert, um das Prüfaerosol in der Kammer zu homogenisieren. Die Probenahme erfolgte der Norm folgend 0,50 m von der Wand und 1,20 m vom Boden entfernt durch Extraktion eines geringen Volumenstroms aus der Kammer, welcher den Messgeräten zugeführt wurde.

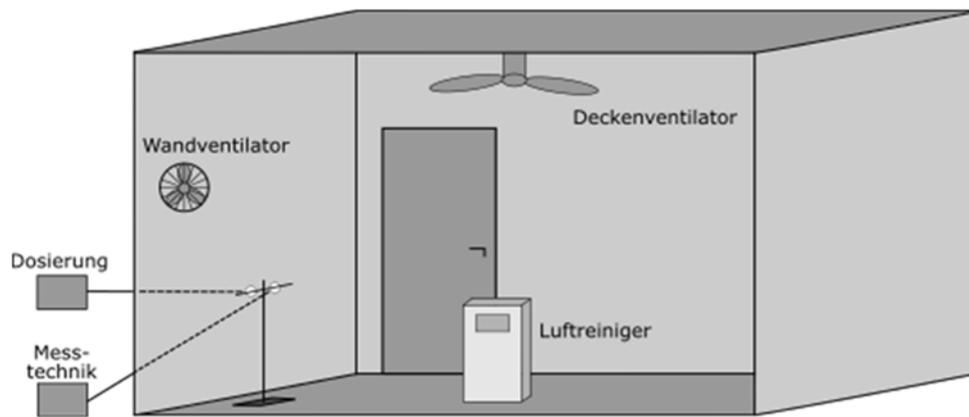


Abbildung 55: Schematischer Aufbau der CADR-Prüfkammer nach GB/T 18801:2022.

Zur Bewertung der Effektivität von Raumlufthereinigern wird die Clean Air Delivery Rate (CADR) herangezogen. Die CADR gibt an, wieviel Kubikmeter vollständig gereinigte Luft der Raumlufthereiniger pro Stunde zur Verfügung stellt und entspricht dem Produkt von Filtereffizienz und Volumenstrom. Zur Bestimmung der CADR wird der Raumlufthereiniger in einen Prüfraum gestellt und ein Prüfaerosol eingeleitet, bis eine bestimmte Startkonzentration erreicht ist. Nach Erreichen einer homogenen Durchmischung wird der exponentielle Abfall der Konzentration im Zeitverlauf bei laufendem Raumlufthereiniger gemessen. Als Referenz dient eine Abklingkurve der Partikelkonzentration ohne Luftreiniger, um die natürliche Abscheidung von der durch den Raumlufthereiniger separieren zu können. Die CADR ergibt sich dann als Produkt aus der Differenz der beiden Abklingraten mit bzw. ohne Raumlufthereiniger und dem Volumen der Prüfkammer.

Zur Bestimmung der größen aufgelösten CADR wurde ein selbst entwickeltes Verfahren mit Paraffinöltröpfchen als Prüfaerosol verwendet [Schumacher2021, Schumacher2022]. Der flüssige Aggregatzustand und die sphärische Gestalt repräsentieren in guter Näherung die Morphologie exhaliertes Tröpfchen, zur deren Reduktion Raumlufthereiniger insbesondere in Hinblick auf den Infektionsschutz eingesetzt werden. Im Gegensatz zu exhalierten Tröpfchen verdunsten Paraffinölpartikel aufgrund des niedrigen Dampfdrucks allerdings nicht, sodass deren Größe stabil ist. Die Paraffinöltröpfchen wurden mittels eines Atomizers (Topas ATM 226) dispergiert.

Für die eigentliche CADR-Prüfung wurden der Prüfraum zunächst abgereinigt und die Randbedingungen für Temperatur und Feuchte eingestellt. Im Anschluss wurde das Prüfaerosol durch einen antistatischen Schlauch in den Prüfraum geleitet. Es wurde auf eine gezielte Neutralisierung der Partikel verzichtet, da davon auszugehen ist, dass die

Partikel während der Verweilzeit im Prüfraum durch Wechselwirkung mit den dort natürlich vorhandenen Ionen einen bipolaren Gleichgewichtszustand erreichen. Nach einer Wartezeit von 5 min zum Erreichen einer homogenen Durchmischung, begann die Messung der natürlichen Abklingkurve ohne Betrieb des Raumlufreinigers über 30 min gefolgt von weiteren 30 min Betrieb des Raumlufreinigers auf höchster Stufe. Der Größenbereich von 0,2 bis 0,5 μm mit einem optischen Aerosolspektrometer (OPC, Palas welas® digital 3000) betrachtet, während für Partikeldurchmesser von 0,5 bis 1 μm ein aerodynamisches Partikelgrößenspektrometer (APS, TSI 3321) zum Einsatz kam. Feinere Partikel bei 0,12 μm wurden mit einem differentiellen Mobilitätsanalysator (DMA, TSI 3080/3081) aus dem polydispersen Aerosol klassiert und mit einem Kondensationspartikelzähler (CPC, TSI 3776) gezählt.

