

Umwelttechnik in Baden-Württemberg



Verringerung des Energieverbrauchs und der Feinstaubemission von industriellen Schlauchfilteranlagen

Abschlussbericht zum Förderprogramm
"EFRE Umwelttechnik"
des Ministeriums für Umwelt, Klima und
Energiewirtschaft Baden-Württemberg



Europäische Union
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

investition in
Ihre Zukunft!



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Umwelttechnik in Baden-Württemberg

Autoren:

Gerhard Kasper, Jörg Meyer, Oliver Kurtz
Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik
Jürgen Junker, Gunnar Hemmer, Robert Mnich, Reiko Fischer
Fa. Junker Filter GmbH, Sinsheim

Förderkennzeichen: UT 150-151
Laufzeit: 6.9.2010 – 6.3.2012

Das Projekt wurde je zur Hälfte mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) im Rahmen des Operationellen Programms für das Ziel „Regionale Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung“ und mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert.

Oktober 2012



Europäische Union
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

investition in
Ihre Zukunft!



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Inhaltsverzeichnis

1. Problemlage	4
2. Ziele / Ergebnisse des Verbundprojektes	4
3. Stand der Wissenschaft und Technik; bisherige Arbeiten; Qualifikation der Partner	4
4. Arbeitsplan	8
5. Ergebnisse Teilprojekt 1	9
5.1. Konzipierung einer Pilotfilteranlage	9
5.2. Messtechnik der MSLA	13
5.3. Analyse des Langzeitbetriebsverhaltens der Mehrschlauchlaboranlage	14
5.4. Emissionsmessungen an der Mehrschlauchlaboranlage	22
6. Ergebnisse Teilprojekt 2	31
6.1. Auswahl und Charakterisierung der Filtermedien	31
6.2. Labormessungen am VDI Prüfstand	37
6.3. Messungen an industriellen Schlauchfilteranlagen	45
6.3.1. Schlauchfilteranlage bei der Firma Clariant	45
6.3.2. Schlauchfilteranlage bei der Firma AZO	49
7. Messung an einer industriellen Technikumsanlage	50
7.1. Ergebnisse der Streulichtmessungen	55
7.2. Reingaskonzentration, Umlaufzeiten und Medienwiderstand an der NMA	61
8. Ergebnisse Teilprojekt 3	66
8.1. Zusammenfassung:	66
8.2. Schlussfolgerungen:	67
9. Verwertungsplan	69
9.1. Wirtschaftliche Verwertung	69
9.2. Wissenschaftliche Verwertung der Ergebnisse, begleitende Öffentlichkeitsarbeit	71
10. Arbeitsteilung und Zusammenarbeit	72
11. Notwendigkeit der Zuwendung	72

1. Problemlage

Die Technikentwicklung für Schlauchfilteranlagen zur Staubbeseitigung aus industriellen Quellen hat sich die in der Vergangenheit vor allem auf deren stabilen Betrieb konzentriert; Emissionsfragen sind erst in jüngster Zeit verstärkt angegangen worden. Daher sind die Kenntnisse der Betreiber und Hersteller von Filtermedien und -anlagen zur gezielten Emissionsminderung (und eventuell auch zur Verringerung der beim Betrieb eingesetzten Energie, z.B. in Form von Druckluft) generell auf praktische Erfahrungswerte begrenzt. Jeder Hersteller betreibt und vertreibt seinen Typ; richtige Strategien gibt es nur in begrenztem Umfang. Diese Feststellung trifft auch auf die Forschung zu; zum Teil werden die beobachteten Zusammenhänge zwischen Ursache und Effekt falsch wiedergegeben (siehe Stand der Technik).

2. Ziele / Ergebnisse des Verbundprojektes

Technologisches Ziel des Vorhabens: Verminderung von Feinstaubemission und Energieverbrauch für industrielle Schlauchfilter bzw. Filteranlagen (auf unter 3 mg/m^3 bzw. um bis zu 20 %) durch Umsetzung in die Praxis von neuen Konzepten für eine optimierte Betriebsweise von Filteranlagen im Kombination mit dem Einsatz von verbessertem Filtermedien.

Arbeitsschwerpunkte: Aufbau und Inbetriebnahme einer gut instrumentierten und flexibel steuerbaren Versuchsfiltersanlage, an der Anlagenbetriebskonzepte erprobt werden sollen. Erprobung neu entwickelter Schlauchfiltermedien in Labor und industriellen Anlagen.

3. Stand der Wissenschaft und Technik; bisherige Arbeiten; Qualifikation der Partner

Seit langen ist bekannt, dass die Staubemission von Schlauchfilteranlagen durch besonders hochwertige aber relativ teure Filtermedien mit Membranauflage (i.d.R. PTFE) deutlich gesenkt werden kann. Darüber hinaus weiß man seit langem, dass bei diesem Anlagentyp vor allem während bzw. nach der Abreinigung in verstärktem Masse Staub emittiert wird und dass diese Emissionen bei reduziertem Tankdruck abnehmen. Eine generelle Reduzierung des Abreinigungsdruckes ist aber riskant, da sie rasch zu einem instabilen Betrieb des Filters führen können. Generell hat sich die Technikentwicklung in der Vergangenheit auf den stabilen Betrieb der Filter konzentriert; Emissionsfragen sind erst in jüngster Zeit verstärkt angegangen worden. Die tatsächlichen Mechanismen der Staubemission von Abreinigungsfiltern sind bisher nur wenig verstanden, bzw. es wurden in der Vergangenheit plausible aber technisch nicht zutreffende Gründe angegeben ⁽¹⁾. Dies wirkte sich auch auf Entwicklungsstrategien aus, etwa in der Art und Weise wie Filteranlagen am besten betrieben werden oder wie Filtermedien optimal aufgebaut sein sollen.

Emissionsoptimierte Filterlagen (Teilvorhaben 1): Die Antragsteller arbeiten seit 2002 im Rahmen des europäischen Filterkonsortiums mit dem KIT zusammen an der Erforschung der genauen

Mechanismen und Einflussfaktoren für diese Emissionen ^(1,2), sowie an Methoden zur Emissionsmessung sehr feiner Partikel (PM_{2,5}) hinter Filterabscheidern^(3,4,5). Dabei wurden viel versprechende Strategien entwickelt, um durch geschickte Kombination von Betriebsparametern (z.B. Filterflächenbelastung, Kuchendicke, Umlauffrequenz, Tankdruck, Medienspannung, usw.) gleichzeitig die Emissionen und den Energieaufwand im Betrieb deutlich zu senken. Die eigenen Vorarbeiten an Laborfilteranlagen in Europa und Vergleichsmessungen in Japan haben nämlich bestätigt, dass die Feinstaubemission sehr stark von der Betriebsweise (und bestimmten konstruktiven Aspekten) der Anlage beeinflusst werden ⁽²⁾, und je nach Medium auf deutlich unter 1 mg/m³ zurückgeführt werden kann. Dies steht aber teilweise im Widerspruch zu Erfahrungen der Praxis, wonach die Senkung der Emissionen unterhalb ca. 10 mg/m³ zunehmend schwieriger wird bzw. teure Medienkonstruktionen (z.B. PTFE-Membranauflagen) erfordert. Hier ist dringender Klärungsbedarf und auch deutliches Einsparpotential vorhanden.

Emissionsoptimierte Filtermedien (Teilvorhaben 2): Neben den genannten anlagenseitigen Einflussgrößen für eine energie- und emissionsoptimierte Fahrweise hängt das Gesamtergebnis entscheidend auch vom Filtermedium ab. Seit langen ist bekannt, dass membranbeschichtete Nadelfilze extrem geringe Emissionen aufweisen. Allerdings hat diese Leistung ihren Preis in Form von Medienkosten und Druckverlust. Im Hinblick auf zukünftige Vorgaben für eine verbesserte Feinstaubabscheidung (PM_{2,5}) gibt es jedoch auch neue Konzepte zur Ausrüstung von klassischen Nadelfilzen mit Feinfaserauflagen unterschiedlicher Konstruktion (Mikro-, Nanofasern). Diese Medien müssen jedoch auf ihr reales Emissionsverhalten für Feinstaub erst noch bewertet und den Anforderungen der Praxis angepasst werden. Dies erfordert entsprechende Pilotanlagen und Praxistests.

- (1) Binnig, Meyer, Kasper (2009) *Origin and Mechanisms of Dust Emission from Pulse-Jet Cleaned Filter Media*. Powder Technology, 189, (1), 108-114.
- (2) Binnig, Mao, Meyer, Hata, Kasper and Kanaoka (2005) *Comparison of surface filter test rigs according to VDI 3926 and JIS Z 8909-1*. Filtration, 5 (4), 253-258
- (3) Binnig, Meyer, Kasper (2005) *Integration of cyclones and an optical particle counter into a filter tester VDI-3926/Type 1 to characterize PM_{2,5} emissions from pulse-jet cleaned filter media*. Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft, vol. 65 (2005) Nr. 4 - April 163-168
- (4) Binnig, Meyer, Kasper (2007) *Calibration of an optical particle counter to provide PM_{2.5} mass for well-defined particle materials*. J. Aerosol Sci, 38/3, 325-332
- (5) Kasper, Binnig, Meyer (2007) *Particulate emissions from filter-based gas cleaning devices and their characterization according to PM_{2,5} criteria*. Filtration, 7(1), 49-54
- (6) Sommer (2008) *Mit Flachschauchfiltern der Feinstaubbelastung entgegenwirken*. Wasser, Luft, Boden 7/8, 35-37
- (7) Junker, Fischer (2008) *Vliese, Filze, Membranen*. Wasser, Luft, Boden 7/8, 32-34

Das **KIT**, vertreten durch das Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik beschäftigt sich seit vielen Jahren mit Filtertechnik und ist ein weltweit führendes Forschungsinstitut auf diesem Gebiet. Die Bedeutung des Instituts und des Bereichsleiters Prof. Kasper werden durch eine intensive Publikationstätigkeit zur Filtration, u.a. der Abreinigungsfiltertechnik dokumentiert; ebenso durch eine langjährige Zusammenarbeit mit Unternehmen der Filterbranche in Europa und weltweit.

Die **Firma Nederman Filtration** ist ein weltweit tätiges Unternehmen für Abgasreinigungsanlagen, deren Herzstück eine Trockenfiltration unterschiedlicher Bauart ist. Der Filtertyp FS und FD für die großindustrielle Anwendung wie z. B. in Stahlwerken wird zu über 80 % am Standort Friesenheim für den weltweiten Einsatz gebaut. Durch das gemeinsame Forschungsprojekt lassen sich die wissenschaftlichen Erkenntnisse und Gutachterkenntnisse mit dem Fachwissen über die unterschiedlichen Filtrationsmedien mit den Erfahrungen des Anlagenbaus optimal verzahnen, sodass die Ergebnisse dann kurzfristig in die Praxis umgesetzt werden können.

Die **Firma Junker Filter GmbH** entwickelt seit 50 Jahren innovative Konzepte "nach Maß" für den Einsatz von technischen Textilien zur Abscheidung von Feststoffen aus Gasen und Flüssigkeiten. Junker Filter ist Erstausrüster bzw. laufender Nachrüster für ca. 1.000 Schlauchfilteranlagen im Größenbereich von 10.000 bis 1.000.000 m³/h Volumenstrom, europaweit und in den letzten Jahren auch sehr stark in Ländern wie Saudi Arabien, Malaysia, Aserbaidschan. In seiner 50-jährigen Unternehmensgeschichte hat Junker Filter wiederholt neue Technologien für Konfektion und Einsatz von Schlauchfiltern den neuesten Marktanforderungen auf dem Markt eingeführt. Junker Filter verfügt trotz seiner beschränkten Größe als KMU mit ca. 100 Mitarbeitern über eine Entwicklungsabteilung bestehend aus 2 Ingenieuren (davon einer promoviert) und 2 Labortechnikern. Für seine Leistungen wurde Junker Filter für den Umwelttechnikpreis 2009 des Landes Baden-Württemberg nominiert.

Zur Zeit - entsprechend den aktuellen ökologischen Anforderungen - nimmt die Feinstaubproblematik erheblichen Einfluss auf die Ausrichtung der FuE-Tätigkeit von Junker Filter. Da hierfür u.A. neue Konzepte des textilen Materialaufbaues und des Anlagenbetriebes erforderlich sind, wurde Junker Filter Gründungsmitglied des europäischen Filterkonsortiums (Gründungsjahr 2002), wo unter der Führung des KIT die relevanten Fragen grundlegend untersucht werden. In Rahmen des Konsortiums kooperiert Junker Filter auch mit Medienherstellern und hat die für die geplanten Versuche erforderlichen neuen Medien in ausreichender Menge zur Verfügung.

Das **Sachverständigenbüro Dr. W. Schulteß**, ist seit knapp 3 Jahrzehnten für die Planung, Begutachtung, Sanierung und Sachverständigentätigkeit ausschließlich für den Bereich der Abluft- und Abgasreinigung tätig. Die fachlichen Grundlagen und Erfahrungen für diese Tätigkeit hat sich der Inhaber in vorheriger 11-jährigen Tätigkeit in der Lieferindustrie für Abluft- und Abgasreinigungsanlagen erworben.

Ein Schwerpunkt der Tätigkeit des Ing.-Büros ist die Planungs- und Gutachterarbeit für den Ersatz alter, unzureichend arbeitender oder nicht mehr dem Stand der Technik entsprechender Entstaubungsanlagen, z. B.

- Ersatz von Wäscheranlagen durch filternde Abscheider,
- Umbau von Trocken-Elektrofilter in Schlauchfilteranlagen,
- Ertüchtigung von alten Schlauchfilteranlagen durch Erneuerung der Abreinigungskonstruktion und Einsatz neuwertiger Filterschläuche.

4. Arbeitsplan

TP1: Untersuchungen zur optimale Betriebsweise und Auslegung von Filteranlagen

Verantwortlicher Partner: KIT Karlsruhe

Zentrales Ziel: Aufbau und Inbetriebnahme einer VersuchsfILTERanlage

- Übertragung und Erprobung erster Ansätze zur Minderung von Energieverbrauch und Emission in die Praxis
- Partikeldurchtritt hängt von Menge des bereits eingelagerten Staubes, von Abreinigungsintensität, Abreinigungshäufigkeit, Abreinigungstakt benachbarter Schlauchgruppen und anderen Faktoren ab
- Daneben auch Möglichkeit sekundärer Emissionsquellen z.B. durch Undichtigkeiten
- Erkundung, welcher dieser Faktoren oder Gruppen von Faktoren entscheidend ist anhand praxisnaher Versuche
- Errichtung einer speziell für Versuchszwecke ausgelegten 9-Schlauch-Pilotfilteranlage zur Überbrückung zwischen Labor und Praxis
- Ausstattung dieser mit modernsten Steuerungs- und Echtzeit-Messtechniken und Einrichtung für einen flexiblen Testbetrieb
- Aufbau und Betrieb dieser Anlage stehen im Mittelpunkt von Teilprojekt 1.

TP2: Erprobung neu konzipierter Medien

Verantwortlicher Partner: Fa. Junker Filter

Zentrales Ziel: Praxiserprobung neuer Filtermedien mit verbesserten Eigenschaften bezüglich Feinstaubemission.

- Nadelfilze mit Feinfaserauflage (1 bis 4 μm) auf der Anströmseite (aus materialspezifischen Gründen um 30 bis 40 % kostengünstiger sind als PTFE-Auflagen)
- Erprobung der Filtermedien an industriellen Filteranlagen
- Zusätzlich Generierung von Standzeiterfahrungen

TP3: Zusammenführung der technischen Erfahrung aller Partner

Verantwortlicher Partner: Ing.-Büro Dr. W. Schulteß

Zentrales Ziel: Sammlung und Bewertung der Ergebnisse aus Praxissicht

- Bewertung der erzielten Ergebnisse unter der Federführung eines unabhängigen Ingenieurbüros aus Sicht der Praxis
- Festlegung des weiteren technischen und kaufmännischen Vorgehens

5. Ergebnisse Teilprojekt 1

5.1. Konzipierung einer Pilotfilteranlage

Die Projektierung der Mehrschlauch-Laboranlage (MSLA) wurde in Kooperation mit den Projektpartnern durchgeführt. Die Detailplanung und der Bau der Anlage wurde von der Firma Nederman durchgeführt. Die Anlage wurde für eine möglichst flexible Versuchsdurchführung konzipiert. Abbildung 1 zeigt die aufgebaute MSLA im Technikum des MVM.



Abbildung 1: Aufgebaute Mehrschlauch-Laboranlage im Technikum des MVM vor Inbetriebnahme

Die MSLA stellt eine Nachbildung einer großtechnischen Schlauchfilteranlage im Technikumsmaßstab dar (Abbildung 2). Die Anlage beinhaltet neun Schlauchfilter in 3x3-Anordnung. Die Filter sind 125 cm lang und 12 cm im Durchmesser. Die Dimension der Schläuche liegt damit im (unteren) Bereich der industriell gängigen Größen. Die Anlage ist aus wirtschaftlichen Gründen für Kreislaufbetrieb und Rezirkulation des Staubmaterials ausgelegt. Dies verringert deutlich die Kosten, die für das Bereitstellen des Staubes anfallen (bis zu mehreren Tausend Euro pro Tonne Staub).

Die Partikel werden über Schneckendosierer in den Luftstrom eingebracht. Der Teststaub wird, im Gegensatz zur bekannten Filterronden-Testanlage (auch VDI-Anlage genannt), nicht mit einer rotierenden Bürste, sondern durch die Schereffekte der Luftströmung im Rohrleitungssystem dispergiert. Die Partikeldosierung erfolgt hierbei an zwei Stellen der Anlage. Zum einen kann ungebrauchter Teststaub aus einem Vorlagebehälter direkt zugegeben werden, zum anderen wird der Teststaub rezirkuliert. Der Staub, der bei der Regeneration im Staubbunker aufgefangen wird, kann demzufolge teilweise wiederverwendet werden. Die mit Staub beladene Luft wird anschließend durch eine Extinktionsstrecke (7) geleitet, über die die Konzentration ermittelt und so die Dosierschnecken entsprechend der Vorgabe automatisch geregelt werden. Danach gelangt sie in den Rohgasraum (1), wo sie durch die Filtermedien tritt. Vom nachfolgenden Reingasraum (2) aus gelangt die gereinigte Luft in das Radialgebläse (3) und von dort aus erneut zur Dosieranlage.

Der Staubkuchen auf den Filtern wird, ähnlich wie bei der VDI-Anlage, online über Drucktanks mit Tauchrohren (4) abgereinigt. Dabei befindet sich über jedem Schlauch ein zugehöriges Tauchrohr, was u.a. die Abreinigung einzelner Schläuche ermöglicht. Der aus dem Tauchrohr austretende Freistrahл wird über einen Venturieinsatz in den Filterschlauch eingeleitet. Die Schläuche können im laufenden Betrieb, ohne Unterbrechung der Rohgaszufuhr, entweder einzeln (Einzelschlauchabreinigung, bzw. bag by bag (BBB)) oder in dreier Gruppen (Reihenabreinigung bzw. row by row (RBR)) regeneriert werden. Nach dem Venturieinsatz erreicht der Druckstoß das obere Schlauchende und wandert der Länge nach durch den Schlauch. Der abgereinigte Staubkuchen fällt in den Spitzrumpf unter den Schläuchen. Dort wird der abgereinigte Staub gebunkert und bei Bedarf entweder aus der Anlage ausgefördert (5), oder erneut in die Rohgasströmung (6) eingebracht.

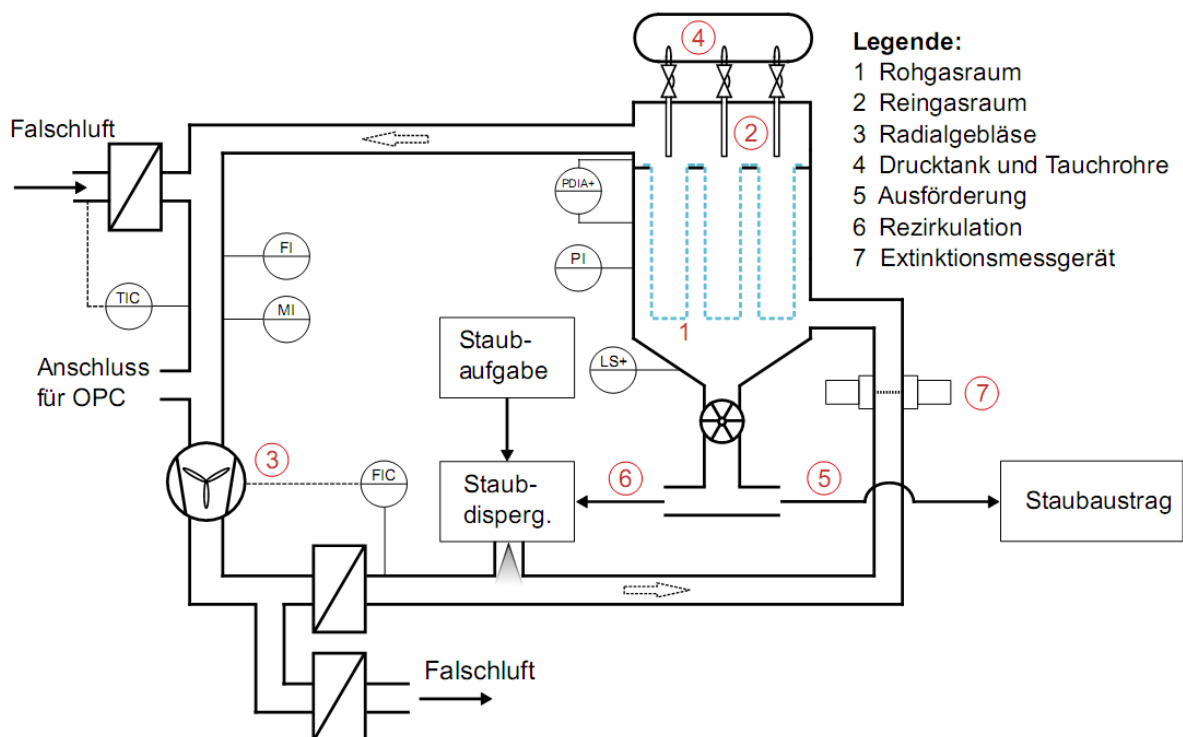


Abbildung 2: Schematische Skizze der Mehrschlauch-Laboranlage mit Instrumentierung

Betriebsparameter und verwendete Medien

Die Betriebsparameter der MSLA sind ähnlich wie in der Filterrunden-Testanlage gewählt. Der Volumenstrom, der durch die Filter durchtritt, wird über Geschwindigkeitsmessungen mit Prandtlkreuzen bestimmt und über das Gebläse geregelt. Im Gegensatz zu den Filtrationsbedingungen in der VDI-Anlage, die mit einer konstanten Filteranströmgeschwindigkeit betrieben wird, herrschen in der MSLA jedoch komplexere Strömungsverhältnisse. Da die Filterschläuche nicht gleichzeitig regeneriert werden, variiert der Volumenstrom durch die einzelnen Filterschläuche sehr stark. Um annähernd gleiche Betriebsbedingungen zu schaffen, wird der Volumenstrom durch die neun Filterschläuche in der Mehrschlauchlaboranlage so eingestellt, dass die durchschnittliche Anströmgeschwindigkeit der Filterfläche 3,3 cm/s beträgt. Abbildung 3 zeigt die Filteranströmgeschwindigkeit eines einzelnen Schlauches in der MSLA bei unterschiedlichen Abreinigungsfolgen. Sämtliche an der MSLA erfolgten Messun-

gen wurden mit Pural SB durchgeführt. Als Filtermedium diente ein kalandriertes PET Nadel-
fließ (500g/m²).