3.6.3 Charakterisierung des Originalfilters

In einem ersten Schritt wurden mit der oben beschriebenen Methode die CADR des Raumlufreinigers mit dem originalen Filter bestimmt. Diese zeigte je nach Lüfterstufe CADR-Werte zwischen etwa 50 und 250 m^3/h , was im erwarteten Bereich lag. Dabei wurde nur eine geringe Größenabhängigkeit der CADR festgestellt.

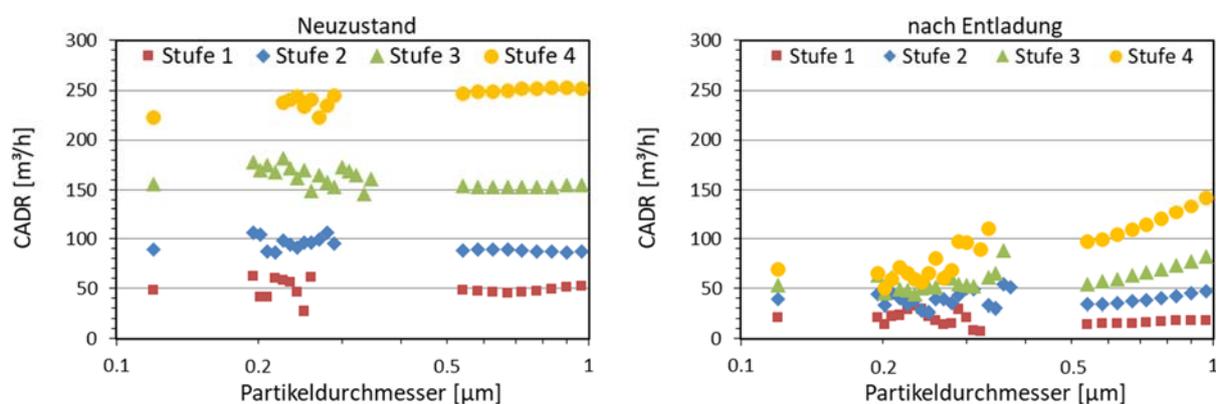


Abbildung 56: Partikelgrößen aufgelöste CADR des Luftreinigers vor und nach Entladung des Filters für die vier verschiedenen Lüfterstufen.

Im nächsten Schritt wurden die Filter nach ISO 16890-5 in mit Isopropanoldampf gesättigter Luft über 24 h entladen. Wie für einen Elektretfilter zu erwarten, ging die Abscheideeffizienz der Filter deutlich zurück und es zeigte sich eine stärker ausgeprägte Größenabhängigkeit, da der relative Beitrag elektrostatischer Effekte zur Abscheidung in der Nähe der Most Penetrating Particle Size (MPPS) größer ist als für gröbere Partikel. Das am Ausgangspunkt des Projekts formulierte Problem eines starken Rückgangs der Abscheideeffizienz durch Entladung der Filter, dem mit der neuen Entwicklung entgegengewirkt werden soll, zeigt sich also im Referenzfall deutlich.

3.6.4 Charakterisierung des Filters mit Kontaktierung

Bei den ersten Versuchen, in denen die finale und konfektionierte Filtervariante im Raumluftreiniger mit Spannung beaufschlagt wurde, zeigte sich, dass ein Stromfluss zwischen den einzelnen Elektroden auftrat. Ein vergleichbarer Effekt trat bereits in im AP 3 (Kapitel 3.3) an einzelnen Mustern auf die in AP 2 (Kapitel 3.2) entwickelt wurden. Die in AP 3 festgestellten Querkontaktierungen konnten u. a. auf vagabundierende Fasern der elektrisch leitfähigen Garne bzw. direkten Kontakt auf Grund zu dichter Anordnung zurückgeführt werden. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden in weiteren Iterationsschritten Gegenmaßnahmen getroffen wie z. B. die Erhöhung der Anzahl isolierender Garnreihen zwischen den elektrischen Garen, um die ungewünschten Querkontaktierungen zu vermeiden. An der finalen Variante aus AP 4 wurden dann bei der Konfektionierung und Herstellung der Kontaktierungen (Kapitel 3.4) nach jedem Arbeitsschritt der Widerstand innerhalb eines Leitungsstrangs und zwischen den einzelnen Strängen/Elektroden gemessen. Zusätzlich zur Widerstandsmessung wurden auch bei einer Prüfspannung von 30 Volt die Stromaufnahme zwischen den Strängen/Elektroden gemessen. Beide Methoden zeigten auf, dass in diesem Stadium der Filterherstellung keine Querkontaktierung zwischen den Elektroden existierte.

Nachdem an der finalen und konfektionierten Filtervariante ein Stromfluss festgestellt worden war, wurde der Filteraufbau wieder zurückgebaut und in die einzelnen Komponenten zerlegt. Nachdem auch im separierten Zustand an dem Filtermaterial ein Stromfluss gemessen werden konnte, wurde sowohl die Pol- als auch die Rückseite der textilen Struktur auf mögliche leitende Fasern bzw. Kontakte der leitenden Garne untersucht. Diese Analyse ergab, dass keine sichtbaren Kontaktstellen existierten. Darüber hinaus fiel bei dieser Analyse auf, dass der Gesamtwiderstand zwischen den Elektroden variiert, wenn in lokalen Bereichen ein Druck auf die textile Struktur ausgeübt wird. Dies deutet darauf hin, dass möglicherweise nicht von einer direkten Kontaktierung ausgegangen werden kann, sondern auch kapazitive Effekte innerhalb der textilen Struktur, bestehend aus Trägermaterial, isolierenden und leitenden Garnen, auftreten. Eine detaillierte Analyse, welche Effekte genau für die „Querkontaktierung“ verantwortlich sind, überstieg die in diesem Projekt geplanten Ressourcen. Im Hinblick auf die positive Resonanz der vorgestellten neuen Filtertechnik sollte dies in zukünftigen Untersuchungen analysiert werden.

3.6.5 Messungen der Schalldämpfungseigenschaften

Für die vergleichenden Messungen der Schallabsorption eines herkömmlichen Vliesstofffilters gegenüber einem getufteten Filter wurde der Empfangsraum im Akustiklabor des TFI eingesetzt. Als Prüfling kam der bereits zuvor vorgestellte Raumlufreiniger Beurer LR 500 zum Einsatz. Die hier verwendeten Messbedingungen entsprechen nicht den Normbedingungen für Haushaltsgeräte, sondern den Normbedingungen für Bauprodukte, wie sie im TFI standardmäßig geprüft werden.



Abbildung 57: Auswertungs-equipment (links) und Raumlufreiniger im Hallraum (rechts) des TFI

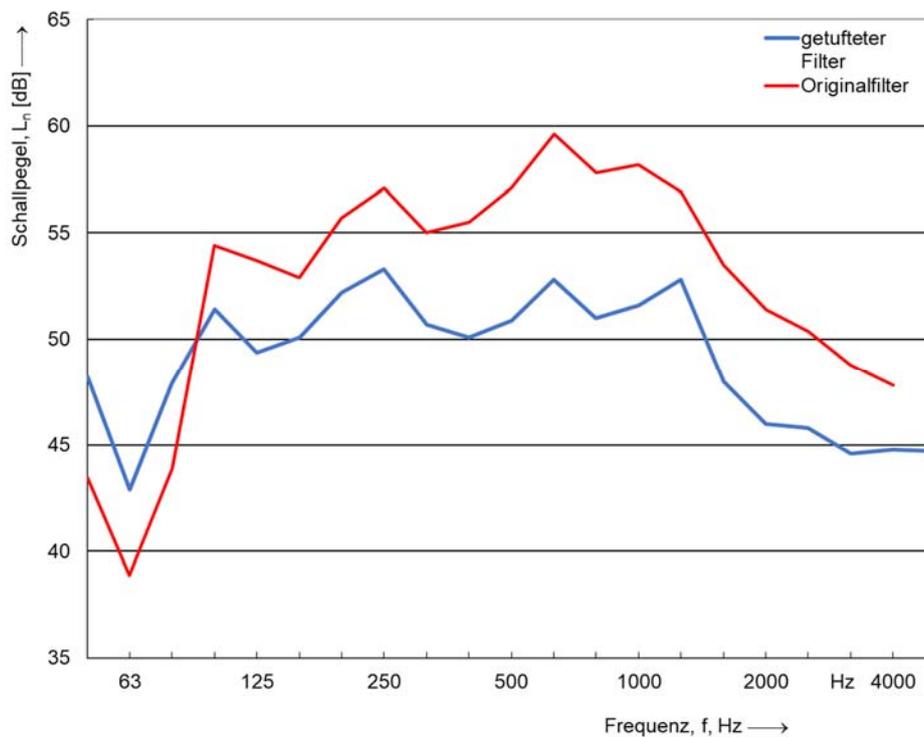


Abbildung 58: Darstellung der Schallpegel des getufteten Filters und des Originalfilters

Bis ca. 80 Hz entsteht durch die Verwendung des Originalfilters ein geringerer Schallpegel als bei der Verwendung des getufteten Filters. Ab ca. 100 Hz wurde mit dem getufteten ein geringerer Schalldruckpegel gemessen als mit dem Originalfilter. Im Mittel bewegte sich der Unterschied bei ca. 3 dB(A) (Abbildung 58). Dies bedeutet eine Halbierung der Lautstärke, die durch den getufteten Filter erreicht wurde. Es konnte jedoch nicht abschließend untersucht werden, zu welchem Teil diese durch das Filtermaterial an sich und zu welchem durch eine mögliche Änderung des Volumenstroms durch einen anderen Druckverlust im Vergleich zum Originalfilter zustande kommt.