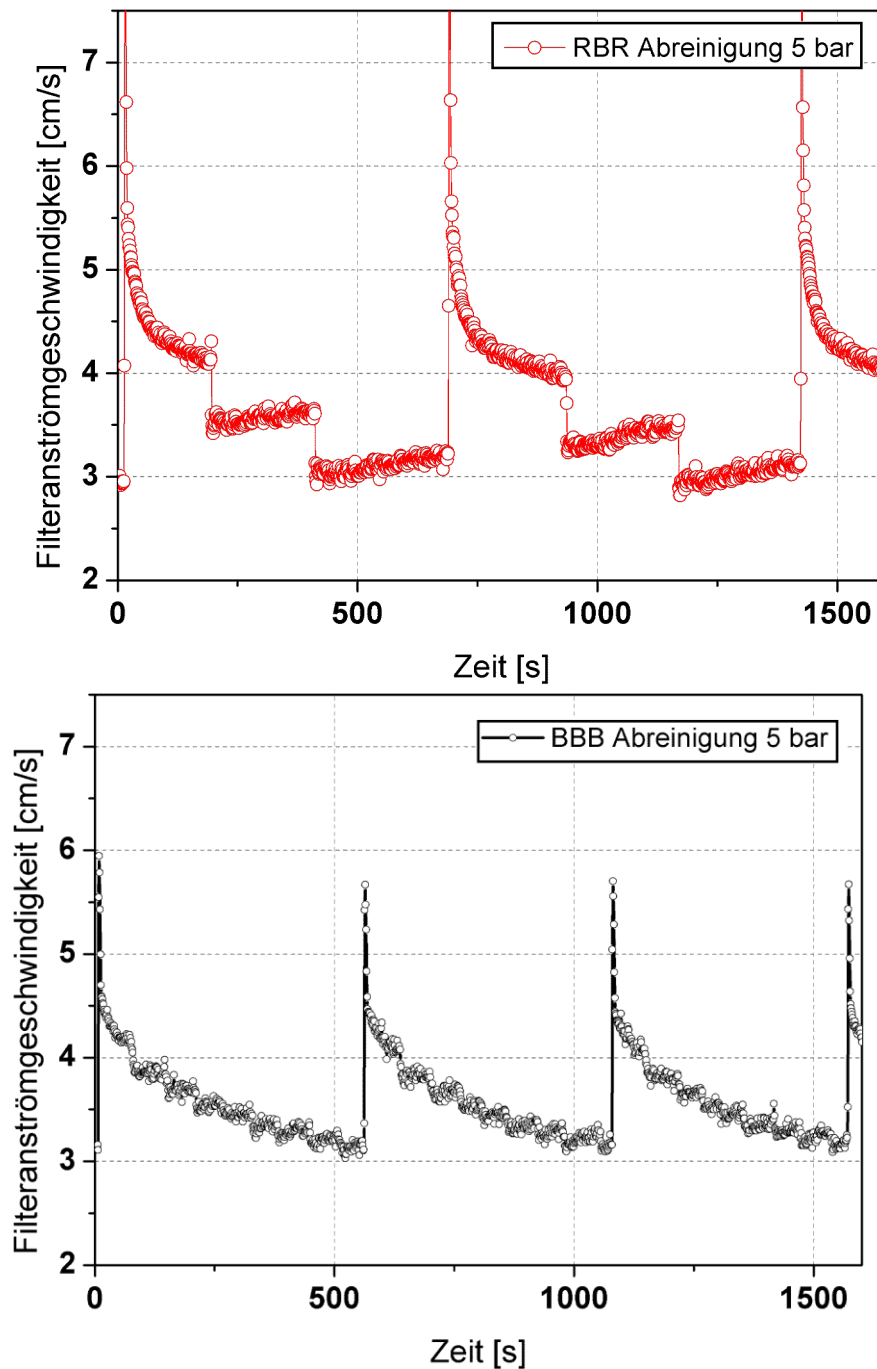


Abbildung 3: Anströmgeschwindigkeit eines Filterschlauches in der MSLA bei verschiedenen Abreinigungsfolgen
Oben: Reihenabreinigung. Unten: Einzelschlauchabreinigung

Arten der Versuchsführung

Um das Langzeitbetriebsverhalten der Filtergewebe untersuchen zu können, werden in der Mehrschlauchlaboranlage und der Filterrunden-Testanlage unterschiedliche Versuche durchgeführt. Die Vorgehensweise bei den einzelnen Messreihen wird in den nächsten Abschnitten genauer erläutert.

Differenzdruckgesteuerte Versuche

Bei den differenzdruckgesteuerten Versuchen, die im Folgenden als Messzyklen bezeichnet werden, wird der Druckstoß für die Regeneration durch einen maximalen Differenzdruck über das Filtergewebe ausgelöst. Bei den in diesem Arbeitspaket durchgeführten Versuchen wird hierfür der Druckverlust eines neuen Filtergewebes, ohne eingelagerte Partikel, plus 1500 Pa verwendet. Das Verhalten der Filtergewebe wird bei den differenzdruckgesteuerten Versuchen gemittelt über 50 Zyklen betrachtet.

In der Filterrunden-Testanlage wird der Zeitraum zwischen zwei Regenerationsdruckstößen bekannterweise als Zykluszeit bezeichnet. Das bedeutet, die Filterrunde wird insgesamt fünfzigmal regeneriert. Im Gegensatz dazu ist bei der MSLA zu beachten, dass beim Erreichen des vorgegebenen Differenzdrucks nicht alle Schläuche gleichzeitig regeneriert werden, sondern bei der Einzelschlauchabreinigung lediglich ein Schlauch bzw. drei Filterschläuche bei der Reihenabreinigung. Erst nach erneutem Erreichen des maximalen Druckverlustes wird der nächste Druckstoß ausgelöst. Folglich entsprechen die Zykluszeiten bei der Mehrschlauchlaboranlage nicht dem Zeitraum zwischen zwei Abreinigungen, sondern der Zeitspanne, bis alle Schlauchfilter einmal regeneriert wurden.

Um zu untersuchen, wie sich das Betriebsverhalten des Filtergewebes über die Betriebszeit ändert, werden die folgenden Größen bei der Parameterstudie ermittelt und im Anschluss analysiert:

- Restdruckverlust des Filtergewebes nach dem Regenerationsdruckstoß
- Widerstand des Filtergewebes nach dem Regenerationsdruckstoß
- Zykluszeit
- Druckstoßverlauf
- Emission

Dabei stellt die Abreinigung durch den Druckstoß einen maßgeblichen Einflussfaktor auf das Betriebsverhalten dar. Es soll untersucht werden, ob und wie sich eine Änderung des Vorlagebehälterdrucks auf den Langzeitbetrieb der Filtergewebe auswirkt.

Um zu überprüfen, inwieweit die Partikelemission von den Abreinigungsbedingungen abhängt, erfolgt zum einen eine online Messung der durchdringenden Partikel, zum anderen eine gravimetrische Auswertung der emittierten Partikel. Ausgewertet wird dabei sowohl die Masse pro Zyklus als auch die mittlere Konzentration im Reingasstrom. Zusätzlich kann durch die Streulichtmessung auch noch die Partikelgröße mit dem maximalem Durchtritt (most penetrating particle size (mpps)) bestimmt werden. Hierzu werden die vom Streulichtmessgerät gemessenen Werte in Partikelgrößen umgerechnet und bewertet.

In der MSLA erfolgt im Rahmen dieses Arbeitspakets der Druckstoß, falls nicht anders hingewiesen, mit einem Vorlagebehälterdruck von 3 bar. In den zunächst durchgeführten Untersuchungen wird hierbei lediglich der Einfluss der Abreinigungsfolge untersucht. Ein wichtiger Indikator für die Parameterstudie zur Beurteilung des Regenerationsverhaltens ist die Änderung des Restdruckverlustes des Filtergewebes. Hierbei wird ein stabiler Filtrationsprozess angestrebt, d. h. der Restdruckverlust sollte sich über die einzelnen Zyklen nicht maßgeblich ändern. Als Restdruckverlust wird der gemessene Differenzdruck drei Sekunden nach dem Auslösen des Druckstoßes verwendet, da die Messung der Differenzdrücke durch den

Druckstoß selbst verfälscht wird (vgl. Abbildung 4). Aus den Restdruckverlusten und der Filteranströmgeschwindigkeit des Filtergewebes kann anschließend der Gesamtwiderstand berechnet werden (Gl. 1).

$$K_{ges} = \frac{\Delta p_0}{\mu v}$$

Gl. 1

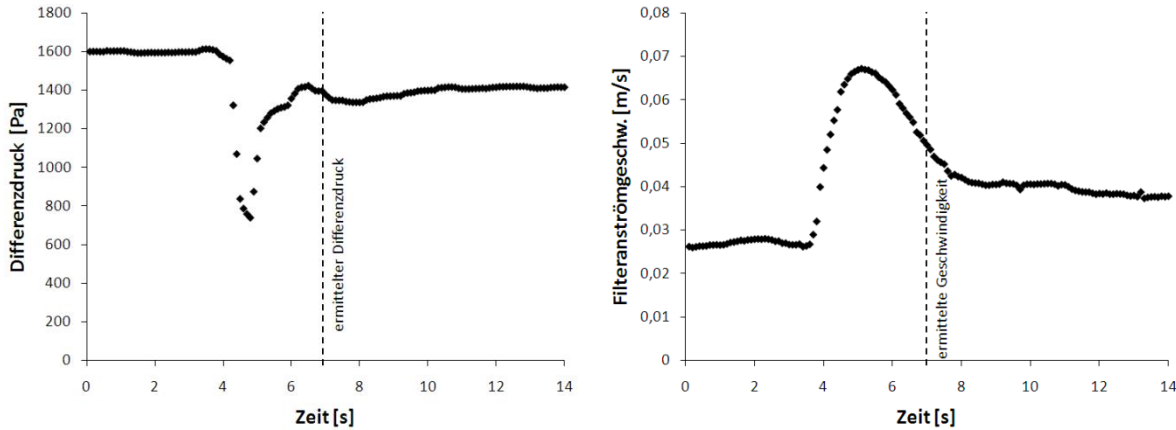


Abbildung 4: Differenzdruck und Filteranströmgeschwindigkeit über der Zeit in der MSLA mit Reihenabreinigung und ca. 20.000 Zyklen alten Filterschläuchen

Über die gesamte Betriebsdauer ist eine deutliche Änderung aller analysierten Parameter zu erwarten, da Partikel in das Filtergewebe eingelagert werden. Der Restdruckverlust und der Gesamtwiderstand sollten tendenziell steigen, wohingegen die Zykluszeiten und die Emission einen Abwärtstrend erfahren sollten.

Alterungsschritte

Nach jedem differenzdruckgesteuerten Versuch, bei dem die Filtergewebe wie bereits beschrieben 50 Zyklen betrieben werden, erfolgt der Alterungsprozess. Im Gegensatz zu den differenzdruckgesteuerten Versuchen wird das Filtergewebe hierbei zeitgesteuert durch Aufgabe von Druckstößen regeneriert. Die Intensität der Druckstöße wird übereinstimmend zu den differenzdruckgesteuerten Versuchen gewählt.

Die Alterung der Filterschläuche erfolgt in der MSLA stets mit einer Schrittgröße von 2.500 Zyklen. Zudem werden die Filterschläuche bei den Alterungsschritten immer reihenweise (RBR) abgereinigt. Für vergleichbare Zykluszeiten sollte alle 10 Sekunden eine Reihe regeneriert werden. Allerdings steigt durch die ständigen Druckstöße die Staubkonzentration im Rohgasraum. Um dem entgegenzuwirken, wird der Abreinigungsdruckstoß lediglich alle 20 Sekunden ausgelöst.

5.2. Messtechnik der MSLA

Im Folgenden wird auf einige Messinstrumente eingegangen, die für die Auswertung der MSLA -Filtrationsversuche benötigt werden.

Strömungssensor in der Mehrschlauchlaboranlage

Zur On-line-Messung der Strömungsgeschwindigkeit durch den Filterschlauch wird ein Thermosensor (SS20.500) der Firma Schmidt Technology verwendet. Dabei wird durch die gemessene Strömungsgeschwindigkeit der Volumenstrom durch den Schlauch ermittelt. Wie in Abbildung 5 dargestellt, befindet sich der Sensor über einem Filterschlauch zwischen dem Blasrohr und dem Eingang des Venturieinsatzes. Für die Kalibrierung des Sensors wird dieser zusammen mit einem kompletten Filterschlauch (inklusive Venturieinsatz) in die Einzelschlauchtestanlage eingebaut und mit variierenden Volumenströmen angeströmt. Den vom Strömungssensor ausgegebenen Rohwerten kann ein Volumenstrom und somit eine Filteranströmgeschwindigkeit zugeordnet werden.



Abbildung 5: Einbauposition des Thermosensors SS20.500 über dem Filterschlauch in der Mehrschlauchlaboranlage

PM2.5-Messzyklon

Um zu untersuchen wie groß die Feinstaubbelastung im Reingas ist, wird wie bei der Filterronden-Testanlage ein PM2.5 Zyklon verwendet. Der Zyklon ist auf der Reingasseite der MSLA im Fallrohr vor dem Hauptradiolgebläse installiert. Die Probennahme erfolgt isokinetisch.

5.3. Analyse des Langzeitbetriebsverhaltens der Mehrschlauchlaboranlage

Die Langzeitversuche zum Testen des Betriebsverhaltens sind in Filterronden-Testanlagen deutlich einfacher durchzuführen als in der Mehrschlauchlaboranlage. Zudem werden in der Industrie die Filtergewebe überwiegend mit solchen Testständen charakterisiert. Es wird daher angestrebt die MSLA so zu betreiben, dass das Filtergewebe im Langzeitbetrieb dasselbe Filtrationsverhalten, wie es in Filterronden-Testanlagen auftritt, erfährt. Um das Betriebsverhalten der Mehrschlauchlaboranlage anzupassen, ist zunächst eine Parameterstudie durchzuführen. Dabei werden mehrere Versuchsreihen gefahren bei denen unter Variation des Regenerationsdruckstoßes (5 bar, 3 bar und 1,5 bar) der Restdruckverlust, der Gesamtwiderstand und die Zykluszeit analysiert werden.

Vergleich der Restdruckverluste

Der Differenzdruck von neuen ebenen Filtergeweben unterscheidet sich beträchtlich von dem der Filterschläuche in der Mehrschlauchlaboranlage. Der Venturieinsatz trägt einen großen Anteil am Druckverlust ($\Delta p_{\text{Venturi}}$) bei und wird für eine bessere Vergleichbarkeit vom Differenzdruck über den Filterschlauch mit Venturieinsatz ($\Delta p_{\text{gemessen}}$) abgezogen. Zur Überprüfung dieser Annahme wird ein neuer Filterschlauch mit Venturieinsatz und Stützkorb (Filterschlauch komplett) mit unterschiedlichen Volumenströmen durchströmt und der Druckverlust gemessen. In Abbildung 6 ist zu sehen, dass der gemessene Druck im Filterschlauch, auf Grund des Venturieinsatzes, nicht linear mit der Filteranströmgeschwindigkeit ansteigt. Durch eine weitere Messung wird der Differenzdruckverlauf des Venturieinsatzes inklusive Stützkorb ermittelt. Die Differenzdruckverläufe der beiden Filtergewebe sind nach einer Korrektur identisch (Abbildung 6). Es ist daher für den Vergleich der beiden Versuchsanlagen notwendig, die gemessenen Druckverluste der Mehrschlauchlaboranlage zu korrigieren.

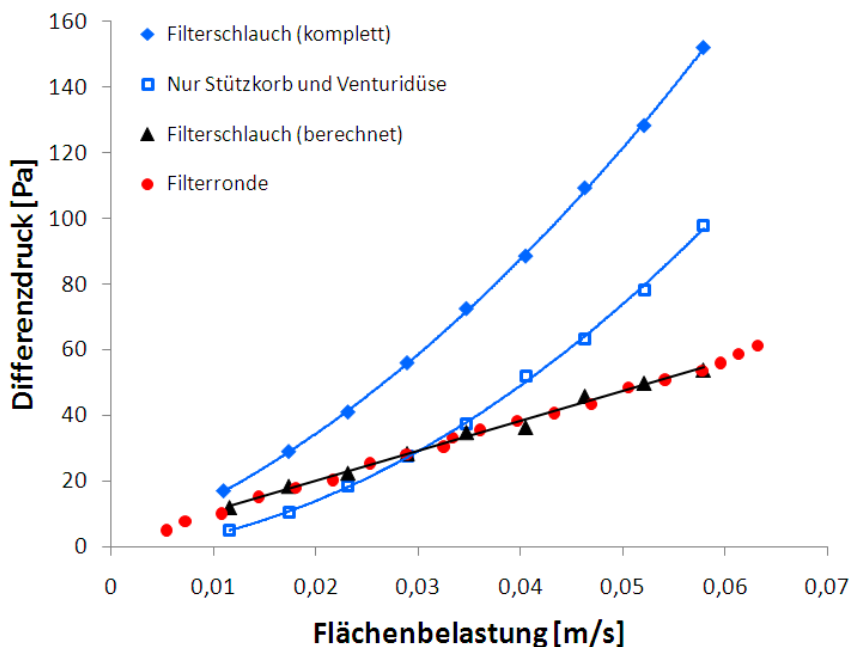


Abbildung 6: Differenzdruckverlauf über der Filteranströmgeschwindigkeit für neue Filtergewebe mit unterschiedlicher Geometrie und unterschiedlichen Einbauten

Durch den Einfluss der variierenden Filteranströmgeschwindigkeit über die Filterschlauchlänge wäre auch nach der Korrektur ein überproportionaler Verlauf des Druckverlustes zu erwarten gewesen. Die verwendeten Schläuche sind jedoch mit einer Schlauchlänge von lediglich 1250 mm vermutlich zu kurz, um einen derartigen Effekt auszubilden.

Als Vergleichsparameter für die beiden Versuchsanlagen werden unter anderem die Restdruckverluste nach den Regenerationsdruckstößen verwendet. In Abbildung 7 sind die Restdruckverluste nach der Regeneration dargestellt und über der Anzahl der durchgeführten Zyklen aufgetragen. Dabei werden die Restdruckverluste, die während der 50 differenzdruckgesteuerten Versuche gemessen werden, auf einen Datenpunkt gemittelt.

Bei den flachen Filterronden der Filterronden-Testanlage wird deutlich, dass der Restdruckverlust sehr stark von den Regenerationsbedingungen abhängt. Bei schwächeren Regenerationsdruckstößen, treten höhere Restdruckverluste des Filtergewebes auf. Zudem ist der Unterschied zwischen dem mit 1,5 bar betriebenen und dem mit 3 bar betriebenen Filtergewebe deutlich größer als der zwischen dem mit 3 bar und dem mit 5 bar betriebenen. Dies ist nicht unbegründet, da wie bereits beschrieben das mit 1,5 bar betriebene Filtergewebe einen instabilen Betrieb und deshalb einen starken Anstieg des Restdruckverlustes aufweist.

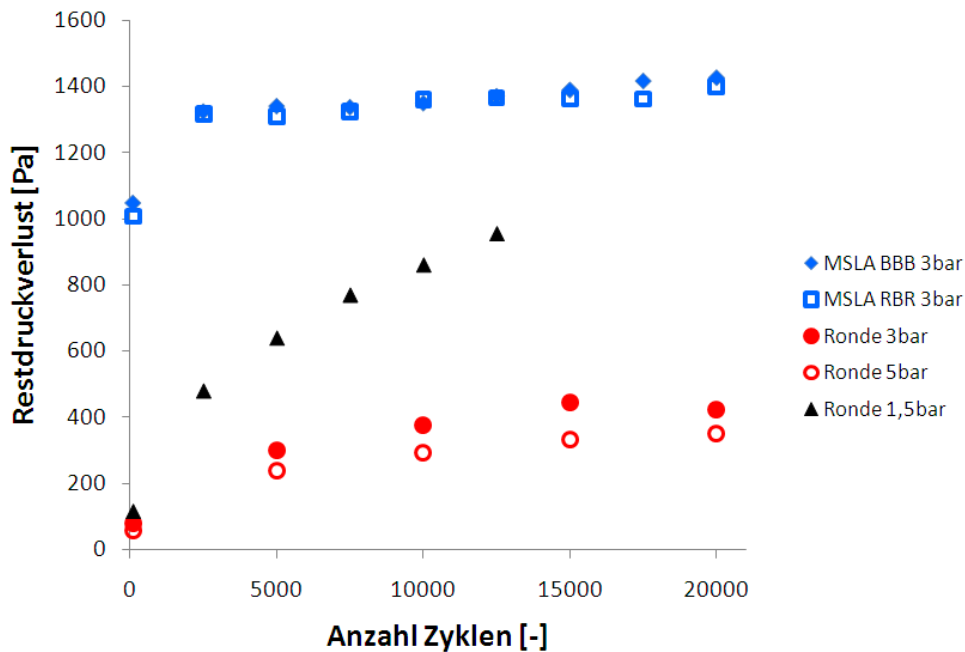


Abbildung 7: Restdruckverlust der Filtergewebe in der MSLA und VDI über der Anzahl der Zyklen (gemessen 3s nach der Druckstoßabreinigung) bei unterschiedlichen Regenerationsbedingungen

Bei den Restdruckverlusten der MSLA ist zu erkennen, dass sich das unterschiedliche Abreinigungsschema kaum auf den gemessenen Differenzdruck auswirkt. Wie auch bei der Filterronden-Testanlage ist ein starker Anstieg des Restdruckverlustes nach dem ersten Alterungsschritt zu beobachten. Die anschließenden Alterungsschritte der Mehrschlauchlaboranlage führen jedoch nur noch zu einem minimalen Anstieg des Restdruckverlustes. Es kann bei den eingesetzten Regenerationsdruckstößen von 3 bar von einem stabilen Betrieb der Schlauchfilteranlage ausgegangen werden.

Auffällig ist die Diskrepanz zwischen den Restdruckverlusten der Mehrschlauchlaboranlage und dem mit 3 bar betriebenen Medium in der Filterronden-Testanlage, obwohl die Filtermedien in beiden Anlagen mit dem gleichen Druck regeneriert werden. Da der Restdruckverlust in der Mehrschlauchlaboranlage über die Druckdifferenz zwischen Rohgas- und Reingasseite und nicht über einen einzelnen Filterschlauch ermittelt werden kann, wirkt sich das Abreinigen einzelner Filterschläuche kaum auf den Gesamtrestdruckverlust aus. Die unterschiedliche Dicke der Filterkuchen auf den Filterschläuchen wird dabei überwiegend durch unterschiedliche Filteranströmgeschwindigkeiten der einzelnen Filterschläuche ausgeglichen.

Abschließend betrachtet ist der Restdruckverlust als Vergleichsparameter für die beiden Anlagen nicht geeignet. Um im Folgenden die sich ändernde Filteranströmgeschwindigkeit im Filterschlauch zu berücksichtigen, wird im weiteren Verlauf der Arbeit der Gesamtwiderstand verwendet.

Vergleich der Gesamtwiderstände

Der Gesamtwiderstand wird über das Verhältnis vom gemessenen Differenzdruck zur Filteranströmgeschwindigkeit bestimmt (vgl. Gl. 1). Für die Darstellung wird der Mittelwert der Widerstände über die 50 Messzyklen gebildet und über der Anzahl der Zyklen aufgetragen (Abbildung 8).

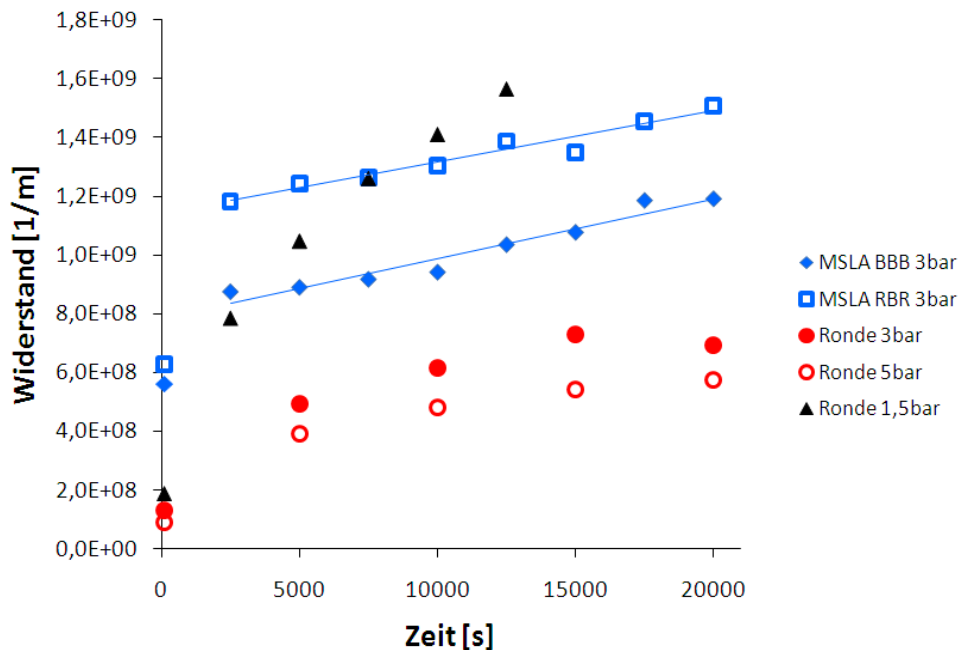


Abbildung 8: gemittelte Widerstände der Filtergewebe in der MSLA und VDI über der Anzahl der Zyklen (gemessen 3s nach Druckstoßabreinigung) bei unterschiedlichen Regenerationsbedingungen

Der Widerstand eignet sich besser zum Vergleich der beiden Anlagen, da der Einfluss der unterschiedlichen Filteranströmgeschwindigkeit verschwindet. Das mit 1,5 bar betriebene Filtergewebe zeigt einen rapiden Anstieg des Widerstands und weist nach ca. 10.000 Betriebszyklen sogar einen höheren Widerstand als die Filterschläuche auf, was wiederum für einen instabilen Betrieb spricht. Da die Filtergewebe in der Filterrunden-Testanlage mit einer konstanten Filteranströmgeschwindigkeit von 3,3 m/s durchströmt werden, unterscheidet sich der Verlauf der Widerstände nicht vom Restdruckverlust.