4 Gegenüberstellung der Ergebnisse und Forschungsziele

AP1: In Einklang mit dem im Projektantrag beschriebenen Forschungsziel wurden zu Beginn des Projekts geeignete Materialien und Strukturen ausgewählt. Abweichend von der ursprünglichen Planung wurden jedoch keine weiterführenden Untersuchungen mittels numerischer Strömungssimulation durchgeführt. Grund dafür war, dass sich schon frühzeitig nur Mikrofasergarne als geeignet erwiesen haben, die jedoch durch die vielen Einzelfilamente eine komplexe geometrische Struktur aufweisen. Die stark unterschiedlichen zu berücksichtigenden Längenskalen einzelnen Filamente (Sub-Mikrometer) und der Einheitszelle der getufteten Struktur (mehrere Zentimeter) waren zum einen mit den Standardmethoden der verwendeten Software nicht zu realisieren und hätten zudem inakzeptabel lange Rechenzeiten erfordert. Stattdessen wurde ein verstärkter Fokus auf die experimentellen Untersuchungen des Einflusses verschiedener Konstruktionsparameter in den folgenden Arbeitspaketen gesetzt.

AP2: Wie im Antrag als Forschungsziel formuliert, konnten Filterronden des neuartigen Filtermaterials hergestellt und am Filtermedienprüfstand getestet werden. Es wurde eine systematische Variation der Tufting- und Konstruktionsparameter durchgeführt. Da sich der Einfluss des Trägermaterials auf Abscheideeffizienz und Druckverlust als vernachlässigbar erwiesen hat, wurde dieses letztlich nach der besten Vertuftbarkeit ausgewählt. Die als Arbeitshypothese aufgestellte zusätzliche Schalldämpfung durch die dreidimensionale Struktur konnte in Experimenten am Impedanzrohr nachgewiesen werden.

AP3: Es wurde ein Filterprüfstand zur Messung der Abscheideeffizienz der Filterronden bei elektrischer Kontaktierung entwickelt und erfolgreich eingesetzt. Da unerwartet viel Zeit in die Optimierung der Filtermedien zur Vermeidung von unerwünschter Leitfähigkeit und elektrischen Überschlügen investiert werden musste, wurde die Bandbreite an ursprünglich geplanten Prüfaerosolen eingeschränkt. Dennoch konnte auch mit der Verwendung eines einzelnen Prüfaerosols der relevante Partikelgrößenbereich abgedeckt und die Erfüllung des Anforderungsprofils durch die kontaktierten Filterronden nachgewiesen werden.

AP4: Aus den zuvor erprobten und optimierten Filtermedien wurden dem Projektantrag folgend vollformatige Filter zum späteren Einbau in einem Raumlufreiniger hergestellt. Versuche zur Plissierbarkeit haben gezeigt, dass dieses Konzept für die hier entwickelte

Art von Filtermedien nicht zielführend ist, und wurden somit nicht weiterverfolgt. Die als Forschungsziel formulierte Waschbarkeit der Filtermedien in einer handelsüblichen Waschmaschine konnte experimentell nachgewiesen werden.

AP5: Da sich bei der Entwicklung der Filtermedien unerwartete Schwierigkeiten aufgetan haben, wurde im Projektverlauf entschieden, auf die ursprünglich geplante Prüfung der Filter in einem Prüfstand für Kfz-Innenraumfilter zu verzichten und stattdessen umfangreichere Untersuchungen an den kleinformatigen Filtern durchzuführen. Dieses Vorgehen war zeiteffizienter, da Anpassungen auf der Medienskala schneller umzusetzen sind als an kompletten Filtern.

AP6: Es wurde wie geplant ein Raumlufreiniger als Demonstrator ausgewählt und dessen Reinigungsleistung mit dem Originalfilter demonstriert. Das getuftete Filtermedium wurde in einem entsprechenden Rahmen im Raumlufreiniger verbaut und dort elektrisch kontaktiert. Dabei ergaben sich jedoch Probleme mit mangelnder Isolierung zwischen den leitfähigen Reihen, die im Gegensatz zu ähnlichen Effekten bei den Filtern trotz eingehender Untersuchungen nicht beheben ließen. Die finale Demonstration des Forschungsziels im Raumlufreiniger stand also zum Abschluss des Projekts noch aus. Aus diesem Grund entfielen ebenfalls die Untersuchungen mit gewaschenen Filtern. Eine Reduktion der Lautstärke des Raumlufreinigers mit dem neuartigen Filtermedium im Vergleich zum Originalfilter konnte hingegen nachgewiesen werden.