Bei den Versuchsreihen in der MSLA können durch die Betrachtung der Widerstände neue Erkenntnisse bezüglich des Einflusses der Abreinigungsfolge gewonnen werden. Während der ersten 50 Messzyklen befinden sich die Widerstände bei beiden Messreihen noch auf demselben Niveau, jedoch unterscheiden sich diese nach dem ersten Alterungsschritt von 2.500 Zyklen beträchtlich. Die Widerstände der Reihenabreinigung (RBR) sind dann deutlich höher als die der Einzelschlauchabreinigung (BBB). Allerdings steigt der Widerstand nach dieser „Einlaufphase“ bei beiden Abreinigungsfolgen gleichermaßen an, wodurch die Widerstände dann nahezu parallel zueinander verlaufen.

Um zu verstehen, was genau bei der Regeneration in den beiden Anlagen passiert, ist in Abbildung 9 ein zeitlich hoch aufgelöster Verlauf des Widerstands dargestellt. Zum einen kann

hierbei der Einfluss der Abreinigungsfolge analysiert werden und zum anderen wird zusätzlich der Unterschied der beiden Anlagen beim Regenerationsdruckstoß verdeutlicht. Für den Vergleich der beiden Anlagen ist der Widerstandsverlauf der mit 3 bar betriebenen Filtergewebe im gleichen Betriebsalter dargestellt.

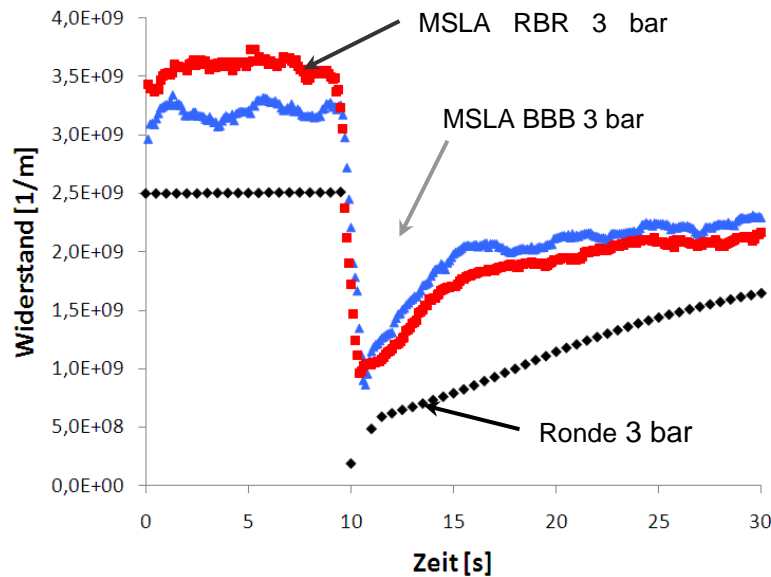


Abbildung 9: zeitlich hoch aufgelöster Verlauf des Widerstandes in MSLA und VDI über der Zeit beim Regenerationsdruckstoß (Gewebe ca. 20.000 Zyklen gealtert)

Die Widerstände vor dem Regenerationsdruckstoß spiegeln die Filterkuchendicke wider. Je mehr Filterkuchen sich auf dem Gewebe befindet, desto größer ist der Widerstand. Nach dem Regenerationsdruckstoß steigt der Widerstand in der Mehrschlauchlaboranlage schneller als in der Filterrunden-Testanlage. Eine hohe Filteranströmgeschwindigkeit begünstigt das erneute Anlagern bereits abgeschiedener Staubpartikel. Da in der Mehrschlauchlaboranlage direkt nach der Abreinigung viel höhere Anströmgeschwindigkeiten auftreten, wird der abgestoßene Staub umgehend wieder angesaugt, was den Widerstand erhöht. Die höhere Rohgaskonzentration bei der Reihenabreinigung und die größere freie Filterfläche verstärken diesen Effekt.

Des Weiteren wird geprüft, inwieweit sich der abweichende Verlauf des Widerstands beim Regenerationsdruckstoß auf den Filtrationsprozess auswirkt. Hierzu ist in Abbildung 10 der Widerstandsverlauf über die Zeit für die ersten Messzyklen der einzelnen Messreihen dargestellt.

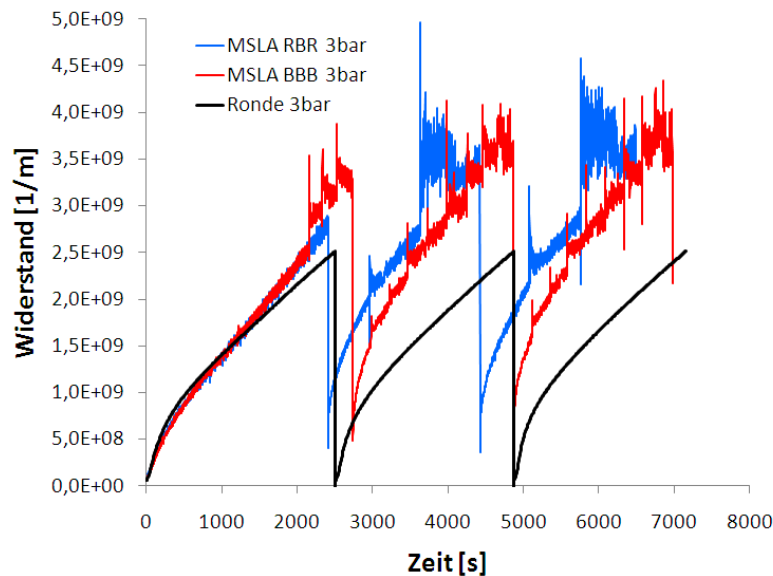


Abbildung 10: Verlauf der berechneten Widerstände über der Zeit während der ersten beiden Zyklen (neues Filtergewebe, Regenerationsdruckstoß 3bar)

Zu Beginn des Filtrationsprozesses mit neuen Filtergeweben ist der Verlauf der Widerstände nahezu identisch, da annähernd die gleiche Rohgaskonzentration vorliegt und das Filtergewebe aus dem gleichen Material besteht. Allerdings ist bei der MSLA, im Gegensatz zur Filterronden-Testanlage, bereits nach der ersten Abreinigung ein deutlich größerer Widerstand zu erkennen. Dies spricht entweder für eine ungenügende Regeneration oder für das schnelle Wiederanlagern von zuvor abgelöstem Staub. Dem gegenüber fällt der Widerstand in der Filterronden-Testanlage nach der Regeneration annähernd auf den Anfangswert zurück. Die Regeneration ist in der Filterronden-Testanlage somit deutlich effektiver als die in der Mehrschlauchlaboranlage.

Vergleich der Zykluszeiten

Die in den vorherigen Kapiteln beschriebene ungenügende Abreinigung sollte sich bei den Langzeitversuchen durch kürzere Zykluszeiten bemerkbar machen. Wie in Abbildung 11 visualisiert, sind die Zykluszeiten jedoch annähernd gleich lang. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass die Zykluszeit bei der Mehrschlauchlaboranlage nicht dem Zeitraum zwischen den einzelnen Regenerationsdruckstößen entspricht, sondern der Zyklus erst dann abgeschlossen ist, wenn alle Filterschläuche einmal abgereinigt wurden. Die Abstände zwischen den einzelnen Regenerationsdruckstößen sind folglich kürzer als die in der VDI-Anlage.

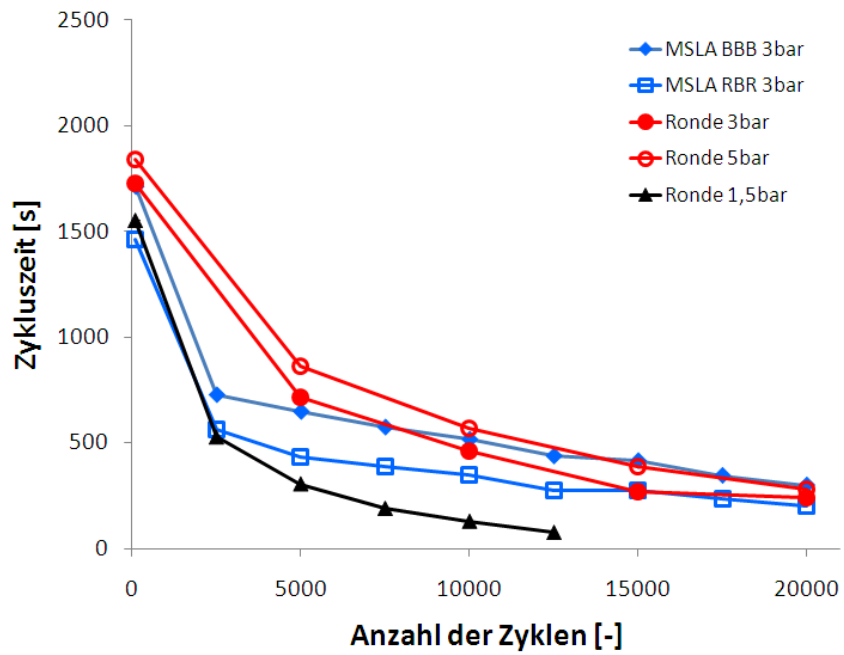


Abbildung. 11: gemittelte Zykluszeiten der Filtergewebe in der MSLA und VDI über der Anzahl der Zyklen bei unterschiedlichen Regenerationsbedingungen

Ein höherer Vorlagebehälterdruck in der Filterrunden-Testanlage führt zu längeren Zykluszeiten. Gleichfalls werden die Zykluszeiten in der MSLA durch die Abreinigungsfolge beeinflusst, weshalb die Zykluszeiten bei der Einzelschlauchabreinigung etwas länger sind.

5.4. Emissionsmessungen an der Mehrschlauchlaboranlage

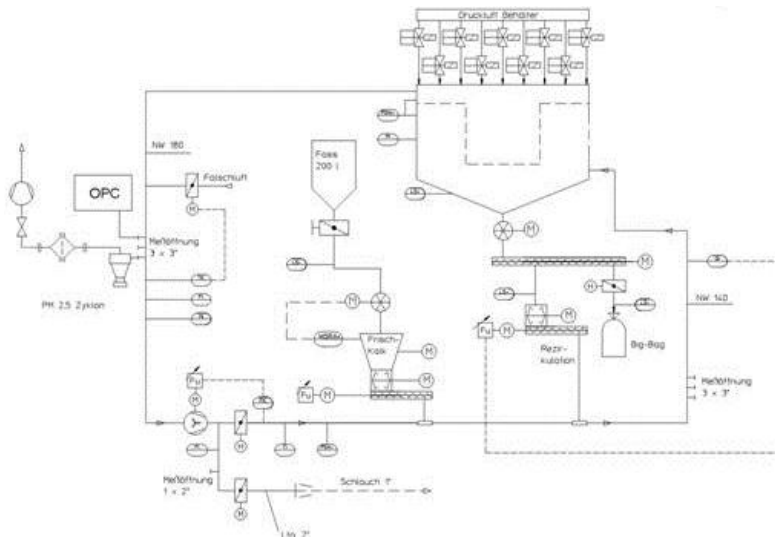


Abbildung 12: Messstelle für die Emissionsmessungen in der MSLA
Links: Fließbild mit Messstellen Rechts: Foto des Sensorkopfe an Einbaustelle

Im Folgenden soll darauf eingegangen werden, wie sich die Höhe des Vorlagebehälterdruckes beim Regenerationsdruckstoß auf die Emission der MSLA auswirkt. Dabei ist gleichermaßen zu prüfen, ob die unterschiedlichen Abreinigungsfolgen (RBR bzw. BBB) in der Mehrschlauchlaboranlage eine Auswirkung auf die Emission haben. Zu betrachtende Parameter sind hierbei die emittierte Partikelanzahl pro Zyklus, genormt auf die Intervallbreite des Messkanals, die q_0 -Verteilung bei der eine Normierung auf die Gesamtanzahl erfolgt, und die Volumenverteilung pro Zyklus, welche ebenfalls auf die Intervallbreite der Messkanäle normiert ist.

Einfluss der Abreinigungsfolge auf die Emission in der MSLA

Im Folgenden soll analysiert werden, wie sich das Abreinigungsschema auf das Emissionsverhalten auswirkt.

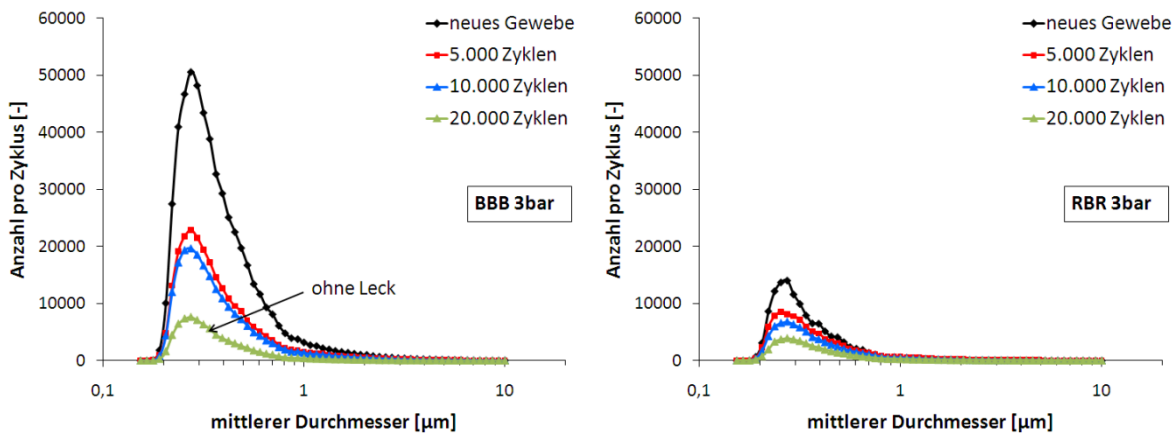


Abbildung 13: Anzahl emittierter Partikel pro Zyklus über dem Partikeldurchmesser für Einzelschlauchabreinigung (BBB, links) und Reihenabreinigung (RBR, rechts) bei unterschiedlichem Medienalter

In Abbildung 13 (links) ist die Anzahl der emittierten Partikel bei der Einzelschlauchabreinigung über dem mittleren Partikeldurchmesser für unterschiedliche Medienalter aufgetragen. In demselben Maße wie bei der Filterrunde wird durch das Einlagern von Partikeln in das Filtergewebe die Emission reduziert. Beim Vergleich der Einzelschlauch- mit der Reihenabreinigung wird allerdings deutlich, dass bei der Reihenabreinigung viel weniger Partikel im Reingas detektiert werden (Abbildung 13, rechts). Vermutlich ist bei dieser starken Diskrepanz nicht das Abreinigungsschema der ausschlaggebende Einflussfaktor, sondern ein durch den Betrieb entstandenes Leck zwischen Rohgas- und Reingasseite. Um darstellen zu können, ob bei der Einzelschlauchabreinigung ein Leck vorhanden ist und wie stark sich dieses auf die Emission auswirkt, wird jeweils ein Auszug der Streulichtdaten bei den ersten 50 Messzyklen miteinander verglichen. In Abbildung 14 sind die zeitlichen Verläufe der Partikelemission über die Versuchszeit dargestellt. Dabei werden die in einem Zeitintervall von zehn Sekunden detektierten Partikel zu einem Messwert zusammengefasst. Die regelmäßig auftretenden Emissionsspitzen stellen den Partikeldurchtritt beim Regenerationsdruckstoß dar.

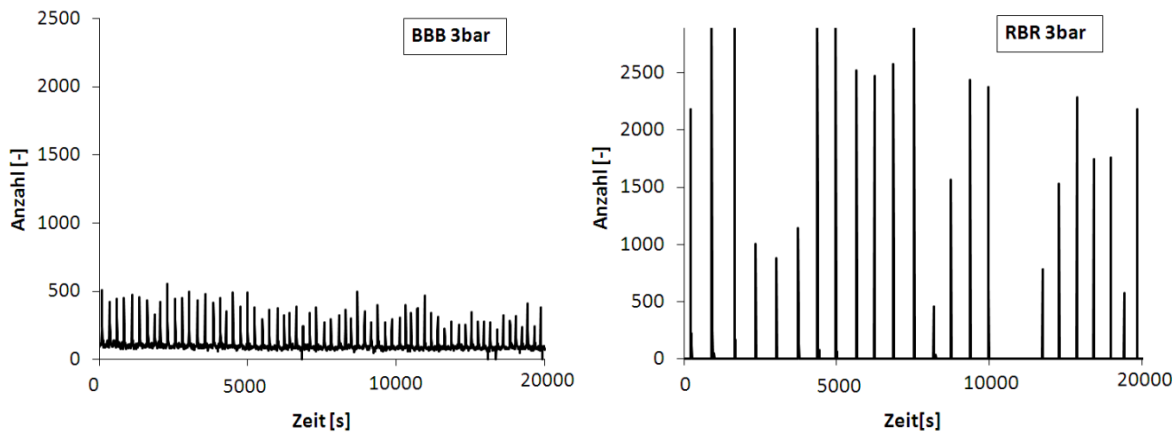


Abbildung 14: Anzahl der in einem Zeitintervall von 10 s detektierten Partikel bei Einzelschlauchabreinigung (links) und Reihenabreinigung (rechts) aufgetragen über Versuchszeit (neue Filterschläuche)

Bei der Einzelschlauchabreinigung (links) ist zu erkennen, dass während des gesamten Versuchs unabhängig von den Regenerationsdruckstößen ca. 100 Partikel detektiert werden. Dies spricht für einen kontinuierlichen Partikeldurchtritt während des gesamten Filtrationsbetriebs. Jedoch ist bei der Oberflächenfiltration zu erwarten, dass während der Phase der Kuchenfiltration kaum Partikel auf die Reingasseite gelangen. Folglich gelangen die detektierten Partikel durch ein Leck in den Reingasraum. Im Gegensatz dazu werden bei der Reihenabreinigung (rechts) zwischen den Druckstößen keine Partikel detektiert. Angesichts dieser Erkenntnis wurde eine Dichtigkeitsprüfung durchgeführt und das Leck im Anschluss verschlossen. Die letzten 50 Messzyklen der Einzelschlauchabreinigung sollten folglich ohne zusätzlichen Partikeldurchtritt erfolgen. Jedoch traten bei diesem Versuch erneut höhere Emissionswerte auf, was auf die lange Betriebszeit mit Leck zurückgeführt werden kann. Durch die Strömungsumkehr bei der Regeneration können sich Partikel an der Reingasseite der Filterschläuche anlagern und somit das Emissionsverhalten nachhaltig verändern. Aus diesem Grund kann auch dieser Versuch nicht für den Vergleich der beiden Abreinigungsfolgen verwendet werden.

Zur Überprüfung des Einflusses des Abreinigungsschemas erfolgte deshalb mit den gleichen Filterschläuchen, die bei der Reihenabreinigung verwendet wurden, direkt im Anschluss ein Messzyklus mit Einzelschlauchabreinigung. Die Filterschläuche waren bei den beiden Messreihen ca. 20.000 Zyklen gealtert. In Abbildung 15 ist für den besseren Vergleich eine zeitliche Aufnahme der Emissionswerte für die Einzelschlauchabreinigung (links) und die Reihenabreinigung (rechts) dargestellt.

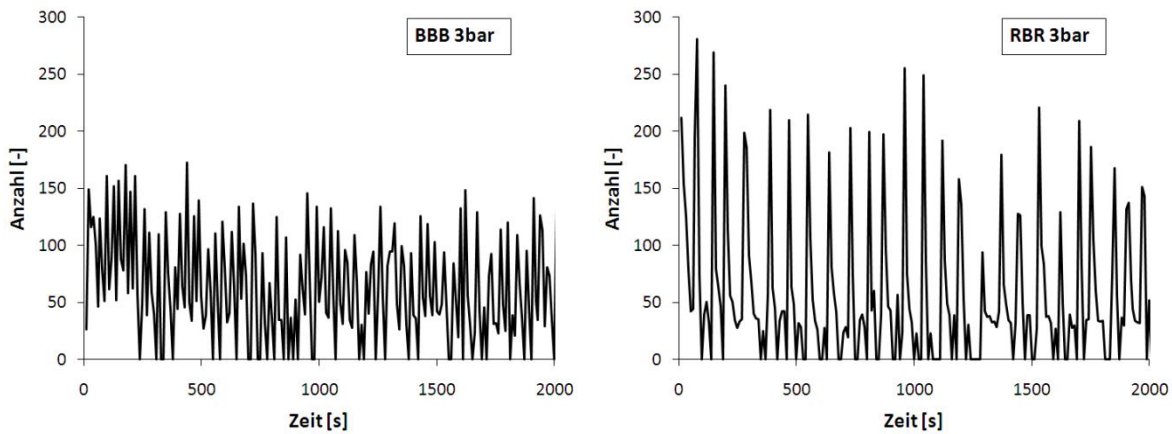


Abbildung 15: Anzahl der detektierten Partikel bei Einzelschlauchabreinigung (links) und Reihenabreinigung (rechts) aufgetragen über der Versuchszeit (20.000 Zyklen betriebene Filterschläuche)

Hierbei ist zu erkennen, dass bei der Einzelschlauchabreinigung die maximale Emission geringer ist, aber die Abreinigungen schneller nacheinander erfolgen. Bei der Reihenabreinigung sind die maximalen Emissionswerte zwar höher, allerdings sind die Abstände zwischen den einzelnen Abreinigungen größer. Um zu prüfen, ob die Emissionsspitze oder der zeitliche Abstand einen stärkeren Einfluss auf den Partikeldurchtritt ausübt, ist die emittierte Partikelanzahl pro Zyklus zu analysieren (Abbildung 16, links).

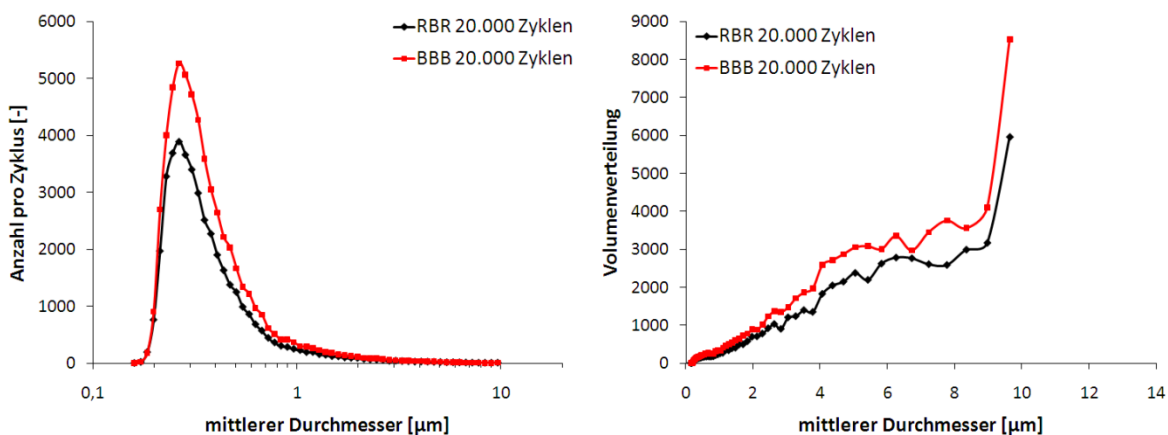


Abbildung 16: Anzahl emittierter Partikel pro Zyklus (links) und Volumenanteil pro Zyklus (rechts) über Partikeldurchmesser für gealterte Filterschläuche (ca. 20.000 Zyklen) mit unterschiedlichem Abreinigungsschema

Dabei ist zu erkennen, dass bei der Einzelschlauchabreinigung fast über das gesamte Größenspektrum mehr Partikel auf die Reingasseite gelangen als bei der Reihenabreinigung. Gleichermassen ist dieser Effekt bei der Volumenverteilung zu beobachten (Abbildung 16, rechts).