5 Verwendung der Zuwendung

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

Forschungseinrichtung	Ansätze	geleistete PM
1 (IUTA)	HPA A	20,4
2 (TFI)	HPA A	27,1

- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
FE 1: nicht beantragt
FE 2: nicht beantragt
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
FE 1: nicht beantragt
FE 2: nicht beantragt

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten und der Personaleinsatz waren zur Erreichung des Projektziels notwendig. Die Mitarbeiter:innen an den beiden Forschungseinrichtungen waren mit der Planung, Durchführung und Auswertung der Messungen sowie den modelltechnischen Untersuchungen befasst. Der Einsatz des Personals war der inhaltlichen Komplexität und dem zeitlichen Aufwand angemessen.

7 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen

Der wissenschaftlich-technische Nutzen bei der Herstellung dreidimensionaler getufteter Textilstrukturen als Luftfiltermedium liegt in weitreichenden neuen Erkenntnissen zur Verarbeitung von Mikrofasergarnen zur Erzeugung besonders dichter und isolierender Anteile. Auch wurden für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wertvolle Erkenntnisse zum Einsatz von Edelstahl- und Carbonfasergarnen als leitfähigen Garnen für das Anlegen von Hochspannung erzielt. Für die weitere Entwicklung von Luftfiltermedien stimmt optimistisch, dass es keiner speziellen Zusatzbehandlung getufteter Rohwaren bedarf, um die Anforderungen an die Faser- und Noppeneinbindung, die in der Nutzungsphase entstehen, zu erfüllen. Auch einem Waschprozess in der Spülmaschine hält die getuftete Struktur stand. Im Bereich der Filterprüfungen wurden wertvolle Erfahrungen zum Aufbau entsprechender Prüfstände gewonnen, da standardisierte Filterprüfstände keine Möglichkeit zur elektrischen Kontaktierung der Medien bieten.

Der potenzielle Nutzerkreis für die wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse des Forschungsprojekts wird als sehr hoch angesehen. Mobile Raumlufreiniger stellen einen großen Wachstumsmarkt dar getrieben durch die zunehmende Luftverschmutzung und häufiger auftretende Allergien bei gleichzeitig wachsendem Gesundheitsbewusstsein und Wohlstand. Hinzu kommen Möglichkeiten zum Einsatz bei der Infektionsprävention. Darüber hinaus existieren Raumlufreiniger für Spezialanwendungen, wie z. B. stark staubende Arbeitsplätze [Pagels2019] oder Kfz-Innenräume. Zahlreiche Hersteller von (textilen) Filtermedien und Raumlufreinigern in Deutschland angesiedelt. Die Branche ist dabei stark mittelständisch geprägt und während der COVID-19-Pandemie haben viele Firmen ihr Portfolio um Raumlufreiniger erweitern, um die steigende Nachfrage bedienen zu können.

Die Projektergebnisse tragen dazu bei, etablierte Produkte durch Einsatz innovativer Technologien in Hinblick auf die Minimierung von Rohstoffeinsatz, Abfallvolumina und/oder Energiebedarf zu verbessern und neuen Unternehmen den Markteinstieg zu erleichtern. Somit wird besonders die Wettbewerbsfähigkeit der KMU gegenüber internationalen Mitbewerbern nachhaltig gesichert und gestärkt. Nicht zuletzt profitiert auch der private oder öffentliche Verbraucher durch langzeitstabilere Filter, die weniger Kosten und Abfälle verursachen. Darüber hinaus lassen sich die Ergebnisse teilweise auf andere Luft-

filterapplikationen, wie beispielsweise raumluftechnische (RLT) Anlagen, Kfz-Innenraumfilter oder Dunstabzugshauben übertragen, sodass hier eine deutliche Erweiterung der bestehenden Geschäftsfelder erreicht werden kann.

Neben der Raumlufreinigerbranche ist der potenzielle Nutzerkreis zudem bei den Herstellern der Filtermedien zu finden. Mit Hilfe der Tuftingtechnologie werden hauptsächlich textile Bodenbeläge hergestellt, jedoch herrscht ein starker Konkurrenzdruck durch Glattbeläge. Der Fokus deutscher Hersteller im Tuftingbereich liegt auf Nischenmärkten (z. B. gehobene und speziell dessinierte Hotelausstattung, besonders strapazierfähige textile Bodenbeläge für Büro- und Verwaltungsgebäude, Tennishallenbeläge, Kunstrasen, Automobil). Durch die Projektergebnisse kann hier womöglich eine weitere Nische als innovative Ergänzung der derzeitigen Geschäftsfelder tuftender Unternehmen erschlossen werden.