Bei der Regeneration wird der abgeworfene Filterkuchen teilweise wieder angelagert, wodurch sehr schnell die Phase der Kuchenfiltration einsetzt. Bei der Reihenabreinigung steht dafür deutlich mehr Staub zur Verfügung, was diesen Effekt begünstigt. Die Emission ist dabei nicht von der Partikelkonzentration im Rohgas abhängig. Jedoch besteht die Möglichkeit, dass die Emission teilweise von der Filteranströmgeschwindigkeit beeinflusst wird.

Direkt nach dem Regenerationsdruckstoß treten beim abgereinigten Filterschlauch die größten Anströmgeschwindigkeiten auf. Wegen dem schnellen Wiederanlagern von Partikeln bei der Reihenabreinigung erfolgt eine deutliche Reduzierung der Anströmgeschwindigkeit, wodurch vermutlich weniger Partikel emittiert werden. Zum Verifizieren dieser Aussage sind allerdings weitere Studien notwendig, da dieser Effekt bei bisherigen Untersuchungen (flache Filtergewebe) nicht festgestellt werden konnte.

Einfluss der Speichertankdrucks auf die die PM2.5-Massenkonzentration in der MSLA

Ein am MVM entwickeltes Kalibrierverfahren für das PALAS-Streulichtgerät ermöglichte es, die PM2.5- sowie die ungewichtete Massenkonzentration für die MSLA zu bestimmen. Im Rahmen des Projekts konnte eine Variation des Speichertankdrucks nur für das Einzelschlauch-Abreinigungsschema (BBB) durchgeführt werden. Die Rohgaskonzentration wurde auf 10 g/m³ eingestellt. Es ist anzumerken, dass für jeden Datenpunkt nur eine Messung stattfand. Über die Standardabweichung der Ergebnisse kann daher keine Aussage getroffen werden. Es werden ausgedehntere Messreihen notwendig sein, um die hier vorgestellten Ergebnisse zu validieren.

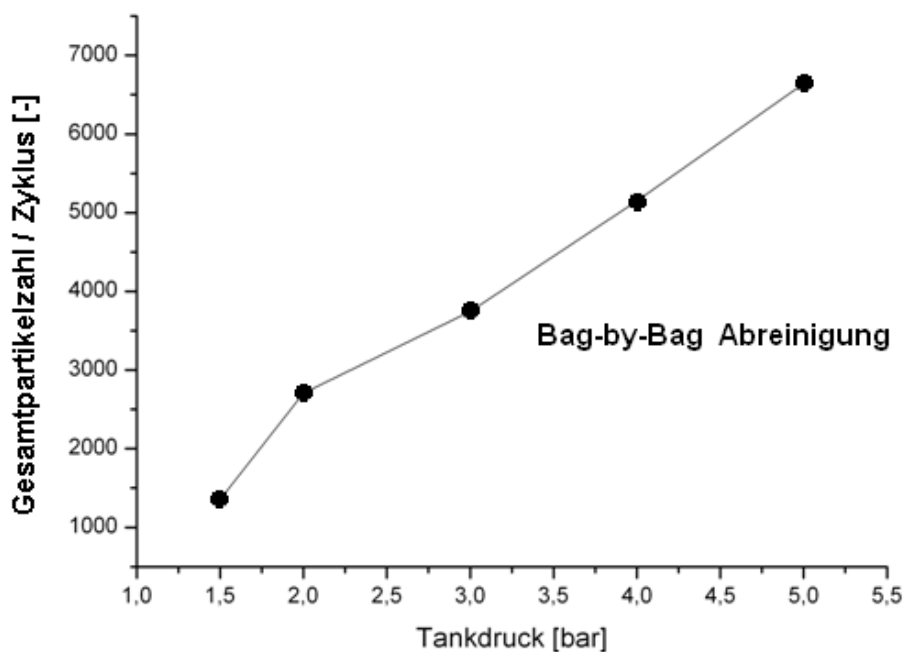


Abbildung 17: Gesamtpartikelzahl pro Zyklus bei variierendem Speichertankdruck (Einzelschlauchabreinigung; $\Delta p_{\max} = 1800$ Pa, Mittelung über 5 Umläufe)

In Abbildung 17 ist deutlich zu erkennen, dass der Abreinigungserfolg mit zunehmendem Tankdruck deutlich steigt. Wie bei den Versuchen in der Filterrunden-Testanlage steigt die Emission pro Zyklus mit dem Tankdruck an. Die Zykluszeit nimmt dagegen (wie schon in der Filterrunden-Testanlage) mit zunehmendem Tankdruck zu (Abbildung 18).

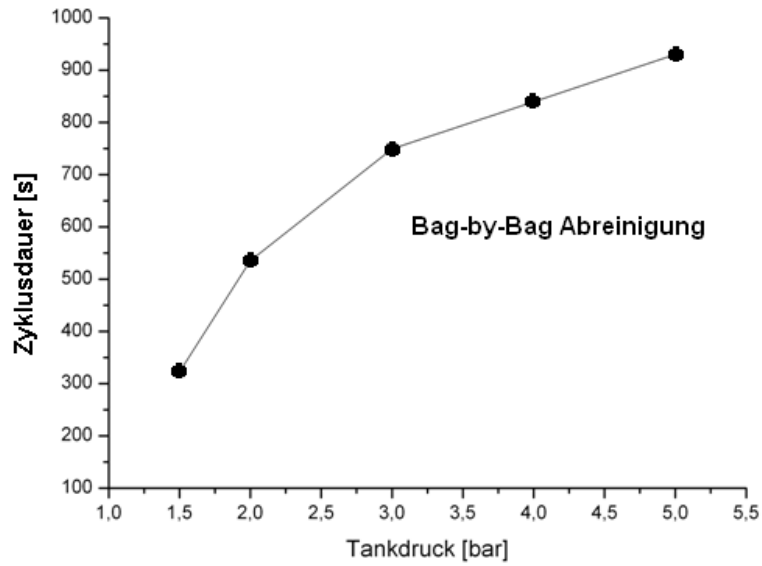


Abbildung 18: Zyklusdauer in der MSLA bei variierendem Speichertankdruck (Einzelschlauchabreinigung; $\Delta p_{\max} = 1800 \text{ Pa}$, Mittelung über 5 Umläufe)

Die Zyklusdauer in der MSLA nähert sich bei zunehmendem Tankdruck einem Maximalwert (der vollständigen Abreinigung) an, die aber bei 5 bar noch nicht erreicht werden. Trotz der Verlängerung der Zyklusdauer steigt die Partikelkonzentration mit steigendem Tankdruck an (Abbildung 19), da dieser Effekt von der erhöhten Emission pro Umlauf überkompensiert wird.

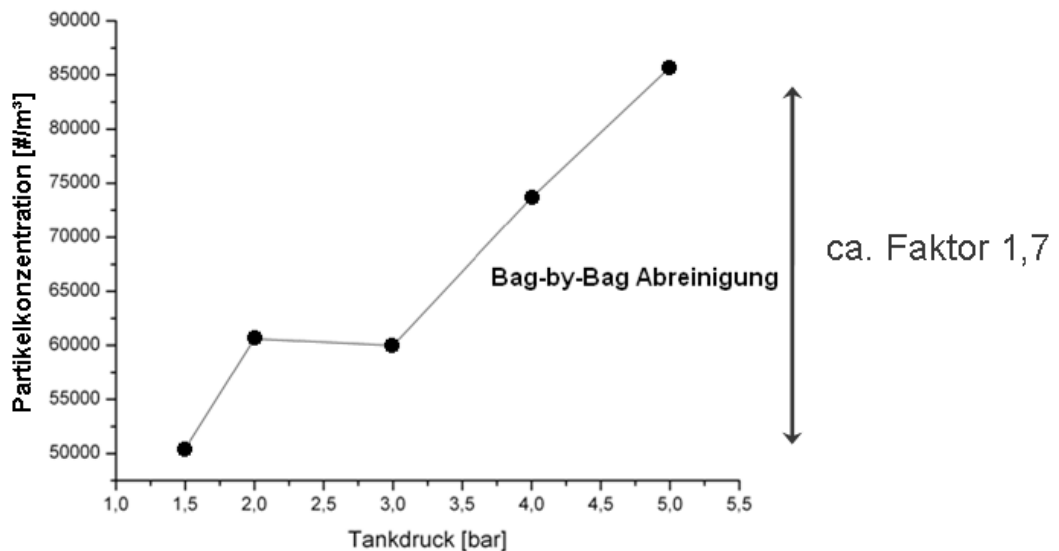


Abbildung 19: Partikelkonzentration in der MSLA bei variierendem Speichertankdruck (Einzelschlauchabreinigung; $\Delta p_{\max} = 1800 \text{ Pa}$, Mittelung über 5 Umläufe)

Einfluss des Alterungszustandes auf die Emissionen in der MSLA

Für die Abreinigungsfolgen BBB (Einzelschlauchabreinigung) und RBR (Reihenabreinigung) wurden die Feinstaubemissionen mit zunehmendem Medienalter aufgezeichnet. Dabei wurde leider erst bei der Auswertung der Versuchreihen festgestellt, dass sich beim BBB-Versuch ein winziges Leck im Bereich der Kopfplatte der MSLA gebildet hatte. Aufgrund der sehr langen Versuchzeiten und der anstehenden Mekampagne an der Nederman-Anlage war eine Wiederholung des Versuchs im BBB-Betrieb nicht möglich. Die Daten sollen der Vollständigkeit halber hier trotz allem aufgeführt werden.

Abbildung 20 zeigt die Gesamtzahl der pro Zyklus emittierten Partikel aufgetragen über dem Medienalter. Bei beiden Abreinigungsfolgen erkennt man einen deutlichen Rückgang der emittierten Partikel mit zunehmendem Medienalter. Beim leckbehafteten BBB-Versuch fällt der Rückgang sogar noch stärker aus, als beim leckfreien RBR-Versuch. Das Emissionsniveau mit Leck erreicht dagegen auch nach Abdichtung des Lecks nach 17500Z nicht das Niveau des leckfreien Betriebs.

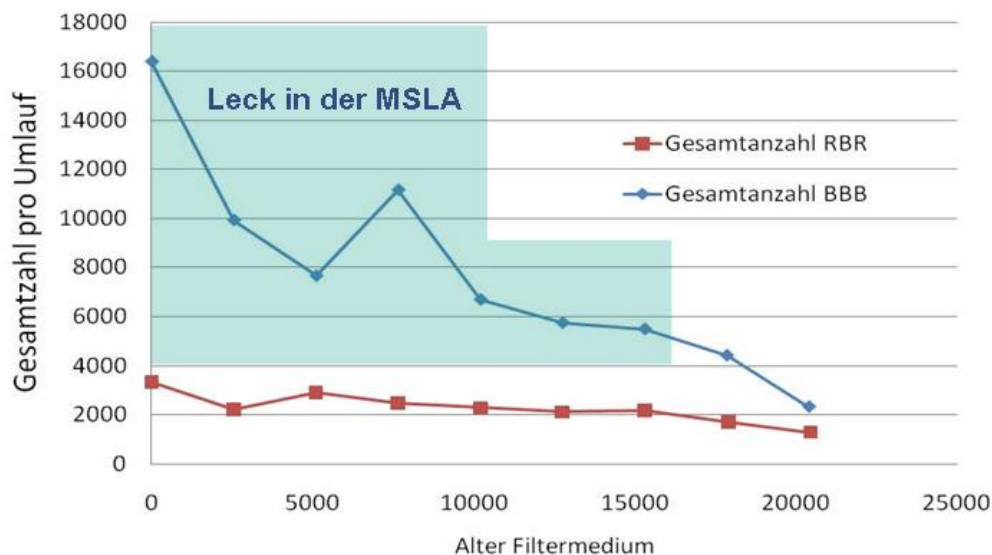


Abbildung 20: Gesamtzahl der pro Zyklus emittierten Partikel über Medienalter (3 bar Tankdruck, $\Delta p_{max} = 1590$ Pa, Mittelung über 5 Umläufe)

Auch bei der Massenkonzentration ist der Einfluss des Lecks in der MSLA deutlich erkennbar. Die Konzentrationen mit Leck liegen deutlich über den ohne Leck auftretenden Konzentrationen. Jedoch fanden sich bei beiden Versuchen, also unabhängig vom der Abreinigungsfolge und unabhängig vom (kleinen) Leck sehr niedrige Emissionen (<1 mg/m³) (Abbildung 21). Man erkennt zusätzlich zunehmende Partikelemission bei zunehmendem Medienalter. Auch dieses Verhalten konnte schon auf der Filterronden-Testanlage vorgefunden werden.

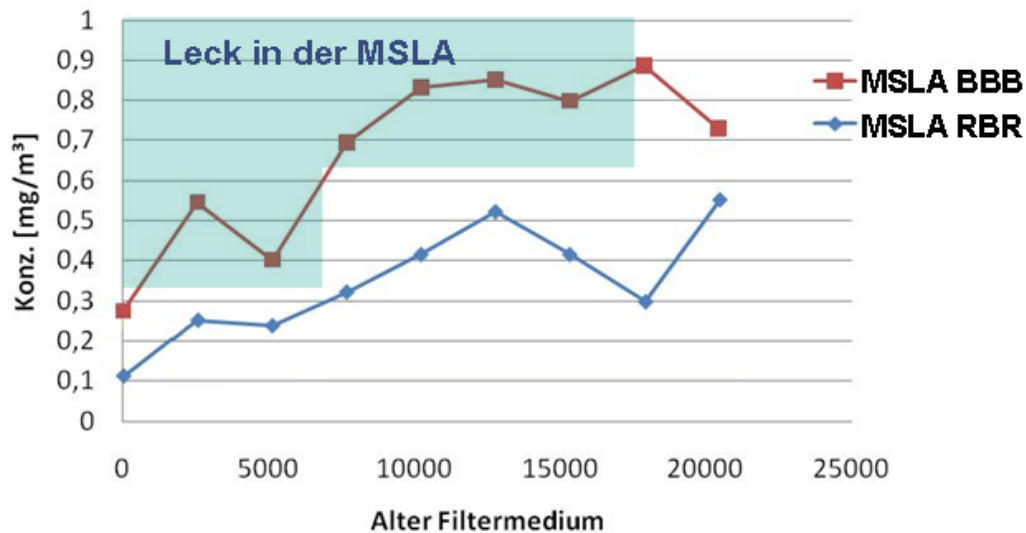


Abbildung 21: Reingaskonzentration der MSLA über Medienalter (3 bar Tankdruck, $\Delta p_{\max} = 1590$ Pa, Mittelung über 5 Umläufe)

Zusammenfassung

Im Rahmen des Teilprojekts 1 wurde eine Mehrschlauchlaboranlage (MSLA) projektiert, aufgebaut und in Betrieb genommen. Jeder dieser Teilschritte erfolgte in Rücksprache mit dem beteiligten Projektpartnern. Die Versuchsanlage wurde mit geeigneter Messtechnik für die Erfassung der Betriebsdaten und der Feinstaubemissionen ausgestattet.

Die Betriebsbedingungen der MSLA wurden so eingestellt, dass sie denen einer Filterrunden-Testanlage möglichst nahe kommen. Jedoch existieren in der MSLA Effekte, die sich nicht in der Filterrunden-Testanlage vorfinden. So schwankt die Filteranströmgeschwindigkeit, die ein einzelner Schlauch erfährt, sehr stark innerhalb der Anlagenzyklen.

An der MSLA erfolgten Messreihen mit den beiden Abreinigungsfolgen Einzelschlauchabreinigung (BBB) und Reihenabreinigung (RBR) für einen fest gewählten Tankdruck (3 bar). Es zeigte sich dabei, dass der Restdruckverlust bei Mehrschlauchanlagen kein geeignetes Maß zu Beschreibung der Vorgänge in den Anlagen darstellt. Daher wurde der Restdruckverlust durch den Filterwiderstand substituiert, mit dem sich auch der Zustand einzelner Schläuche beschreiben lässt. Es zeigte sich, dass die Abreinigung in der Filterrunden-Testanlage sehr viel effektiver abläuft, was zum Einen an einer höheren Abreinigungsintensität des Filtermaterials liegen kann. Zum Anderen kann in der MSLA die Wiederanlagerung des abgeworfenen Staubes durch die erhöhte Filteranströmgeschwindigkeit und der längeren Sedimentationsstrecke zu einer nachträglichen Verschlechterung des Abreinigungserfolgs führen.

Bei der Feinstaubemission in der MSLA zeigten sich dieselben Grundtendenzen, wie sie schon in der Filterrunden-Testanlage vorzufinden waren. Allerdings findet sich dabei auch ein deutlicher Einfluss von Sekundäreffekten, wie Abreinigungsfolge, Ventilöffnungszeiten und variierenden Anströmgeschwindigkeiten.

Bei den Versuchsserien mit variierender Abreinigungsfolge war zudem ein Leck aufgetreten. Obwohl es sich dabei um ein sehr kleines Leck handelte, ist der Einfluss auf die Emission deutlich festzustellen. Bei industriellen Filteranlagen, die evtl. nicht gleichermaßen gewartet

werden, werden derartige Lecks nicht zu vermeiden sein. Mit dem Streulichtmessgerät kann die Existenz derartiger Lecks bei neuen Filtermedien jedoch einfach aufgezeigt werden, indem der Abfall der detektierten Partikel nach einem Druckstoß betrachtet wird. Fällt die Zählrate auf ein Niveau nahe Null ab, kann von einem leckfreien Betrieb ausgegangen werden. Beim Auftreten eines „Grundrauschens“ in der Zählrate ist von einem Leck auszugehen.

6. Ergebnisse Teilprojekt 2

Teilprojekt 2

Verantwortlicher Partner: Fa. Junker Filter

Zentrales Ziel: Praxiserprobung neuer Filtermedien mit verbesserten Eigenschaften bezügl. Feinstaubemission.

Das Teilprojekt 2 beinhaltet folgende Bereiche:

- Auswahl und Charakterisierung der Filtermedien
- Labormessungen am VDI-Prüfstand
- Messungen an der Technikumsanlage
- Messungen an industriellen Schlauchfilteranlagen.

6.1. Auswahl und Charakterisierung der Filtermedien

Aufgrund von Erfahrungen und vereinfachten Filterprüfungen ohne Messungen von Feinstaubanteilen im Reingas erfolgte eine Vorauswahl von folgenden 4 Filtermedien:

- Standard-Polyesternadelfilz (Bezeichnung JF0390)
- Polyesternadelfilz mit Feinfaser (Bezeichnung JF0146)
- Polyesternadelfilz mit PTFE-Membrane (Bezeichnung JF0114)
- Polyesternadelfilz mit Melt-Blown-Layer (Bezeichnung JF-D0201).

Medium	Standard-Polyesternadelfilz	Polyesternadelfilz mit Feinfaser	Polyesternadelfilz mit PTFE-Membrane	Polyesternadelfilz mit Melt-Blown
Bezeichnung	JF0390	JF0146	JF0114	JF-D0201
Flächengewicht [g/m ²]	550	550	500	480
Dicke [mm]	1,9	2,0	1,9	1,6
Luftdurchlässigkeit [l/dm ² min]	150	120	60	50

Tabelle 1 Textiltechnologische Eigenschaften der untersuchten Filtermedien

Untersuchungen zum Aufbau der ausgewählten Filtermedien

Standard-Polyesternadelfilz (Bezeichnung JF0390)

In Abbildung 22 ist der Querschnitt des Standard-Polyesternadelfilzes dargestellt. Der Begriff Standard resultiert aus seiner homogenen Fasermischung von Faserdurchmessern bzw. einem sogenannten Mischtitel (durchschnittlicher Faserdurchmesser), welcher sich in der Filtrationsbranche zu einem Standard etabliert hat.

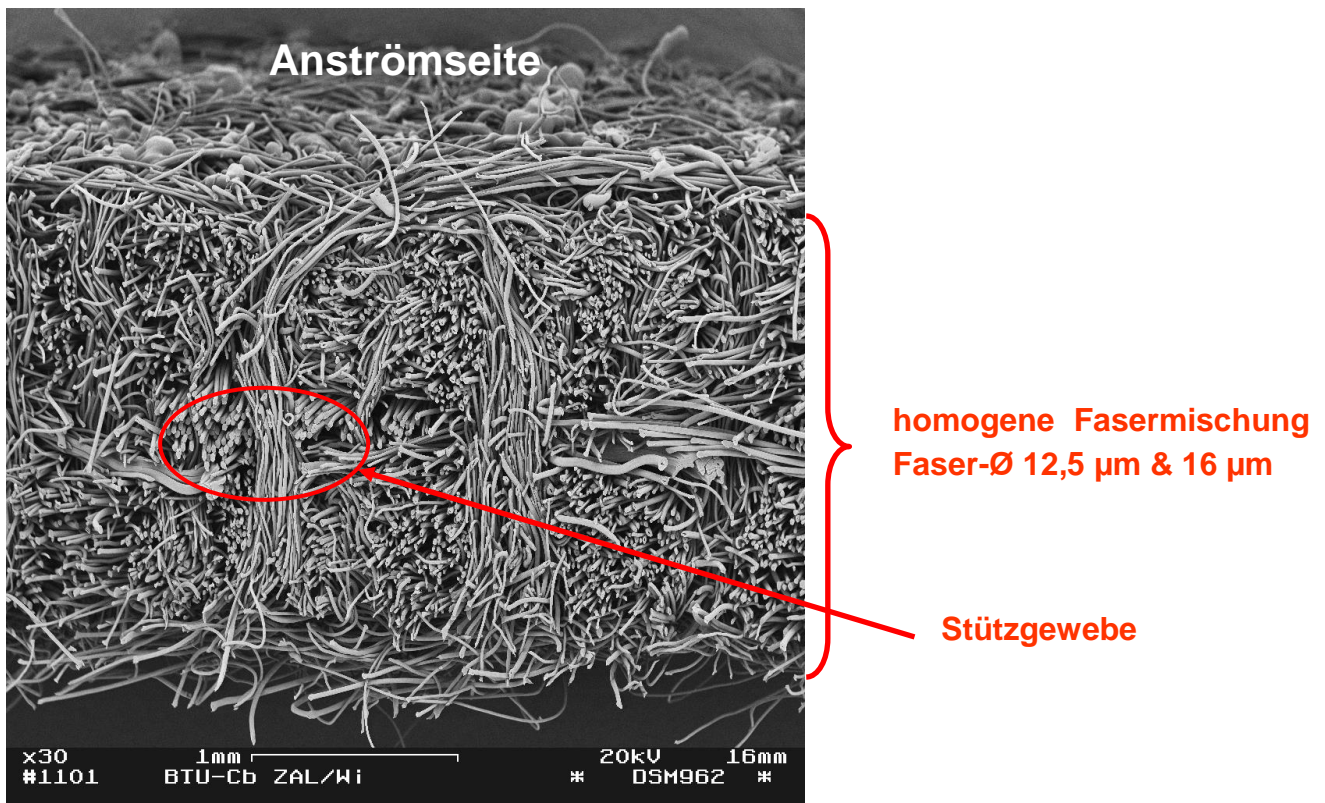


Abbildung 22: Querschnittsaufnahme des Standard-Polyesternadelfilzes

Polyesternadelfilz mit Feinfasern (Bezeichnung JF0146)