Die wirtschaftlichen und technischen Erfolgsaussichten für eine zeitnahe industrielle Umsetzung durch die Tuftingindustrie nach Projektende wird generell als mittel bis hoch angesehen, zumal sinkende Verkaufszahlen im Segment der textilen Bodenbeläge einen Handlungsbedarf zur Erschließung neuer Geschäftsfelder hervorrufen. Allerdings wurden im Laufe des Projektes Forschungsfragen bzw. Herausforderungen identifiziert, die zunächst weiterer öffentlich geförderter Forschungsaktivitäten bedürfen, um getuftete Filter in die industrielle Verwertung transferieren zu können. Auch seitens der Hersteller von Filtern ist mit einer industriellen Umsetzung zu rechnen, da sie mit der Nutzung der Tuftingtechnik ihre Portfolios um neuartige Produkte ergänzen können. Eine Herausforderung dabei ist die Zusammenführung von Spezialisten aus den Bereichen der textilen Fertigung und den Herstellern von Raumlufreinigern. Letztgenannte bilden den Marktzugang zu den potenziellen Anwendern des getufteten Filters. Da im Rahmen des Projektes die Entwicklung und Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit nur an Funktionsmustern bzw. Demonstratoren erfolgen kann, ist nach Projektabschluss eine industrielle Umsetzung unter Berücksichtigung einer kostengünstigen Fertigung erforderlich.

Die Finanzierbarkeit einer anschließenden industriellen Umsetzung wird als realistisch eingeschätzt. Der Umfang der erforderlichen Umbaumaßnahmen bei den Herstellern von Tuftingbelägen ist überschaubar, da lediglich eine elektronische Jerkerbarre zu installieren und programmieren ist, damit dehnungsarme Garne aus beispielsweise Edelstahl vertuftet werden können. Hieraus resultieren notwendige Investitionskosten etwa 50.000 €. Diese Umbaumaßnahme ist in einem Zeitraum von wenigen Monaten umsetzbar. Auch

für die Hersteller von Raumlufreinigern sind die notwendigen Änderungen an den Geräten überschaubar. Im Wesentlichen muss eine miniaturisierte Hochspannungsquelle integriert werden, die in elektrostatischen Abscheidern bereits standardisiert verwendet wird und vergleichsweise kostengünstig ist. Insofern ist auch von einer zeitnahen Umsetzung der Anwendung in Raumlufreinigern auszugehen, sobald die Filter zur Verfügung stehen.

Die Unternehmen der Wertschöpfungskette des getufteten Filters wie auch die Anwender haben einen konkreten Nutzen von den Projektergebnissen. Herstellerseitig beginnt dies bei mittelständischen Maschinenbauunternehmen, die bestehende Tuftingmaschinen für die Produktion von getufteten Filterstrukturen umrüsten. Ein kontinuierlicher Nutzen besteht für die mittelständischen Textilhersteller, die Polstrukturen für die Ausrüstung der getufteten Filter produzieren, und deren Zulieferer. Für die mittelständischen Hersteller von Filtersystemen und Raumlufreinigern werden durch die Erweiterung des Produktangebotes eine Umsatzsteigerung und damit eine Sicherung von Arbeitsplätzen erwartet.

8 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Die beiden Forschungseinrichtungen haben das Vorhaben mit dem Ziel des Ergebnistransfers in die Wirtschaft durchgeführt. Dies erfolgte in Erfüllung des gemeinnützigen Vereinszwecks des IUTA und ist für beide Forschungseinrichtungen ein wichtiges Moment zur Erhaltung und Steigerung ihrer Wettbewerbsfähigkeit. Dem Ergebnistransfer dienten insbesondere regelmäßige Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses, auf denen den vertretenen Unternehmen ausführlich über das Projekt berichtet wurde. Das vorhandene Knowhow von Anwendern und Herstellern ermöglichte ein fortlaufendes Feedback und zeichnete sich durch eine konstruktive und anwendungsnahe Zusammenarbeit aus.

Die gehaltenen Vorträge und Präsentationen auf Fachkongressen und Messen sowie die geplanten wissenschaftlichen Publikationen in nationalen und internationalen Fachzeitschriften ermöglichten sowohl eine breitenwirksame als auch eine anwendungsspezifische Vermittlung der Ergebnisse. Parallel erfolgte die Veröffentlichung der Projektinformationen und Abschlussberichte über die Internetseiten sowie in den Jahres- bzw. Tätigkeitsberichten der Forschungseinrichtungen. Die Ergebnisse des Projekts flossen weiterhin über bereits bestehende Mitgliedschaften in entsprechenden Arbeitsgruppen in die Normen- und Richtlinienarbeit ein. Die Übernahme der Forschungsergebnisse in die akademische Lehre erfolgte über Vorlesungen an beiden Forschungseinrichtungen sowie bei der Durchführung von wissenschaftlichen Arbeiten. Eine Auflistung der spezifischen Transfermaßnahmen findet sich in den folgenden Tabellen.

- Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahmen	Rahmen	Datum/Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss	1. PA-Sitzung (online) 2. PA-Sitzung (TFI/online) 3. PA-Sitzung (online, nach Abschluss)	08.06.2021 26.10.2022 24.01.2024
Internetpräsentation	Vorstellung des Projekts auf den Webseiten der beiden Forschungseinrichtungen https://www.iuta.de/ https://www.tfi-aachen.de/	erfolgt

Poster auf Konferenzen	ADDITC 2022 (Aachen)	12/2022
	FILTECH 2023 (Köln)	02/2023
Vorträge auf Konferenzen	16. Symposium Textile Filter (Chemnitz)	03/2023
	14. FiltrationsTag (Duisburg)	11/2023
Wissenschaftliche Publikationen	FILTECH 2023 Proceedings	03/2023
Projektberichte	1. IGF-Zwischenbericht	03/2022
	2. IGF-Zwischenbericht	03/2023
	IGF-Schlussbericht	03/2024
Information/Beratung von Unternehmen	regelmäßige Gespräche mit Vertretern der Tufting-, Textil und Filterindustrie	kontinuierlich während der Projektlaufzeit

▪ Geplante Transfermaßnahmen

Maßnahmen	Rahmen	Datum/Zeitraum
Information/Beratung von Unternehmen	Fortführung der bilateralen Gespräche zwischen Unternehmen und den FE	wird kontinuierlich vorangetrieben
Internetpräsentation	Präsentation der Projektergebnisse auf den Webseiten der beiden FE	Nach veröffentlichtem Schlussbericht
Poster auf Konferenzen	Aachen-Dresden-Denkendorf International Textile Conference (ADDITC)	11/2024
Vorträge auf Konferenzen	Mitgliederversammlung IVGT (Industrieverband Veredlung, Garne, Gewebe, Technische Textilien e. V.)	2024
Beitrag in Newsletter	IVGT (Industrieverband Veredlung, Garne, Gewebe, Technische Textilien e. V.)	2024
	TFI - Forschungsnewsletter	2024

Wissenschaftliche Publikationen	Air Quality and Aerosol Research	2024
	Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft	2024
	TextilPlus	2024
	Technische Textilien	2024
Einbringung der Ergebnisse in die Lehre	Gastvorlesung an der RWTH Aachen University im Rahmen der Vorlesung „Ausgewählte Themen der Textiltechnik“	SS 2024
	Gastvorlesung an der Hochschule Niederrhein im Rahmen der Vorlesung „Grundlagen Vorbehandlung und Ausrüstung“	SS 2024

8.1 Einschätzung der Realisierbarkeit der Transfermaßnahmen

Aufgrund der bisherigen Erfahrungen mit den hier bereits realisierten Transfermaßnahmen sowie aus vielen weiteren IGF- und anderen Forschungsvorhaben der beteiligten Forschungseinrichtungen wird die Realisierbarkeit des Transferplans als hoch eingeschätzt.