Die Querschnittsaufnahme des Polyesternadelfilz mit Feinfasern ist in Abbildung 23 abgebildet. Dieser besteht aus einer deutlich feineren Fasermischung (Mischtitel) auf der Anströmseite als auf der Abströmseite. Durch die feinere Fasermischung erhöht sich bei gleichem Flächengewicht die für die Abscheidung relevante Faser Oberfläche auf der Anströmseite des Filtermediums. Mit diesem Aufbau ist im Vergleich zum Standard-Polyesternadelfilz eine stärker oberflächenorientiert ausgeprägte Filtration zu erwarten. Die gröbere Fasermischung auf der Abströmseite soll dabei folgende 2 Funktionen unterstützen:

1. Verstärkung der mechanischen Stabilität des Filterschlauches bei der Wechselbeanspruchung des Filtermediums mit dem Stützkorb während der Druckluftabreinigungsphasen
2. Reduzierung des Filterwiderstandes durch die größeren Poren auf der Abströmseite, die sich aufgrund der gröberen Fasern ergeben

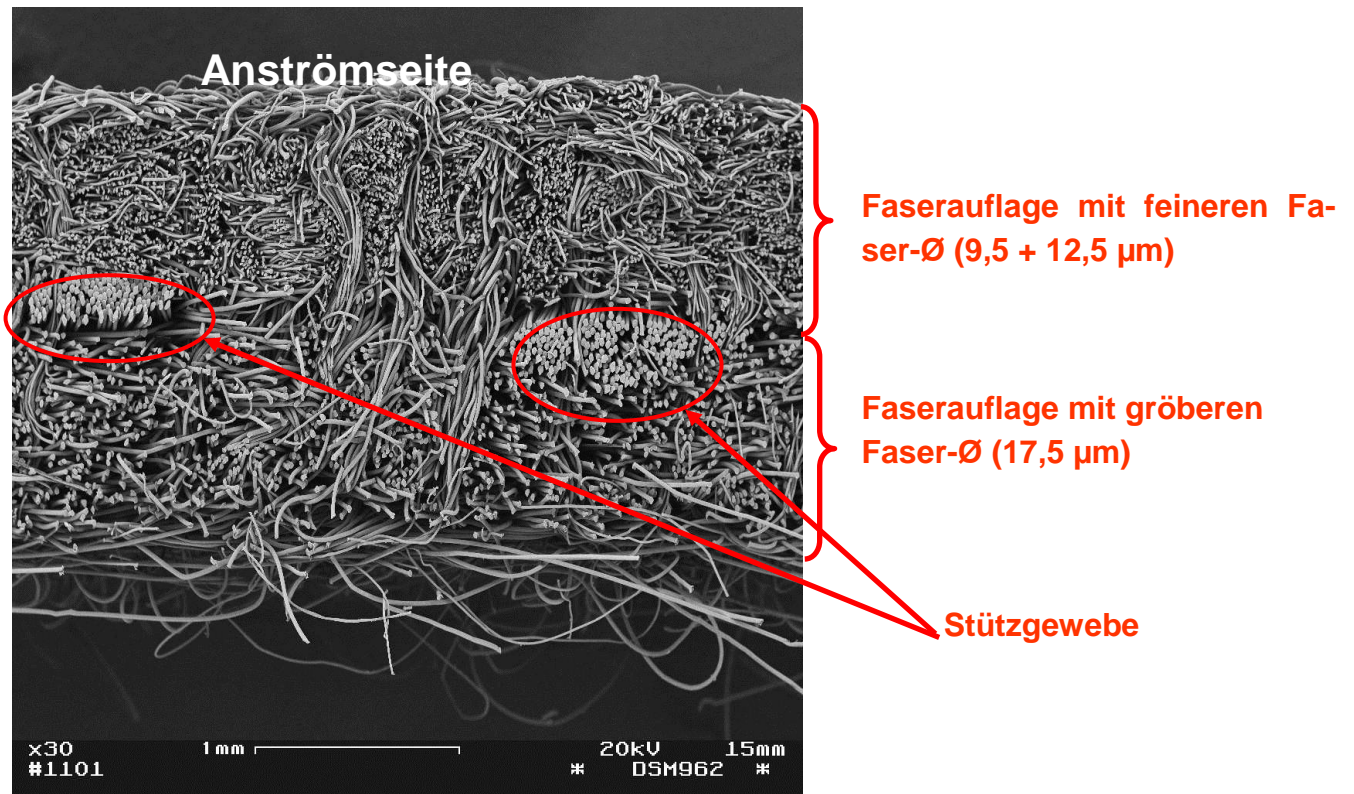


Abbildung 23: Querschnittsaufnahme des Standard-Polyesternadelfilz

Polyesternadelfilz mit PTFE-Membrane (Bezeichnung JF0114)

In Abbildung 24 ist eine Aufsicht auf die PTFE-Membrane dargestellt. Es handelt sich hierbei um eine REM-Aufnahme mit 2.000-facher Vergrößerung (im Gegensatz zu den beiden vorangegangenen REM-Aufnahme, welche nur eine 30-fachen Vergrößerung besitzen). Man kann die sehr engen Porenstrukturen der expandierten / verstreckten PTFE-Membran erkennen.

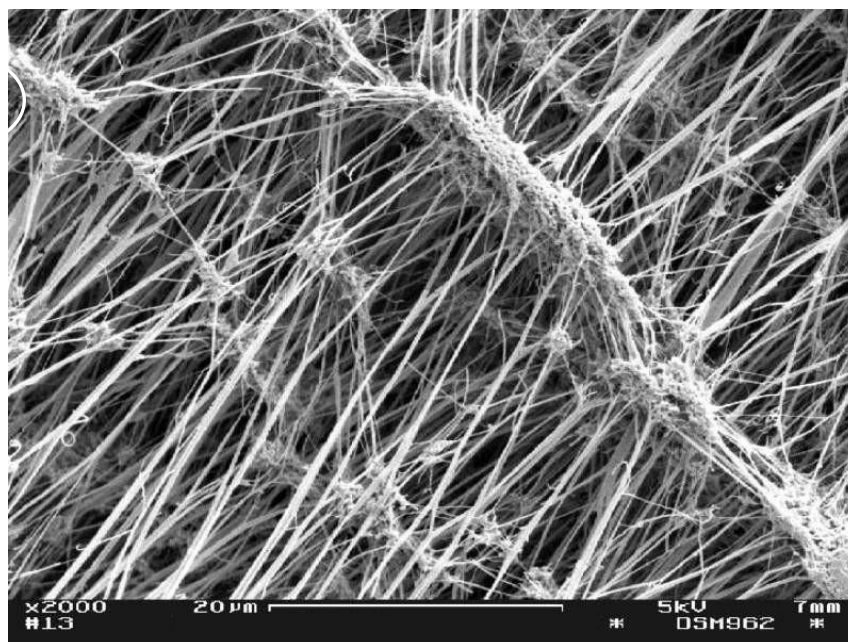
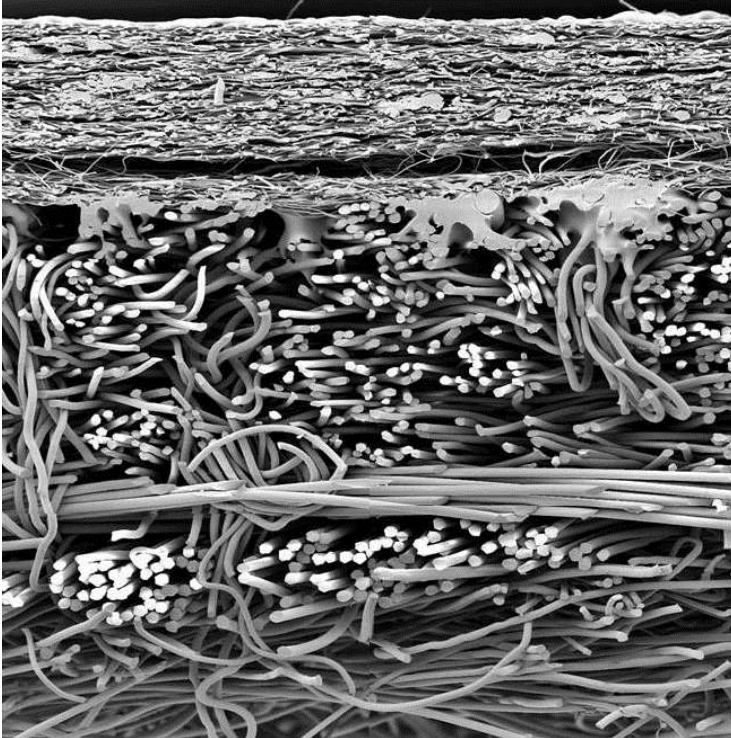


Abbildung 24: Aufsicht auf die PTFE-Membrane

Polyesternadelfilz mit Melt-Blown-Layer (Bezeichnung JF-D0201).

Die Querschnittsaufnahme des Filtermediums mit Melt-Blown-Layer ist in Abbildung 25 abgebildet. Dieses Filtermedium stellt eine Kombination einer feinen, hochwirksamen Melt-Blown-Feinfaserauflage und einem luftdurchlässigen Polyester-Nadelfilz-Trägermaterial dar. Die Fasern des an der Anströmseite angeordneten Melt-Blown-Layers sind mit 1 – 4 µm Faserdurchmesser deutlich feiner als konventionell über den Faserspinnprozess erzeugte Fasern (i.d.R. >Ø 9 µm Faserdurchmesser).



Meltblown-Schicht
Faser-Ø 1 – 4 µm

Faserauflage mit größeren Faser-Ø (17,5 µm)

Abbildung 25: Querschnittsaufnahme des Melt-blown-Filtermediums

Untersuchungen zur Porengrößenverteilung der ausgewählten Filtermedien

Für die Charakterisierung der Filtermedien wurden an den ausgewählten Filtermedien Porengrößenbestimmungen durchgeführt. Als Ergebnis erhält man jeweils nachfolgende Porengrößenverteilungen als differenzierte und kumulierte Darstellung:

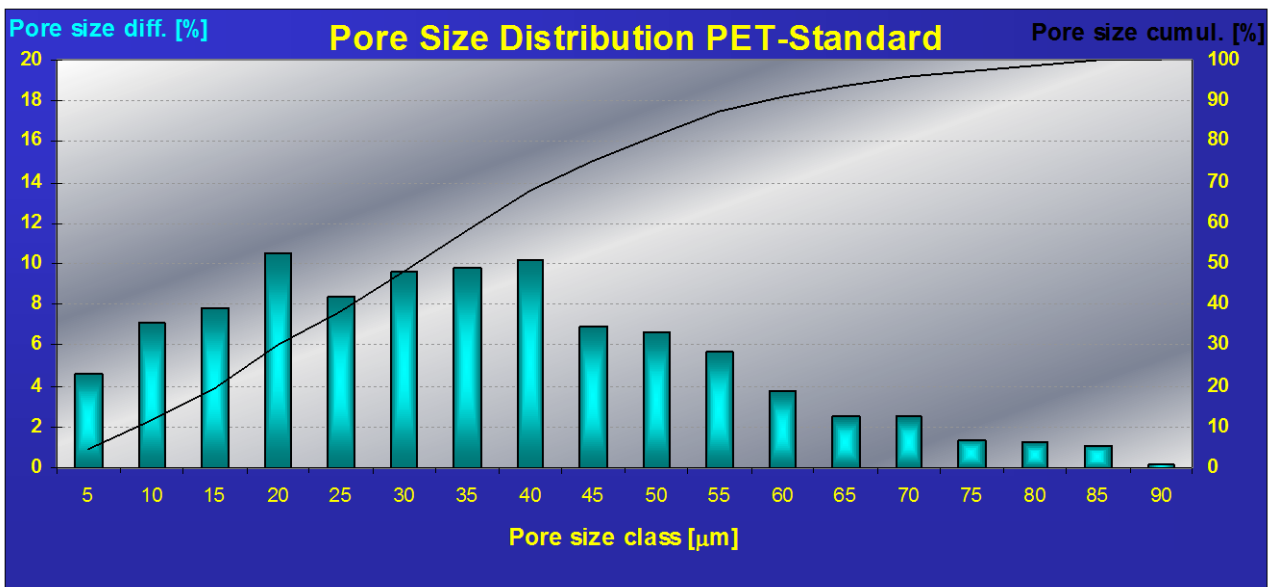


Abbildung 26: Standard-Polyesternadelfilz (Bezeichnung JF0390)

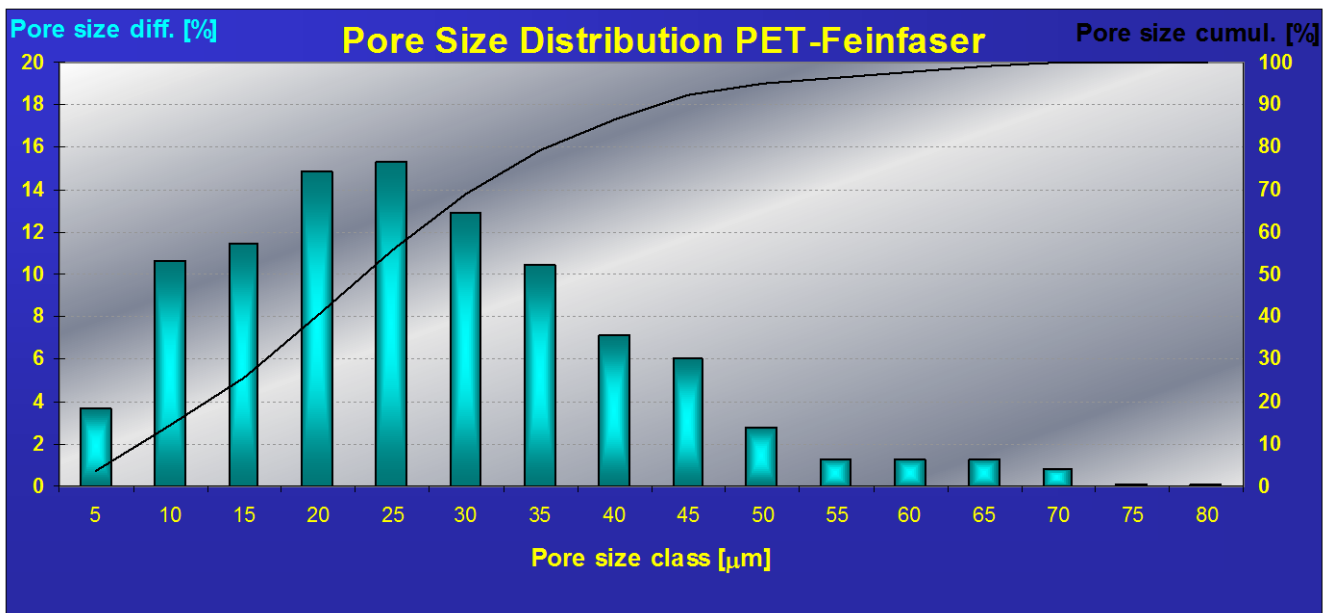


Abbildung 27: Polyesternadelfilz mit Feinfasern (Bezeichnung JF0146)

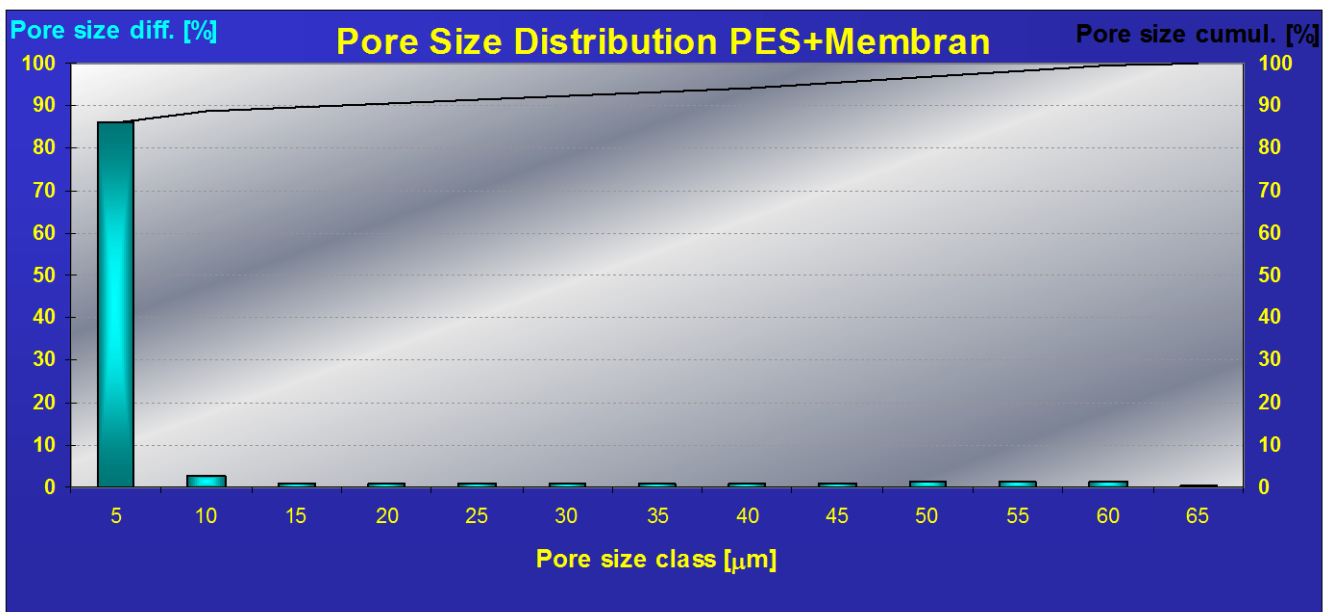


Abbildung 28: Polyesternadelfilz mit PTFE-Membrane (Bezeichnung JF0114)

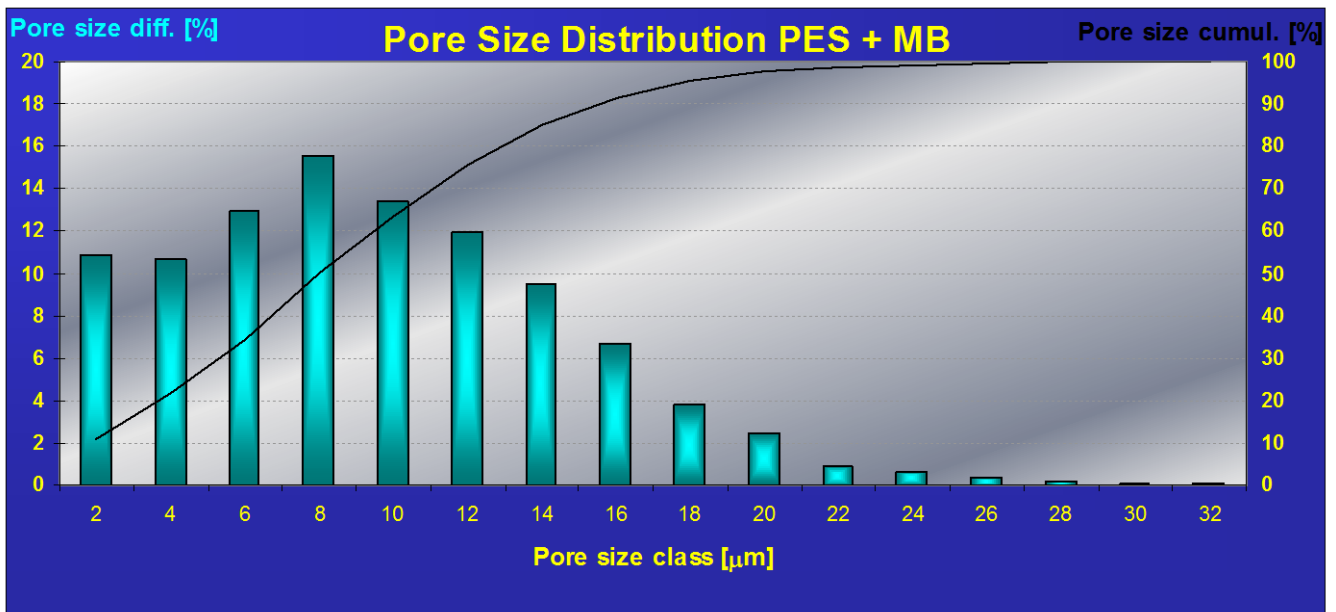


Abbildung 29: Polyesternadelfilz mit Melt-Blown-Layer (Bezeichnung JF-D0201)

Nachfolgend die charakteristischen Porengrößenkennwerte im Überblick:

Filtermedium	d(10)	d(50)	d(90)	größte Pore (Bubble Point)
Standardnadelfilz JF0390	8	30	57	85
Feinfasernadelfilz JF0146	7	22	42	73
PTFE-Membran-Nadelfilz JF0114	0,8	2	14	61
Melt-Blown-Filtermedium JF-D0201	2	8	15	29

Tabelle 2: charakteristischen Porengrößenkennwerte der untersuchten Filtermedien

6.2. Labormessungen am VDI Prüfstand

Integration der Messtechnik

Die ersten Tätigkeiten haben sich auf die Auswahl, die Beschaffung und der Integration der Messtechnik zur Bestimmung des PM_{2,5} Feinstaubes in den vorhandenen Filterprüfstand konzentriert. Die Messung von PM_{2,5} Feinstaub erfolgt durch eine gravimetrische Bestimmung. Die Fraktion PM_{2,5} wird im Zyklon (siehe Abbildung 30) abgetrennt.



Abbildung 30: Messgerät zur gravimetrischen Bestimmung von PM_{2,5}: Zyklon PM_{2,5}

Der Zyklon PM_{2,5} wurde in den vorhandenen VDI-Filterprüfstand wie in der Abbildung 31 ersichtlich ist, integriert.

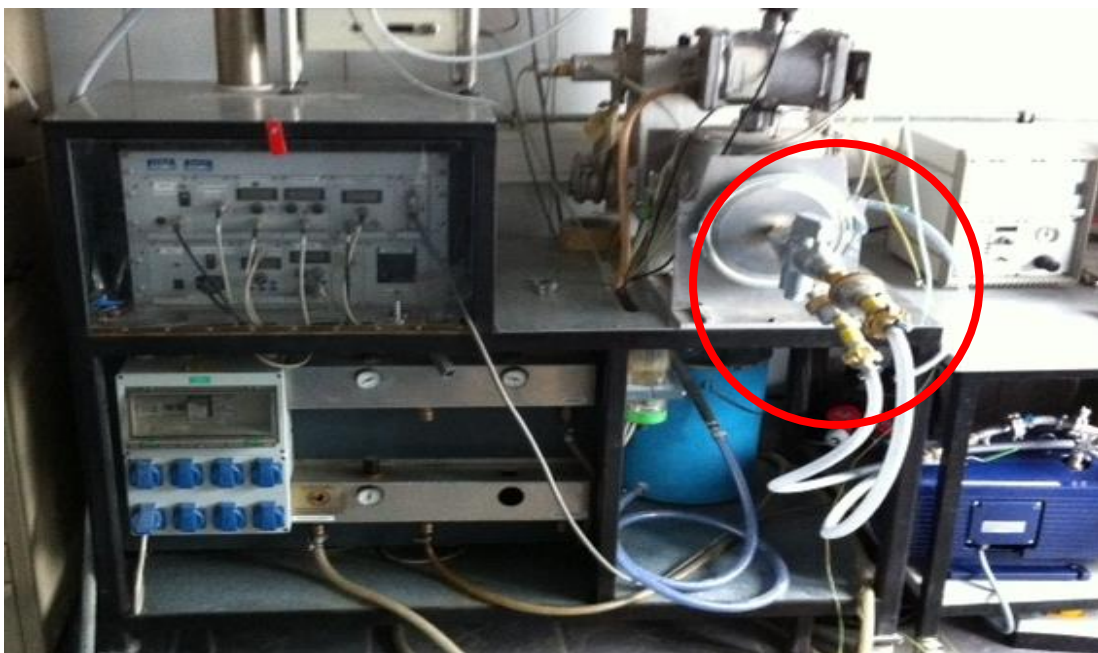


Abbildung 31: VDI-Prüfstand mit integrierter PM_{2,5} Messtechnik

Filtertestreihen

Die *Versuchsbedingungen* für den VDI-Test mit Alterungszyklen wurden in Abstimmung mit dem Projektpartner KIT wie folgt festgelegt:

1. Filteranströmgeschwindigkeit 3,33cm/s
2. Staubart: Pural SB; Rohgasstaubkonzentration: 10 g/m³
3. Abreinigungsdruck / maximaler Differenzdruck = Anfangsdruckverlust des Mediums + 1500 Pa (z.B. 1534 Pa bei aktuellem Standard - PET - Nadelfilz)
4. Speichertankdruck 5 bar; Ventilöffnungszeit (elektronisch) 60 ms (mechanische Ventilöffnungszeit ca. 200 ms)
5. 50 Filtrationszyklen
6. Nach den 50 (Mess-)Zyklen eine Reihe von Alterungszyklen:
 - a. Es werden in der Regel 2500 Alterungszyklen gefahren (5000 Alterungszyklen auch möglich);
 - b. Bei Alterungszyklen wird das Medium (bei Staubaufgabe) zeitgesteuert alle 30 s abgereinigt
7. Nach der Alterung schließt sich erneut eine Reihe mit 50 Filtrationszyklen an (anschließend entsprechend wiederum eine Alterung)
8. Dieses Procedere wird wiederholt bis das Medium ein Alter von ca. 15000 Zyklen aufweist (tatsächlich: 350 Messzyklen + 15000 Alterungszyklen)

Bei diesen festgelegten Versuchsbedingungen zeigte sich nach ein paar Wochen durchgeführter Filterprüfung, dass die Versuchsbedingungen aufgrund der großen Länge eines Einzelfiltrationszyklus für die Prüfanlage von Junker Filter ungünstig gewählt sind und die sich dadurch ergebene Versuchsdauer den Zeitrahmen sprengen würde.

Filtertestreihen ohne Alterungszyklen

Die *Versuchsbedingungen* wurden daraufhin für Junker Filter neu angepasst. Der Abreinigungsdruckverlust wurde reduziert um deutlich mehr Filtrationszyklen pro Zeit zu erhalten und dennoch auf eine annehmbare Anzahl von 500 Filtrationszyklen pro Filtermedium zu kommen. Bei dieser Versuchsreihe wurden *auf die Alterungszyklen gezielt verzichtet*:

1. Filteranströmgeschwindigkeit 3,33cm/s
2. Staubart: Pural SB; Rohgasstaubkonzentration: 10 g/m³
3. Abreinigungsdruckverlust = Anfangsdruckverlust des Mediums + 500 Pa
4. Speichertankdruck 1 bar; Ventilöffnungszeit: elektronisch 60 ms / mechanisch ca. 200 ms
5. 500 Filtrationszyklen

Zu jeder Filtertestreihe wurden die folgenden Parameter gemessen und anschließend ausgewertet:

- dynamischer Restdruckverlust (Druckverlust, welcher sich 3 Sekunden nach der Abreinigung einstellt)
- Gesamt-Emission
- PM_{2,5}-Emission

Die Emission des Feinstaubes, die Gesamtemission und der Anteil des PM_{2,5}-Feinstaubes an der Gesamtemission sind in

Tabelle 3 für die einzelnen Filtermedien bei dieser Messreihe ohne Alterung dargestellt:

Filtermedium	Standard-Polyesternadelfilz	Polyesternadelfilz mit PTFE-Membrane	Polyesternadelfilz mit Melt-Blown
Bezeichnung	JF0390	JF0114	JF-D0201
PM2,5-Emission [mg/m ³]	0,0522	0,0015	0,0011
Gesamt-Emission [mg/m ³]	0,1838	0,0050	0,0041
Anteil von PM2,5 an der Gesamtemission [%]	28,4	30,8	26,5

Tabelle 3: Emission von PM2,5 für die untersuchten Filtermedien ohne Alterung

Die Reduktion der Emission von Feinstaub im Bezug auf das Standard-Medium kann mittels der folgenden Gleichung errechnet werden:

$$\eta = \left(1 - \frac{E_1}{E_2} \right) \cdot 100\% \quad \text{Gl. 2}$$

wobei:

η -Reduktion

E_1 – Emission d. Mediums 1

E_2 – Emission d. Mediums 2

In der Tabelle 4 wird die Reduktion der Feinstaubemission in Bezug auf den Standard- Nadelfilz dargestellt.

Medium	Polyester-Standardnadelfilz	Polyesternadelfilz mit PTFE-Membrane	Polyesternadelfilz mit Melt-Blown-Layer
Bezeichnung	JF0390	JF0114	JFD 0201
□ [%]	0,00	97,13	97,89

Tabelle 4: Reduktion der Feinstaubemission in Bezug auf den Standard-Nadelfilz

Das neue Filtermedium Polyesternadelfilz mit Melt-Blown-Layer erbrachte in dieser Testreihe ohne Alterung eine Reduktion vom PM_{2,5}-Feinstaub im Vergleich zum Standard-Filtermedium Polyesternadelfilz (JF0390) in Höhe von 97,89 %. Das Membran-Filtermedium lag mit 97,13 % auf vergleichbaren Niveau.

Die Ergebnisse in Bezug auf den Verlauf des dynamischen Restdruckverlustes, also den Druckverlust, welcher sich in unserem Fall 3 Sekunden nach jeder Abreinigung eingestellt hatte, sind in Abbildung 32 dargestellt.

Bei diesen Druckverlustverläufen mit jeweils nur 500 Filtrationszyklen, im Vergleich zur Lebensdauer eines Filtermediums unter realen Bedingungen in einer Filteranlage mit oftmals weit mehr als 50.000 Filtrationszyklen, zeigte sich folgendes Bild:

Das Standard-Filtermedium mit dem geringsten Anfangsfilterwiderstand besitzt auch noch am Ende der 500 Filtrationszyklen den niedrigsten Filterwiderstand im Vergleich zu den hochabscheideaktiven Filtermedien.

Aufgrund von früheren Langzeitmessungen mit einer beschleunigten Filtermedienalterung und mit anderen Filtermedien und Versuchsbedingungen wussten wir jedoch, dass sich die Entwicklung der Filtermedienwiderstände im Verlauf eines Filtermedienlebens unterschiedlich stark ändern können. Diese früheren Messergebnisse aus Abbildung 33 machten uns zuversichtlich, dass unter Berücksichtigung einer künstlich beschleunigten Filtermedienalterung wir die Medien von einem Anfangsstadium im Neuzustand in ein Stadium mit einer fortgeschrittenen Alterung überführen können und so die Filterwiderstände während der Haupteinsatzdauer eines Filtermediums in einer realen Filteranlage messen könnten.

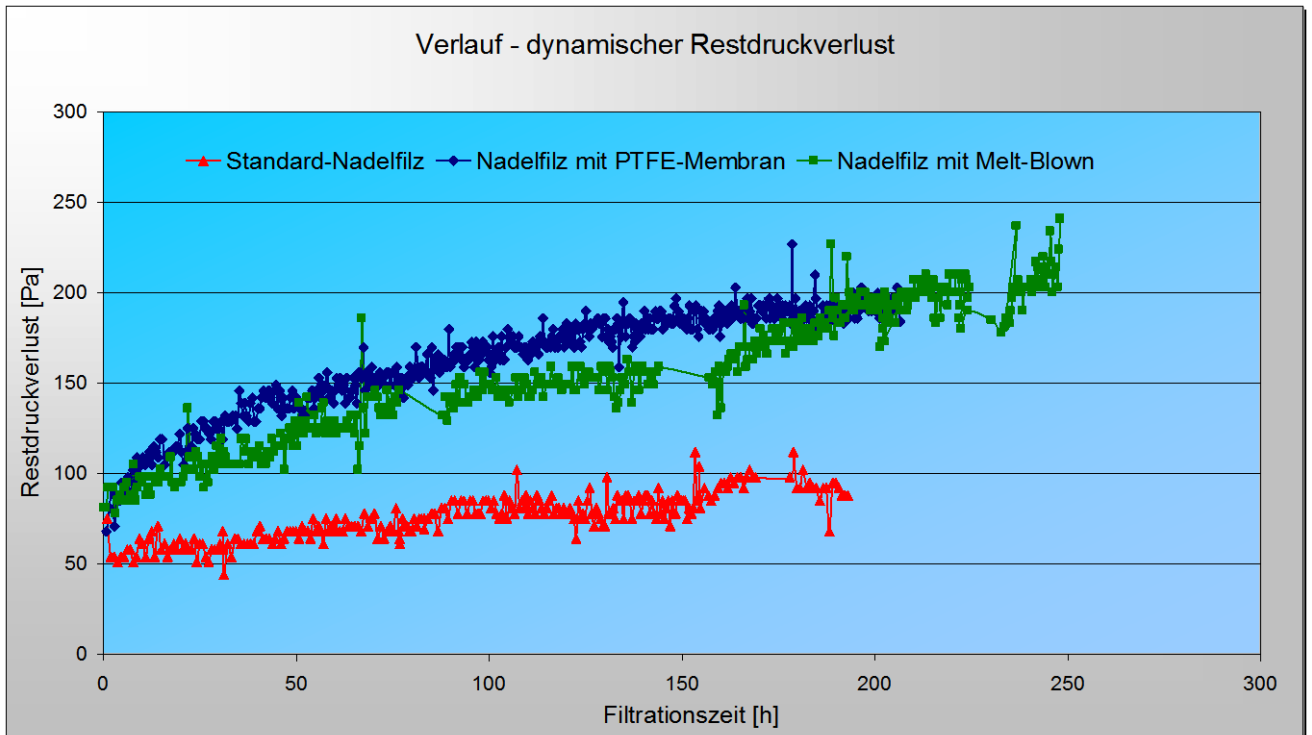


Abbildung 32: Verlauf des dynamischen Restdruckverlustes (Messreihen ohne Alterungszyklen)

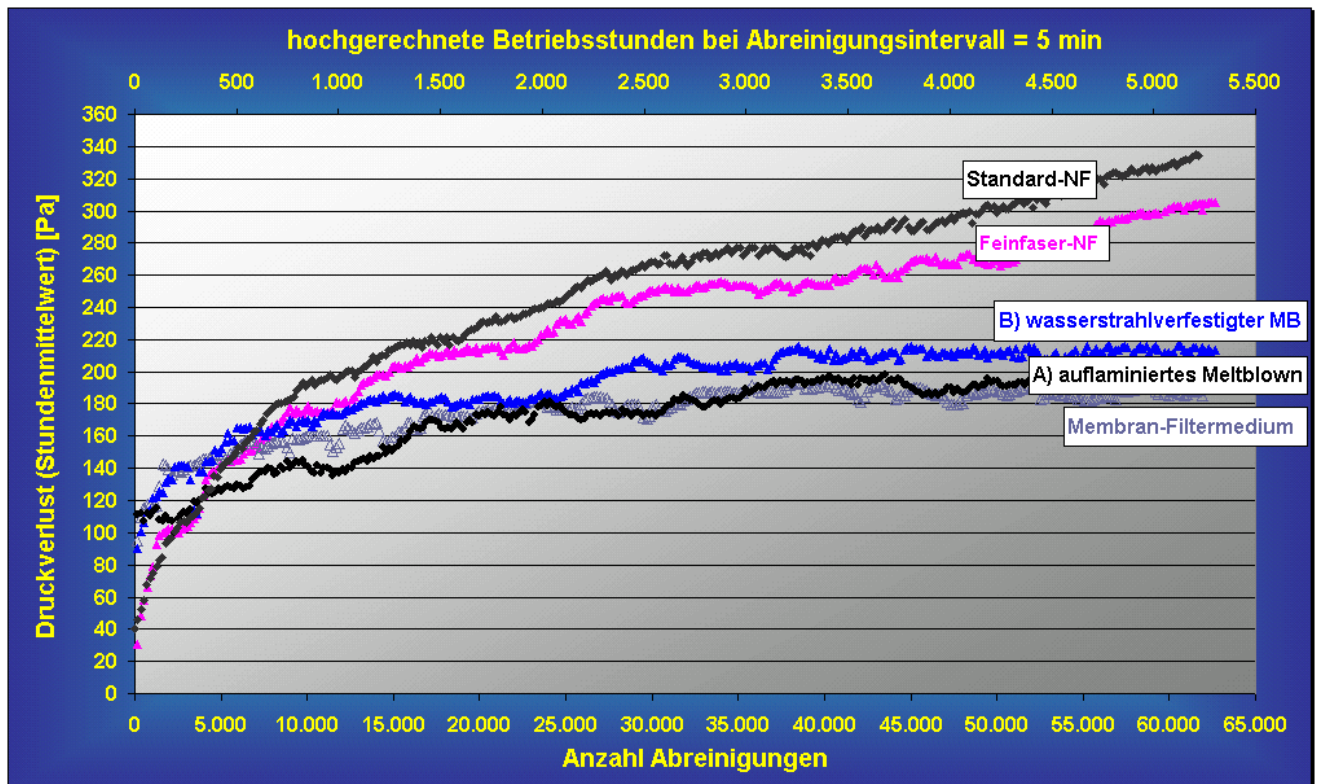


Abbildung 33: Verlauf des dynamischen Restdruckverlustes aus früheren Messreihen

Filtertestreihen mit beschleunigter Filtermedialterung

Die *neuen Versuchsbedingungen* wurden für eine gezielt beschleunigte Filtermedialterung wie folgt angepasst. Hierzu wurde von einer druckverlustgesteuerten auf eine zeitgesteuerte

Abreinigung mit einem recht kurzen Abreinigungsintervall umgestellt. Die Versuchsdauer je Filtermedium wurde auf mindestens 130 Versuchsstunden festgelegt.

1. Filteranströmgeschwindigkeit 3,33cm/s
2. Staubart: Pural SB; Staubkonzentration: 10 g/m³
3. zeitgesteuerte Abreinigung mit Abreinigungsintervall von 20 Sekunden
4. Speichertankdruck 1 bar; Ventilöffnungszeit: elektronisch 60 ms / mechanisch ca. 200 ms
5. > 130 Versuchsstunden

Durch die zeitgesteuerte Abreinigung mit einem Abreinigungsintervall von 20 Sekunden können pro Stunde 180 Filtermedienabreinigungen erzielt werden. In realen Filteranlagen sind je nach Filtrationsbedingungen im Schnitt ca. 6 Abreinigungen pro Stunde üblich. Somit erzielen wir eine beschleunigte Filtermedienalterung in Bezug auf die Filtrationsperformance mit einem Zeitfaktor von 30 gegenüber realen Filteranlagen. Da die Filtermedienalterung in Bezug auf Filtrationsperformance durch die Stressbelastung bei der Abreinigung erfolgt, sehen wir in den sehr kurzen Filtrationszyklen die Möglichkeit der zeitgerafften Filtermedienalterung. Es ist bekannt, dass der Emissionspeaks immer nach einer Filtermedienabreinigung stattfindet und dann im Laufe der Filterkuchenbildung gegen Null tendiert. Somit ist die Abreinigung als das Ereignis für die Filtermedienbeanspruchung zu sehen.

Folgende Ergebnisse konnten bei diesen Filtrationsversuchen mit beschleunigter Alterung gewonnen werden:

Die Emission des Feinstaubes, die Gesamtemission und der Anteil des PM_{2,5}-Feinstaubes an der Gesamtemission sind in Tabelle 5 für die einzelnen Filtermedien bei dieser Messreihe mit beschleunigter Alterung dargestellt:

Filtermedium	Standard-Nadelfilz	Feinfaser-Nadelfilz	Nadelfilz mit PTFE-Membran	Nadelfilz mit Melt-Blown
Bezeichnung	JF0390	JF0146	JF0114	JF-D0201
Gesamtemission [mg/m ³]	0,183	0,134	0,054	0,012
PM _{2,5} -Emission [mg/m ³]	0,104	0,101	0,045	0,010
Anteil PM _{2.5} an Gesamtemission	57%	75%	83%	83%

Tabelle 5: Emission von PM_{2,5} für die untersuchten Filtermedien mit beschleunigter Alterung

Aus Tabelle 5 wird ersichtlich, dass die veränderten Versuchsbedingungen dazu führten, dass sich der Anteil der PM_{2,5}-Emission an der Gesamtemission bei allen getesteten Filtermedien gegenüber der Testreihe ohne Alterung deutlich erhöht hat.

In

Tabelle 6 ist die Reduktion der Feinstaubemission der verschiedenen getesteten Filtermedien in Bezug auf den Standard-Nadelfilz bei der Versuchsreihe mit beschleunigter Filtermedienalterung dargestellt.

Filtermedium	Standard-Nadelfilz	Feinfaser-Nadelfilz	Nadelfilz mit PTFE-Membran	Nadelfilz mit Melt-Blown
Bezeichnung	JF0390	JF0146	JF0114	JF-D0201
η [%]	0,00	2,88	56,73	90,38

Tabelle 6: Reduktion der Feinstaubemission in Bezug auf den Standard-Nadelfilz

Die jeweiligen Reduktionen der PM_{2,5}-Feinstaubemissionen bezogen auf den Standard-Nadelfilz haben sich gegenüber den Testreihen ohne Alterung verändert.

Die Reduktion des Filtermediums mit PTFE-Membran hat sich von ca. 97 % auf knapp 57 % verringert. Beim Melt-Blown-Filtermedium ist nur eine geringfügige Veränderung bei der Reduktion der PM_{2,5}-Feinstaubemission zu verzeichnen gewesen (von 97 % zu 90 %).

Der erstmals getestete Feinfaser-Nadelfilz erreichte nur eine minimale Reduktion des Feinstaubes von knapp 3 % gegenüber den Standard-Nadelfilz bei dieser Testreihe.

Die Ergebnisse in Bezug auf den Verlauf des Druckverlustes der 4 getesteten Filtermedien bei der beschleunigten Filtermedienalterung ist in Abbildung 34 abgebildet.

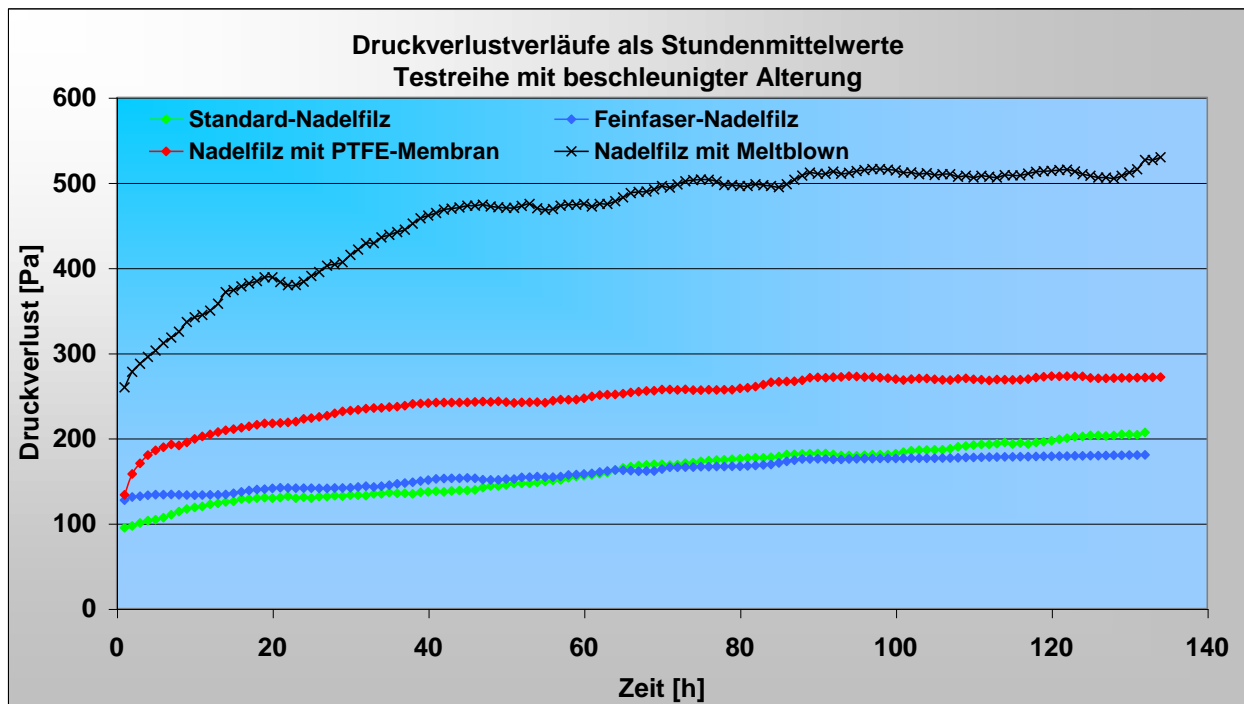


Abbildung 34: Druckverlustverlauf (Stundenmittelwerte) bei Testreihe mit beschleunigter Alterung

Der sehr steil ansteigende Verlauf im Druckverlust vom Nadelfilz mit Meltblown-Layer gegenüber den anderen Filtermedien ist sehr ungewöhnlich. Daraufhin wurde das Filtermedium nach dieser Testreihe untersucht und es konnten partielle Ablösungen von Teilschichten des Meltblown-Layers erkannt werden. Bei Betrachtung des Filtermedienquerschnittes des in dieser Testreihe gealterten Filtermediums mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) zeigen sich Ablösungen von Meltblownschichten innerhalb des Meltblownverbundes. Die Haftung vom Meltblown zum Träger blieb erhalten (siehe Abbildung 35).

Durch die partiellen Ablösungen von Meltblown-Schichten innerhalb des Meltblown kommt es zu Staubeinlagerungen ins Innere des Meltblowns. Diese Staubeinlagerungen führen zu einem erhöhten Filtermedienwiderstand in dieser Testreihe, wodurch sich der sehr steil ansteigende Verlauf des Druckverlustes erklärt. Es ist nicht auszuschließen, dass sich bei diesen Filtertestreihen mit beschleunigter Filtermedienalterung die Versuchsbedingungen bzgl. der Abreinigung zu sehr zerstörend auf diesen Meltblown-Filtermedienverbund auswirkten.

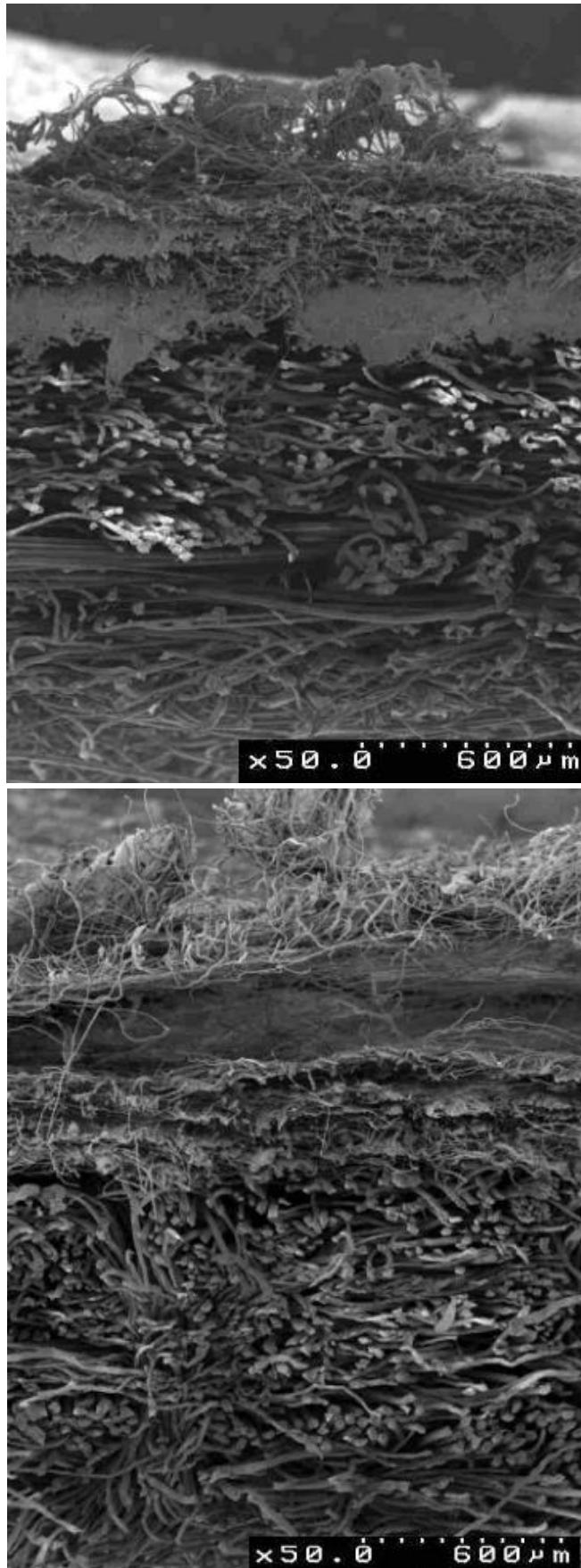


Abbildung 35: abgelöste Meltblownschicht des gealterten Filtermediums

Zusammenfassung der Laborergebnisse an VDI-Filteranlage

Die Messungen an der VDI-Filteranlage erlaubten es die Filtrationseigenschaften der untersuchten Filtermedien zu charakterisieren. Hierzu musste zunächst die Messtechnik auf die Messmöglichkeit von PM_{2,5}-Feinstaub mittels PM_{2,5}-Zyklon erweitert werden.