9 Literaturverzeichnis und Quellen

- [Brunke2013] Brunke, Schröder, „Entwicklung eines schalloptimierten, textilen Bodenbelags – Akustikteppich“, KF2559203DF3 (2013).
- [Brunke2019] Brunke, Cetin, Aslan, Glogowsky, Ratovo, Büsgen, „Funktionale und thermisch hoch belastbare Tuftings für den Einsatz im Bereich der technischen Textilien“, IGF 19050 N, TFI-Schriftenreihe 2019/110 (2019).
- [Choi2015] H.J. Choi, E.S. Park, J.U. Kim, S.H. Kim, M.H. Lee, “Experimental study on charge decay of electret filter due to organic solvent exposure”, *Aerosol Sci. Technol.* 49 (2015) 977.
- [DIN10534] DIN EN ISO 10534-2:2001-10, „Akustik - Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren - Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion“, Beuth Verlag (2001).
- [Finger2015] H. Finger, U. Schneiderwind, C. Asbach, „Bewertung mobiler Raumlufthereinigungsgeräte“, *Gefahrstoffe – Reinh. Luft* 75 (2015) 497.
- [Goetz2013] Goetz, Hanuschik, Schröder, „Erweiterung des Anwendungsgebietes der Tufting-technologie durch den Einsatz einer elektronisch gesteuerten Jerkerbarre“, IGF 16678, TFI-Schriftenreihe 2013/98, 2013
- [GrandViewResearch2020] Grand View Research, Air Purifier Market Size, Share & Trends Analysis Report By Technology (HEPA, Activated Carbon, Ionic Filters), By Application (Commercial, Residential, Industrial), By Region, And Segment Forecasts, 2020 – 2027 (2020).
- [Jasper2006] W. Jasper, J. Hinestroza, A. Mohan, J. Kim, B. Shiels, M. Gunay, D. Thompson, R. Barker, “Effect of xylene exposure on the performance of electret filter media”, *J. Aerosol Sci.* 37 (2006) 903.
- [Ji2003] J.H. Ji, G.N. Bae, S.H. Kang, J. Hwang, “Effect of particle loading on the collection performance of an electret cabin air filter for submicron aerosols”, *J. Aerosol Sci.* 34 (2003) 1493.
- [Kerner2018] M. Kerner, K. Schmidt, A. Hellmann, S. Schumacher, M. Pitz, C. Asbach, S. Rippberger, S. Antonyuk, “Numerical and experimental study of submicron aerosol deposition in electret microfiber nonwovens”, *J. Aerosol Sci.* 122 (2018) 32.
- [Kerner2020a] M. Kerner, K. Schmidt, S. Schumacher, V. Puderbach, C. Asbach, S. Antonyuk, „Evaluation of electrostatic properties of electret filters for aerosol deposition”, *Sep. Purif. Technol.* 239 (2020) 116548.
- [Kerner2020b] M. Kerner, K. Schmidt, S. Schumacher, C. Asbach, S. Antonyuk, „Ageing of electret filter media due to deposition of submicron particles - experimental and numerical investigations”, *Sep. Purif. Technol.* 251 (2020) 117299.
- [Landrigan2018] P. Landrigan, R. Fuller, et al., „The Lancet Commission on pollution and health,“ *The Lancet* 391 (2018) 462.
- [Lelieveld2015] J. Lelieveld, J. Evans, M. Fnais, D. Giannadaki, A. Pozzer, “The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale”. *Nature* 525 (2015) 367.

[Morawska2020] L. Morawska, D. Milton, "It is time to address airborne transmission of COVID-19". *Clin. Infect. Dis.* 6 (2020) ciaa939.

[Motyl2006] E. Motyl, B. Łowkis, "Effect of air humidity on charge decay and lifetime of PP electret nonwovens", *Fibres Text. East. Eur.* 14 (2006) 39.

[Pagels2019] J. Pagels, M. Alsved, V. Malmborg, Y. Omelekhina, A. Wierzbicka, M. Bohgard, T.A. Eriksson, "Kunskapssammanställning 2019 : 5 Airborne Dust Removal using Mobile Air Cleaners in the Construction Sector" (2019).

[Pope2006] C. Pope III, D. Dockery, D., "Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect". *J. Air Waste Manage.* 56 (2006), 709.

[Schumacher2019] S. Schumacher, R. Jasti, M. Kerner, S. Antonyuk, C. Asbach, „Ursachenanalyse zum Einfluss des Prüfaerosols auf die Abscheideeffizienz von Elektretfiltern“, *Gefahrstoffe – Reinh. Luft* 79 (2019) 435.

[Schumacher2021] S. Schumacher, S., H.-J. Schmid, C. Asbach "Effektivität von Luftreinigern zur Reduzierung des COVID-19-Infektionsrisikos", *Gefahrstoffe – Reinh. Luft* 81 (2021) 16.

[Schumacher2022] S. Schumacher, A. Banda Sanchez, A. Caspari, K. Staack, C. Asbach, "Testing filter-based air cleaners with surrogate particles for viruses and exhaled droplets", *Atmosphere* 13 (2022), 1538.

[Shaughnessy2006] R.J. Shaughnessy, R.G. Sextro, "What is an effective portable air cleaning device? A review". *J. Occup. Environ. Hyg.* 3 (2006) 169.

[Siegel2016] J.A. Siegel, „Primary and secondary consequences of indoor air cleaners“, *Indoor Air* 26 (2016) 88.

10 Durchführende Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1

Institut für Umwelt & Energie,
Technik & Analytik e.V. (IUTA)
Bliersheimer Straße 58 – 60
47229 Duisburg

Leiter der Forschungseinrichtung:
Dr.-Ing. S. Haep, Dipl.-Ing. J. Schiemann

Forschungseinrichtung 2

TFI – Institut für Bodensysteme
an der RWTH Aachen e.V.
Charlottenburger Allee 41
52068 Aachen

Leiter der Forschungseinrichtung:
Dr. phil. Jacqueline Lemm

Verfassung des Berichts

Forschungseinrichtung 1: Dr. Stefan Schumacher

Forschungseinrichtung 2: Dipl.-Ing. Sophia Gelderblom