Die schwach emittierenden Filtermedien Nadelfilz mit Meltblownauflage bzw. Membranauflage zeigten je nach Testreihe im Mittel eine 10 bis 50-fach geringere PM_{2,5}-Feinstaubemission als die stark emittierenden Filtermedien Standard-Nadelfilz und Feinfaser-Nadelfilz.

Bzgl. des jeweiligen Druckverlustverhaltens der untersuchten Filtermedien besaßen die schwach emittierenden Filtermedien Nadelfilz mit Meltblownauflage bzw. Membranauflage die steilsten Filtermedienanstiege. Bei der ersten Versuchsreihe ohne Filtermedienalterung liegen diese beiden Filtermedien im Druckverlustanstieg noch dicht beieinander. Bei der Testreihe mit beschleunigter Alterung besaß das Meltblown-Filter eine starke Abweichung mit einem sehr steilen Druckverlustanstieg gegenüber den anderen Medien. Diese Abweichung ist durch die partielle Meltblown-Beschädigung bei dieser Art der beschleunigten Alterung zu erklären. Bei den Versuchsreihen an Industriefilteranlagen mit realen Filterschläuchen an der Nederman-Filteranlage (Durchführung durch KIT) lagen die schwach emittierenden Filtermedien Nadelfilz mit Meltblownauflage bzw. Membranauflage bzgl. Filtermedienwiderstand auch über dem Feinfaser-Nadelfilz, jedoch noch unterhalb vom Standard-Nadelfilz. Das Meltblown-Filtermedium fiel somit nicht bei den Messungen an der Nederman-Filteranlage bzgl. des Druckverlustniveaus aus dem Bereich der anderen Filtermedien heraus wie es bei den Filterprüfstandsversuchen mit beschleunigter Alterung der Fall war.

Es kann in Aussicht gestellt werden, dass bei den schwach emittierenden Filtermedien Nadelfilz mit Meltblownauflage bzw. Membranauflage mit den Maßnahmen einer optimierten Filterbetriebsweise, welche das KIT erarbeitet hat, ein zum Teil höherer Filtermedienwiderstand kompensiert werden kann, sodass eine deutliche Minderung von Feinstaubemission mit keinem Energiemehraufwand verbunden sein muss.

6.3. Messungen an industriellen Schlauchfilteranlagen

Nach Gesprächen mit diversen Filterbetreibern bzw. Filteranlagenherstellern wurden seitens Junker Filter 2 Industriepartner gefunden, die trotz der enormen Risiken, welche bei ersten industriellen Tests immer vorhanden sind, bereit waren, neue Filtermedien in ihren Industriefilteranlagen zu testen. Folgende 2 Firmen boten hierzu ihre Zusammenarbeit an:

- Fa. Clariant;
- Fa. AZO.

6.3.1. Schlauchfilteranlage bei der Firma Clariant

Test 1:

Bei der Fa. Clariant wurde in der Filteranlage zur Farbpigmentherstellung ein kompletter Satz neuer Filterschläuche aus dem Filtermedium Nadelfilz mit Meltblown eingebaut. Die serienmäßige Filterschlauchbestückung mit dem Feinfasernadelfilz wurde hierzu ausgebaut.

Bereits nach wenigen Monaten Einsatzdauer der Meltblown-Filterschläuche wurden relativ schnell erhöhte Reingasstaubkonzentrationen seitens des Betreibers wahrgenommen. Die Testfilterschläuche mussten wieder ausgebaut werden und wurden anschließend von uns im Labor untersucht.

Auf den Photos in Abbildung 36 ist zu erkennen, dass sich stellenweise Teile (Lappen) des Melt-blown-Layer vom Grundmedium abgelöst haben. Dies ist sehr eindeutig am Beispiel der Filterschlauchböden und unmittelbar oberhalb des Schlauchbodens zu sehen. Hier fand während des Filterbetriebes eine schollenartige Ablösung von Teilschichten (Lappen) des Melt-blowns statt.

Als positives Ergebnis bei diesem Industrietest zeigte es sich, dass an Stellen, an denen der Meltblown-Layer noch intakt war, der Staub an der Filtermedienoberfläche abgeschieden werden konnte. Die feinen Farbpigmentpartikel sind nicht durch den Meltblown-Layer durchgedrungen (weißer Meltblownquerschnitt und damit keine Verfärbung durch das Farbpigment).

Diese Messreihe zeigte, dass es einen Verbesserungsbedarf hinsichtlich der Haftung zwischen Melt-Blown und Trägermedium gibt.

Aufgrund der Probleme mit der Meltblown-Haftung wurden weitere Optimierungsschritte beim Filtermedienhersteller diskutiert und eingeleitet, um die Haftungseigenschaften zu verbessern.



Abbildung 36: Beschädigungen der Testschläuche

Test 2:

Beim Filtermedium Nadelfilz mit Meltblown wurde beim Filtermedienhersteller die Haftung verbessert. Aus dem optimierten Filtermedium wurden erneut Filterschläuche gefertigt und vom Kunden eingebaut. Als Filtermaterial für den Filterschlauchboden wurde anstelle des Meltblown-Materials ein Feinfasernadelfilz verwendet. Nach ca. 2 bis 3 Monaten kam es auch hier, ähnlich wie im ersten Versuch, erneut zu Staubemissionen, welche auf der Reingasseite ersichtlich waren.

Nach dem Ausbau der Filterschläuche sind auf der Oberfläche des Filterschlauches in Längsrichtung Beschädigungen zu sehen, siehe Abbildung 37.

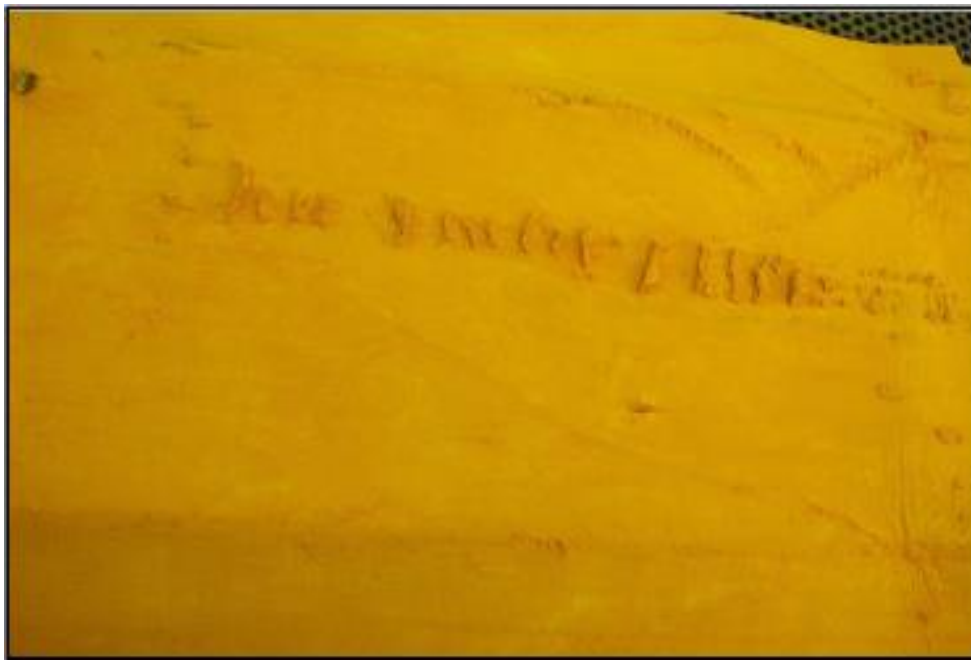


Abbildung 37: Beschädigungen an Meltblown-Oberfläche

Die Art der Beschädigungen ist typisch für Beschädigungen beim Filterschlaucheinbau. Die Melt-Blown-Schicht ist ähnlich der PTFE-Membrane mechanisch sehr empfindlich. Bei der Montage können die Schläuche durch die Reibung mit der Lochplatte beim Einschleiben beschädigt werden.

Stellen mit abgelösten Melt-blown-Lappen, wie sie noch im vorangegangenen Versuch vorzufinden waren, sind nicht mehr vorzufinden gewesen.

Mikroskopaufnahmen (siehe Abbildung 38) zeigen, dass es zu keiner Staubeinlagerung im Medium auf unbeschädigten Stellen gekommen ist. Im Bereich des durch den Einbau beschädigten Meltblowns kam es jedoch zu Staubeinlagerungen und Staubburchritten.



Abbildung 38: Mikroskopaufnahme vom Querschnitt des Meltblown-Filtermediums, links: unbeschädigte Stelle, rechts: durch Einbau beschädigte Stelle

Die anschließenden labortechnischen Untersuchungen (siehe Tabelle 7) an einem der ausgebauten Meltblown-Filterschläuche zeigten geringe Filterkuchenanhaftungen von weniger als 20 g/m². Eine Regenerierung der Luftdurchlässigkeit durch die pulse-jet-Abreinigung der Filterprobe ergab eine Erhöhung von durchschnittlich 20 l/dm²min @ 200 Pa auf 54 l/dm²min (Neuwertzustand ca. 50 l/dm²min), welches für ein sehr gutes Regenerierungsverhalten des Meltblown-Filtermediums spricht.

Flächengewicht [g/m ²]	Oben	Mitte	Unten
* ISO 9073-1			
Probengröße: 100 cm ²			
wie erhalten	518	-	503
pulse jet abgereinigt (3 bar, 60 ms)	515	-	501
ausgewaschen	503	-	489
Luftdurchlässigkeit [mm/s] bei $\Delta p = 200$ Pa	Oben	Mitte	Unten
* EN ISO 9237			
wie erhalten	25	-	40
pulse jet abgereinigt (3 bar, 60 ms)	85	-	93
ausgewaschen	107	-	120
Luftdurchlässigkeit [l/(dm ² min)] bei $\Delta p = 200$ Pa	Oben	Mitte	Unten
* DIN 53887			
wie erhalten	15	-	24
pulse jet abgereinigt (3 bar, 60 ms)	51	-	56
ausgewaschen	64	-	72

Tabelle 7: Messwerte der Filterschlauchuntersuchung am optimierten Meltblown-Filter

6.3.2. Schlauchfilteranlage bei der Firma AZO

Bei der Firma AZO wurden die 3 Filtermedien (Standard-Filtermedium, Membran-Filtermedium und Meltblown-Filtermedium) in einen Rundfilter zur pneumatischen Saugförderung nacheinander eingebaut. Folgende Betriebsbedingungen lagen bei diesen Tests vor:

- Staubart: Kreide ($d_{50} = 1,4 \mu\text{m}$)
- Filterfläche: je $7,5 \text{ m}^2$
- Filterflächenbelastung: $1,9 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{min}$
- Rohgasbeladung: ca. $2.800 \text{ g}/\text{m}^3$
- zeitgesteuerte Abreinigung 20 bzw. 40 Sekunden
-

Bei diesen Versuchsreihen wurden die standardmäßigen Abreinigungsbedingungen der Firma AZO, zeitgesteuertes Abreinigungsintervall 20 und 40 Sekunden, eingestellt. Aufgrund der zeitgesteuerten Filterabreinigung gibt es zur Charakterisierung des Druckverlustverhaltens andere Messwerte als bei einer druckverlustgesteuerten Abreinigung, sodass bei diesen Messreihen Messwerte wie der minimale und maximale Filterdifferenzdruck vor der Abreinigung gemessen wurden. Zur Beurteilung des Emissionsverhaltens wurden zusätzlich die mittleren Reststaubkonzentrationen im Reingas gemessen. Nachfolgend sind die Ergebnisse dieser Versuchsreihen in Tabelle 8 zusammengefasst:

		Standard	Membran	Meltblownn
Reinigungsintervall 20 s	minimaler Filterdifferenzdruck	4 mbar	5 mbar	6 mbar
	maximaler Filterdifferenzdruck vor der Abreinigung	10 mbar	10 mbar	13 mbar
	Anstieg des Filterdifferenzdruckes	0,15 mbar/s	0,10 mbar/s	0,17 mbar/s
	Mittlere Reststaubkonzentration in der Reingluftleitung	-	0,028 mg/m^3	0,012 mg/m^3
Reinigungsintervall 40 s	minimaler Filterdifferenzdruck	8 mbar	8 mbar	7 mbar
	maximaler Filterdifferenzdruck vor der Abreinigung	40 mbar	30 mbar	28 mbar
	Anstieg des Filterdifferenzdruckes	0,53 mbar/s	0,38 mbar/s	0,26 mbar/s
	Mittlere Reststaubkonzentration in der Reingluftleitung	-	0,204 mg/m^3	0,059 mg/m^3
Verbleibender Filterkuchen nach Versuchsende ohne Abreinigung*		ca. 850 g	ca. 850 g	ca. 850 g
Verbleibender Filterkuchen nach 5x Abreinigung*		225 – 240 g	30 g	225 – 240 g

* bezieht sich auf kompletten Filtereinsatz mit 18 Schlauchfiltern ($2,5 \text{ m}^2$)

Tabelle 8: Messwerte der Versuchsreihen bei Firma AZO

Die ermittelten Reingasstaubkonzentrationen liegen beim Meltblown-Filtermedium bei beiden Testreihen (Abreinigungsintervall 20 und 40 Sekunden) deutlich unter dem vom Membranfiltermedium.

Bzgl. des Anstieges des Differenzdruckes zeigt sich bei kurzen Abreinigungsintervallen (20 s) eine andere Tendenz als bei den langen Abreinigungsintervallen:

Bei dem kurzen Intervall von nur 20 Sekunden Pausenzeit erhält man als Ergebnis, dass das Meltblown-Filtermedium hinsichtlich der Druckverlustentwicklung recht schlecht ist. Bei gleichen Versuchen jedoch mit doppelt so langen Pausenzeit von 40 Sekunden sieht die Tendenz in der Druckverlustentwicklung genau umgekehrt aus. Wir erklären uns dies wie folgt: Der scheinbare Nachteil des dichteren Meltblown-Filtermediums mit der niedrigsten Luftdurchlässigkeit wird bei längerer Zyklendauer durch die bessere Filtrationsperformance überkompensiert.

Zusammenfassung der Ergebnisse an den industriellen Schlauchfilteranlagen

Zusammenfassend kann man nach diesen Industrietests feststellen, dass das neue Meltblown-Filtermedium nach der Optimierung der Haftung des Meltblown-Trägers eine sehr gute Oberflächenfiltration und sehr niedrige Reingasemissionswerte besitzt. Auf Grund der mechanischen Empfindlichkeit müssen bei der Handhabung die gleichen Regeln herrschen, die beim Einbau von PTFE-Membran-Filter angewendet werden (z.B. die Verwendung von Einbauhilfen bei der Filterschlauchmontage).

7. Messung an einer industriellen Technikumsanlage

(Schlauchfilteranlage bei der Firma Nederman)

Bezüglich den Messungen an der industriellen Schlauchfilteranlage bei Nederman wurden seitens Junker Filter Vorbereitungen durchgeführt, die Messdurchführung selbst erfolgte überwiegend durch das KIT. Die 4 Filtermedien, welche in den vorangegangenen Arbeitspaketen untersucht wurden, wurden zu sogenannten Flachsschläuchen konfektioniert und horizontal in der Anlage eingebaut. Die Flachsschläuche besitzen die Abmessungen 2.030 mm (Länge) x 262 mm (flache Breite). Aufgrund von Verzögerungen beim Start der Messungen wurden die bereits eingebauten Versuchsfilterschläuche vor Messbeginn bereits bestaubt und mussten daher erneut gefertigt und gegen die bereits Bestaubten wieder getauscht werden. Es wurden zusammen mit dem Projektpartner KIT Strategien zur Durchführung der Messungen ausgearbeitet.

Die Nederman-Anlage

Die Nederman-Anlage dient in der Nederman-Niederlassung in Friesenheim als Abgasreinigungsanlage für die Werkstätten, insbesondere für die Schweißgasreinigung. Der Anlagenvolumenstrom kann Luftmengen von bis zu 30.000 m³/h aufbringen. Die Nederman-Anlage ist dabei in zwei Module aufgeteilt (s. Abbildung 39). Zum Einen gibt es da die Spülwagen-Seite, in der 320 Flachsschläuche (s. Abbildung 40) in einer 32x10 Anordnung installiert sind.

Dieser Anlagenteil wurde für die durchgeführte Messkampagne komplett von Anlagenbetrieb abgekoppelt.

Zum anderen gibt es noch die Druckstoßseite, in der 160 Flachschläuche (in 10 x16 Anordnung) zum Einsatz kommen. Jeder Filterschlauch ist 2,50 lang und verfügt über eine Filterfläche von ca. 1,2 m². Daraus resultiert eine Gesamterfilterfläche von ca. 192 m².

Die Abreinigung der Filterschläuche erfolgt über Druckstoßregenerierung, wobei sowohl druckgesteuert als auch zeitgesteuert ausgelöst werden kann. Bei den Filterschläuchen kommt kein Venturieinsatz zur Anwendung, stattdessen wird ein Leitblech verwendet.



Abbildung 39: Außenansicht der Nederman-Anlage

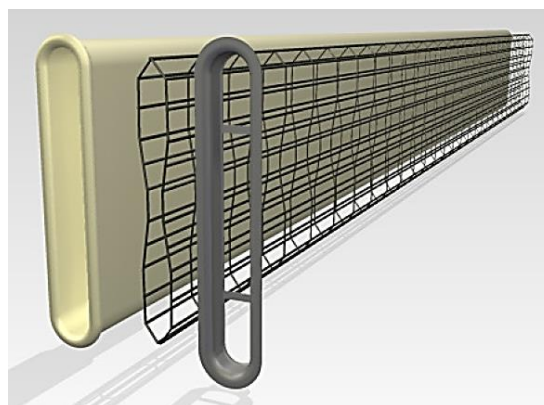


Abbildung 40: 3D-Modell des Flachschlauchs mit Filtermedium (links), Stützkorb (mitte) und Arretierblech (rechts)

Vorbereitung der Nederman-Anlage

Zunächst musste die Spülwagenseite der Nederman-Anlage vom Filtrationsbetrieb abgekoppelt werden. Dies erfolgte einerseits durch die in der Anlage schon vorhandenen Verschlussklappen und zum Anderen durch zusätzlich durch den Einzug eines Verschlussbodens in die Anlage. Dies war deswegen notwendig, da Verschlussklappen nie komplett abschließen.

Weiters musste noch eine Additivstaubdosierung konstruiert und installiert werden, da die Rohgaskonzentration nur aus der Schweißgasabsaugung für umfassende Testreihen zu gering gewesen wäre.

Um die Menge an zugegebenen Additivstaubs zu reduzieren wurde schon bei der Konstruktion eine Kombination einer Frischadditivaufgabe und einer Rezirkulation des Staubes berücksichtigt. In Abbildung 41 ist eine schematische Zeichnung der Additiv- bzw. Rezikulataufgabe zu erkennen.

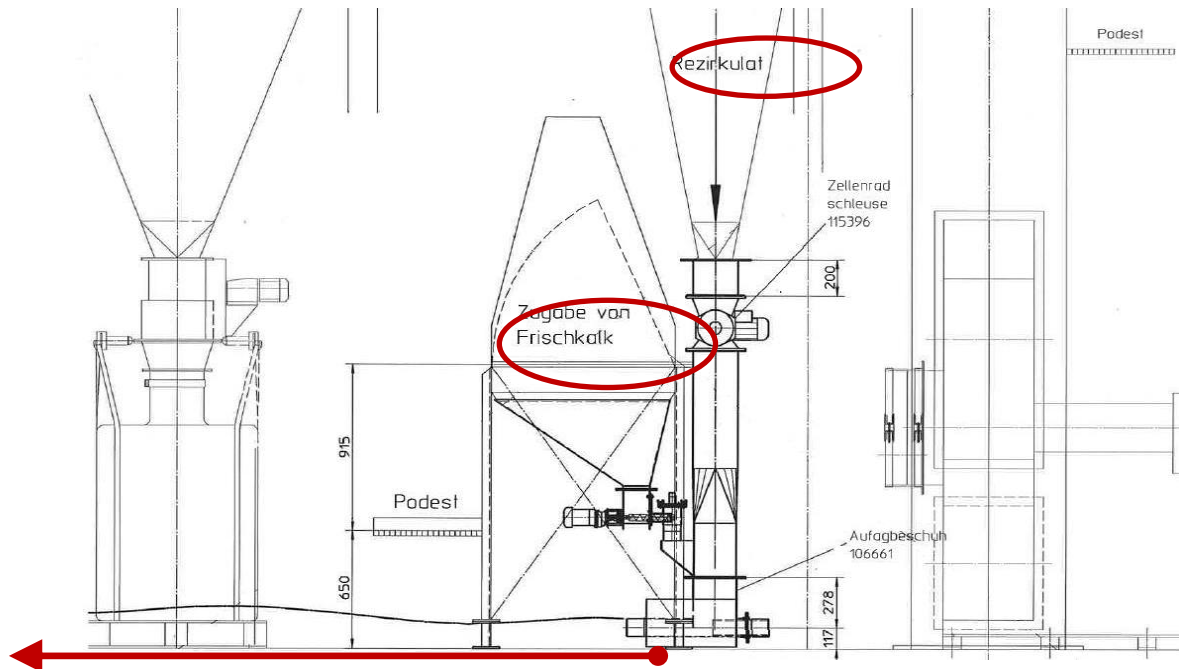


Abbildung 41: Schematische Zeichnung der Additivstaubdosierung und -Förderung

Der aufgegebenen Additivstaub wird nicht speziell dispergiert, sondern macht sich die dispergierten Eigenschaften der Strömungsscherkräfte zu nutze. Der Staub wird durch einen Fallschacht in den Fördervolumenstrom aufgegeben und nach einer Transport über ca. 10 m in einem geriffelten Schlauch (Förderleitung) anschließend ca. 5 m vor der Filterkammer in den Hauptvolumenstrom geleitet.

Messprogramm an der NMA

Im Rahmen der Messkampagne an der NMA wurden 4 Filtermedien bei jeweils 3 Alterungszuständen und 3 Abreinigungsdrücken untersucht.

Die vier untersuchten Filtermedien waren:

- Ein Standard PET-Nadelflies (550g/m²)
- Ein PET-Nadelflies mit Feinfaserauflage (550g/m²)
- Ein PET-Nadelflies mit PTFE-Membranauflage
- Ein PET-Nadelflies mit Meltblownauflage

Als Alterungszustände wurden untersucht:

- Neuer Medienzustand (ca. 30-600 Zyklen)
- Mäßig gealterter Medienzustand (ca. 330-380 Zyklen)
- Gealterter Medienzustand (ca. 1000-1150 Zyklen)

Als Abreinigungsdrücke wurden gewählt:

- 6,5 bar (minimaler Druck für noch stabilen Betrieb)
- 7 bar
- 8bar (maximaler Netzdruck der Anlage)

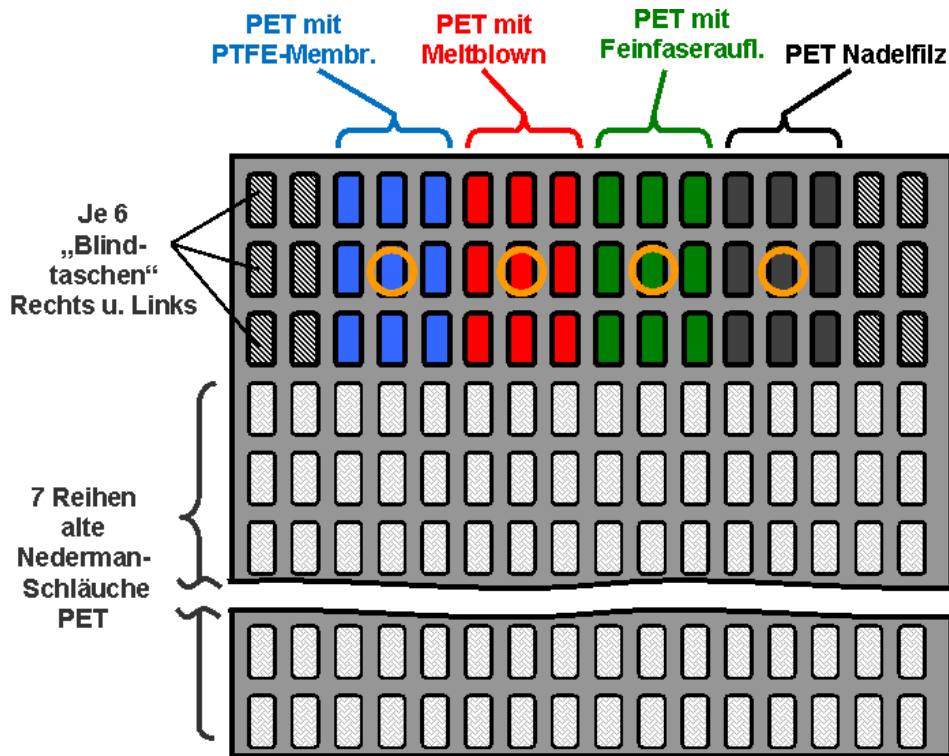


Abbildung 42: Einbau der Filtermedien in die Spülwagenseiter der NMA

Der Volumenstrom der NMA wurde für die Versuchserien auf ca. 10.000 m³/h begrenzt. Die Additivstaubzugabe wurde so eingestellt, dass sich mit der schon vorhandenen Rohgaskonzentration eine Gesamt-Rohgaskonzentration von ca. 30 g/m³ ergab. Der maximal zulässige Differenzdruck über alle Filter (Triggerdruck) wurde auf 1300 Pa eingestellt. Die Ventilöffnungszeit bei einem Druckstoß war 200 ms, die minimale Pause zwischen zwei Abreinigungspulsen 15 s. Die NMA hatte in der Anlagensteuerung eine nicht abstellbare Abreinigungshysterese von 30 Pa. Dies bedeutet, dass das Druckstoßsystem immer solange abreinigt, bis der anliegende Differenzdruck mindestens unter 1270 Pa liegt.

Messtechnik an der NMA

In der NMA wurden bei jedem der 36 Einzelversuche folgende Parameter gemessen:

- Emission gemessen mit Optischem Partikelzähler (OPC) und gravimetrischem Verfahren (PM2.5-Zyklon mit Absolutfilter)
- Differenzdruck zwischen Rein- und Rohgasseite
- Die Filterwiderstände der Medien
- Umlaufdauer der Versuchszyklen

Emissionsmessungen mit dem OPC

Die Probenahme erfolgte mit dem gerätespezifischen Volumenstrom des OPC und war nicht isokinetisch. Dies lag zu einen daran, dass es aufgrund der schmalen Leitbleche nicht möglich war passende Sonden anzubringen und zum anderen daran, dass zum Zeitpunkt der Planung noch nicht bekannt war, welche Strömungsgeschwindigkeiten in den Filterschläuchen auftreten würde. Der Mangel einer isokinetischen Absaugung sollte jedoch zu keiner Verfälschung der Messergebnisse führen, da die emittierten Partikel so klein sind, dass keine isokinetische Absaugung nötig ist. Die Absaugung der Partikel erfolgte mit antistatischen Schläuchen.

Pro Filtermedium war jeweils eine Absaugung für den Zyklon und eine OPC-Absaugung vorhanden. Da jedoch nur ein OPC vorhanden war musste dieser während des Versuchs jeweils an des gemessene Filtermedium angesteckt werden. Daraus gab sich ein leichter Zeitversatz bzw. leicht unterschiedliche Alterungszustände bei den einzelnen Medien.

In Abbildung 43 ist die Installation der Partikelabsaugung zu erkennen.

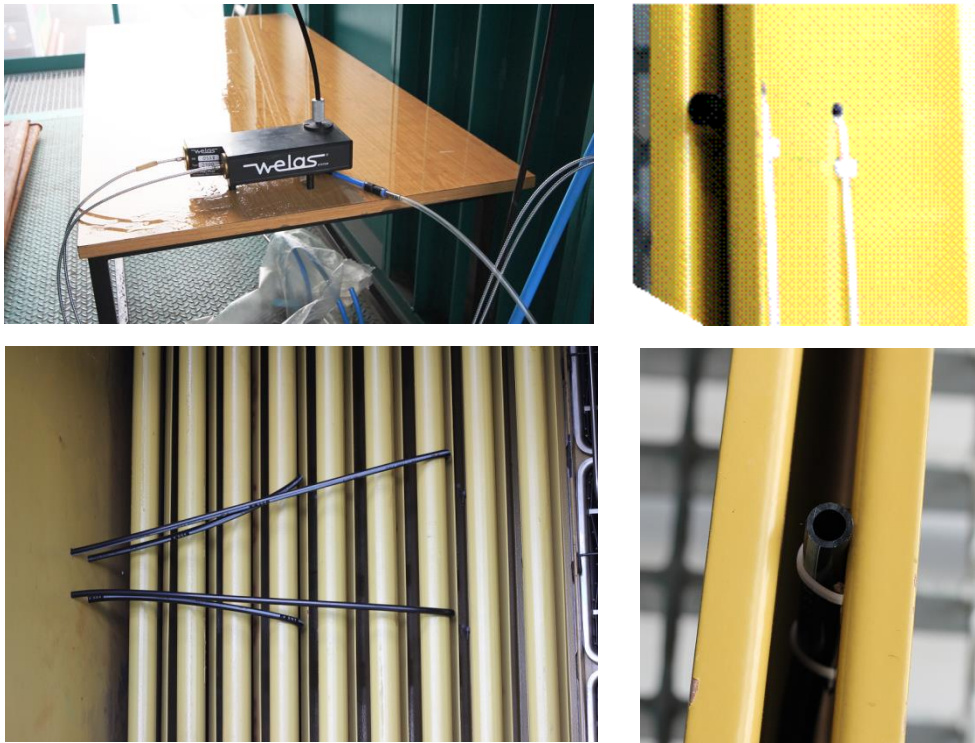


Abbildung 43: Aufbau der Probenahme für OPC und PM2.5 Zyklon

7.1. Ergebnisse der Streulichtmessungen Partikelgrößenverteilungen

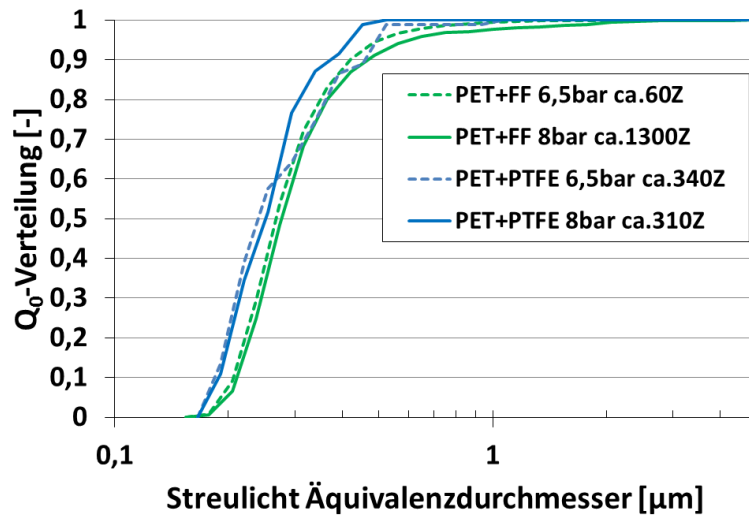


Abbildung 44: Q_0 -Verteilung versch. Filtermedien bei variierenden Alterungszuständen und Tankdrücken

Die mit den OPC gemessenen Partikelgrößenverteilungen waren nahezu unabhängig von Filtermedium, Tankdruck und Medienalter. In Abbildung 44 sind die Partikelsummenkurven von den Filtermedien PET mit Feinfaserauflage und PET mit Membranauflage dargestellt. Die Messungen erfolgten bei den maximal auseinander liegenden Tankdrücken (6,5 bar und 8 bar) und bei unterschiedlichen Alterungszuständen. Die dargestellten Kurven sind trotzdem nahezu kongruent.

Zuweisung der Emissionspeaks zu den Abreinigungszeitpunkten

Da der Streulichtpartikelzähler und die Anlagensteuerung nicht miteinander gekoppelt werden konnten, musste die Zuweisung der einzelnen Emissionspeaks zu den Abreinigungszeitpunkten händisch erfolgen. Bei den stark emittierenden Filtermaterialien (PET und PET mit Feinfaserauflage) konnte diese Zuweisung sehr gut und eindeutig durchgeführt werden (s. Abbildung 45).

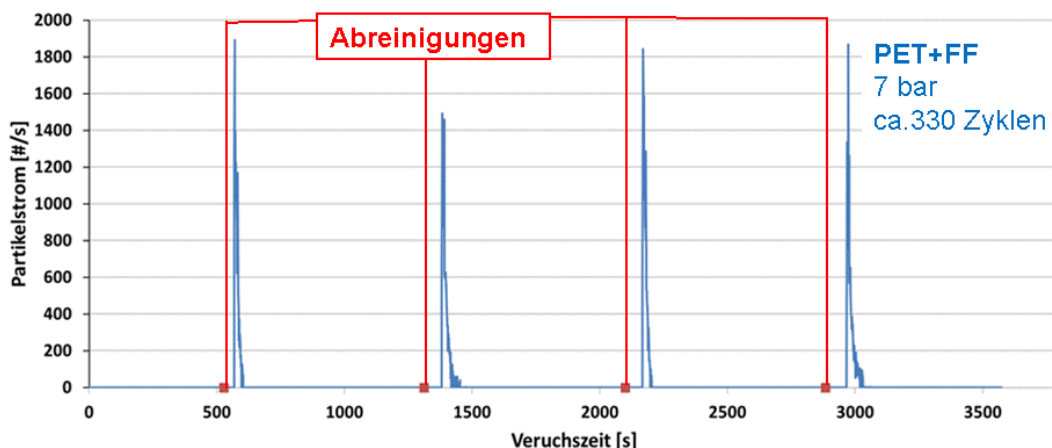


Abbildung 45: Zuweisung der Emissionspeaks zu den Abreinigungszeitpunkten bei PET mit Feinfaserauflage

Wie in Abbildung 46 gut zu erkennen verhält sich der Partikelstrom nach einer Abreinigung ähnlich zu den aus der Filterronden-Testanlage und MSLA bekannten Verhalten. So tritt der Emissionspeak direkt und schlagartig nach einer erfolgten Abreinigung auf. Sobald sich der Filterkuchen wieder aufbaut fällt der Partikelstrom durch das Medium wieder ab, so dass zwischen den Emissionspeaks (fast) keine Emission auftritt.

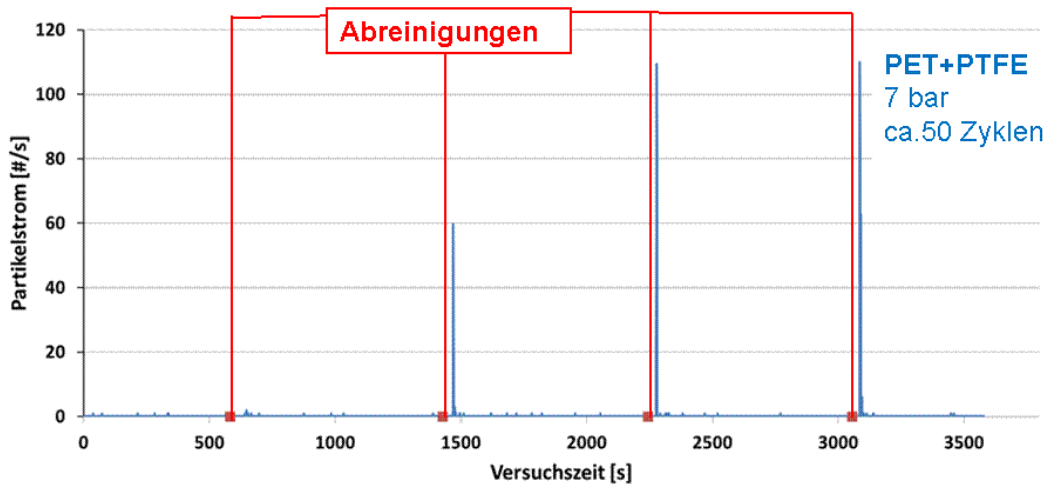


Abbildung 46: Zuweisung der Emissionspeaks zu den Abreinigungszeitpunkten bei PET mit Membranauflage bei ungealtertem Filtermedium

Bei den schwach emittierenden Filtermedien (Medien mit Membran- oder Meltblownauflage) stellte sich die Zuweisung des Abreinigungszeitpunkt als schwieriger heraus. Wie in Abbildung 46 erkennbar lässt sich die Zuweisung bei jungem Medienalter noch durchführen. Man erkennt zudem, dass der aus dem gemessenen Filterschlauch austretenden Partikelstrom deutlich geringer ausfällt. Der Abfall des Emissionspeaks auf (fast) Null findet dabei schneller statt. Jedoch gewinnen die Detektionen zwischen den Emissionspeaks an Einfluss.

Dies verstärkt sich weiter bei zunehmendem Medienalter. Bei deutlich gealterten Filtermedien ist fast keine Zuweisung mehr möglich (s. Abbildung 47). Da nur noch vereinzelt Partikel gemessen werden stellt der Partikelhintergrund einen deutlichen Anteil der Gesamtemission. Zudem kann ein einzelner Emissionspeak mit höherer Partikelemission die Gesamtemission dominieren. In Abbildung 47 ist ein solcher Emissionspeak bei ca. 4400s zu finden.

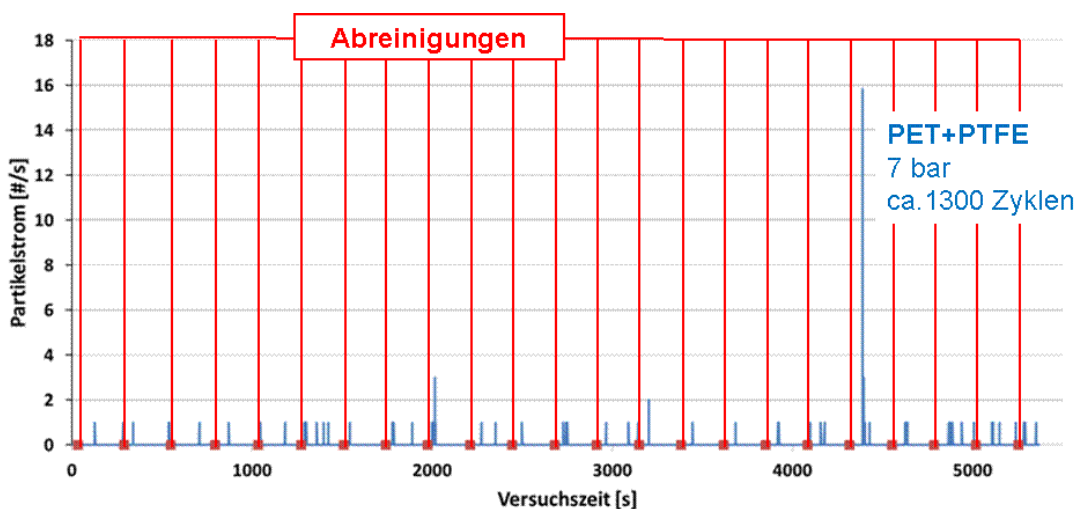


Abbildung 47: Zuweisung der Emissionspeaks zu den Abreinigungszeitpunkten bei PET mit Membranauflage bei deutlich gealtertem Filtermedium

Emission pro Zyklus und Filterfläche

Für die weitere Auswertung werden nur die deutlich erkennbaren und zuweisbaren Zyklen bzw. Emissionspeaks für die Berechnung der Partikelemission pro Zyklus und Filterfläche genutzt. Dies funktioniert wie schon beschrieben bei stark emittierenden Filtermedien sehr gut, führt aber aufgrund der schwiebrigen Zuweisung bei den schwach emittierenden Filtermedien ggf. zu höheren Emissionen pro Zyklus. Es stellt somit also für hochwertige Filtermedien eine „worst case“-Abschätzung dar.

Abbildung 48 stellt eine Übersicht über die mit dem OPC gewonnenen Emissionsdaten dar. Es ist zu erkennen, dass sich dabei zwei Emissionsgruppen herausbilden. Zum einen die in Schwarz und Grün dargestellten stark emittierenden Filtermedien (PET und PET+FF), zum anderen die in Rot und Blau schwach emittierenden Filtermedien (PET+Meltbl. Und PET+PTFE).

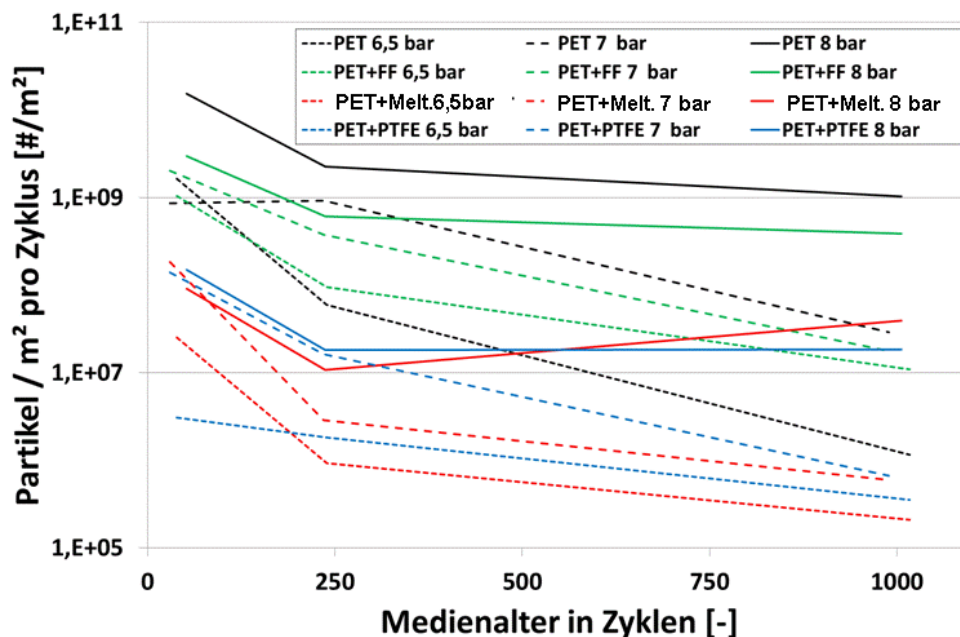


Abbildung 48: Übersicht über die Emissionsdaten Partikel / m² pro Zyklus über Medienalter

Die beiden Emissionsgruppen sollten hier zur Übersicht noch einmal einzeln aufgezeigt und diskutiert werden. In Abbildung 49 ist die Gruppe der stark emittierenden Medien dargestellt. Die Emission steigt erkennbar mit dem Tankdruck und fällt mit dem Medienalter. Zudem zeigt sich, dass das PET mit Feinfaserauflage ein besseres Filtrationsverhalten zeigt PET solange Emission vom Medium dominiert wird und nicht von zurückgebliebenen Kuchenrückstand. Eine relative Stabilisierung der Emission stellt sich nur bei den Versuchen mit 8 bar Tankdruck ein.

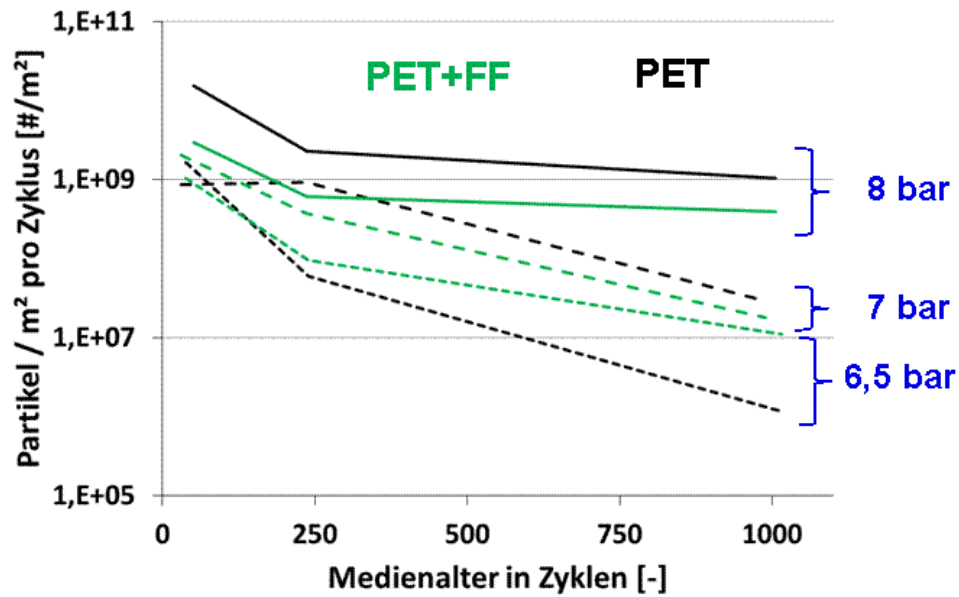


Abbildung 49: OPC-Emissionsdaten der stark emittieren Filtermedien.

Die OPC-Emissionsdaten der schwach emittierenden Filtermedien sind in Abbildung 50 dargestellt. Auch hier zeigt sich schon beobachtete Trend, dass die Partikelemissionen mit zunehmendem Tankdruck steigt und mit dem Medienalter fällt. Es zeigt sich dass das PET mit Meltblownauflage und das PET mit PTFE-Membranauflage auf ähnlichem (und sehr niedrigem) Niveau emittieren. Auch bei diesen Medien findet eine relative Stabilisierung (bzw. ein leichter Anstieg) nur bei 8 bar statt.

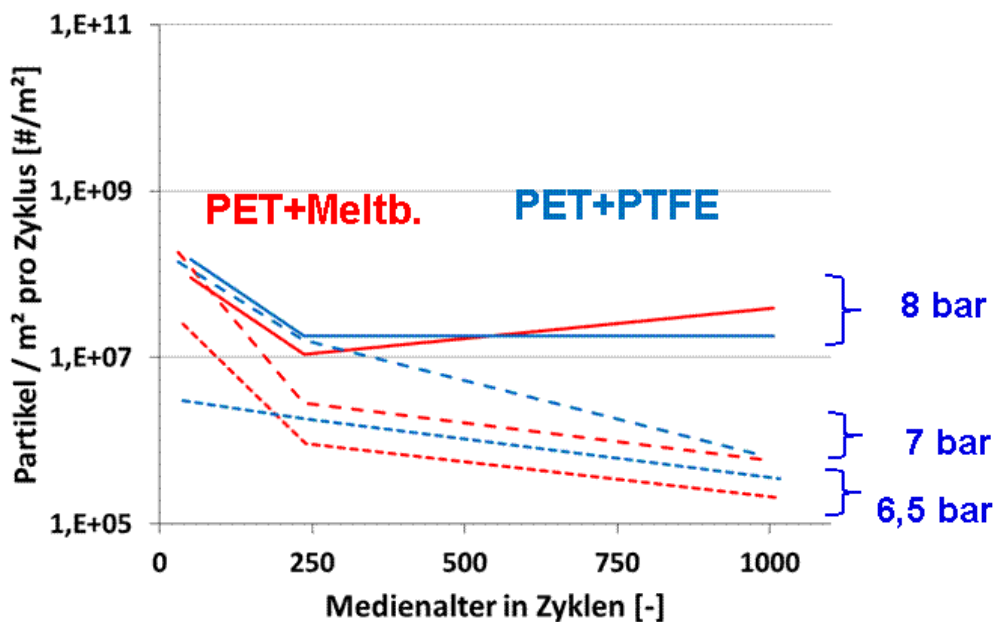


Abbildung 50: OPC-Emissionsdaten der schwach emittieren Filtermedien.

Vergleicht man stellvertretend das PET als stark emittierendes Medium mit dem PET mit Membranauflage als Vertreter der schwach emittierenden Medien kann man die Emissionen in ein direkteres Verhältnis setzen. Die Emissionsdaten der beiden Filtermedien sind in Abbildung 51 dargestellt.

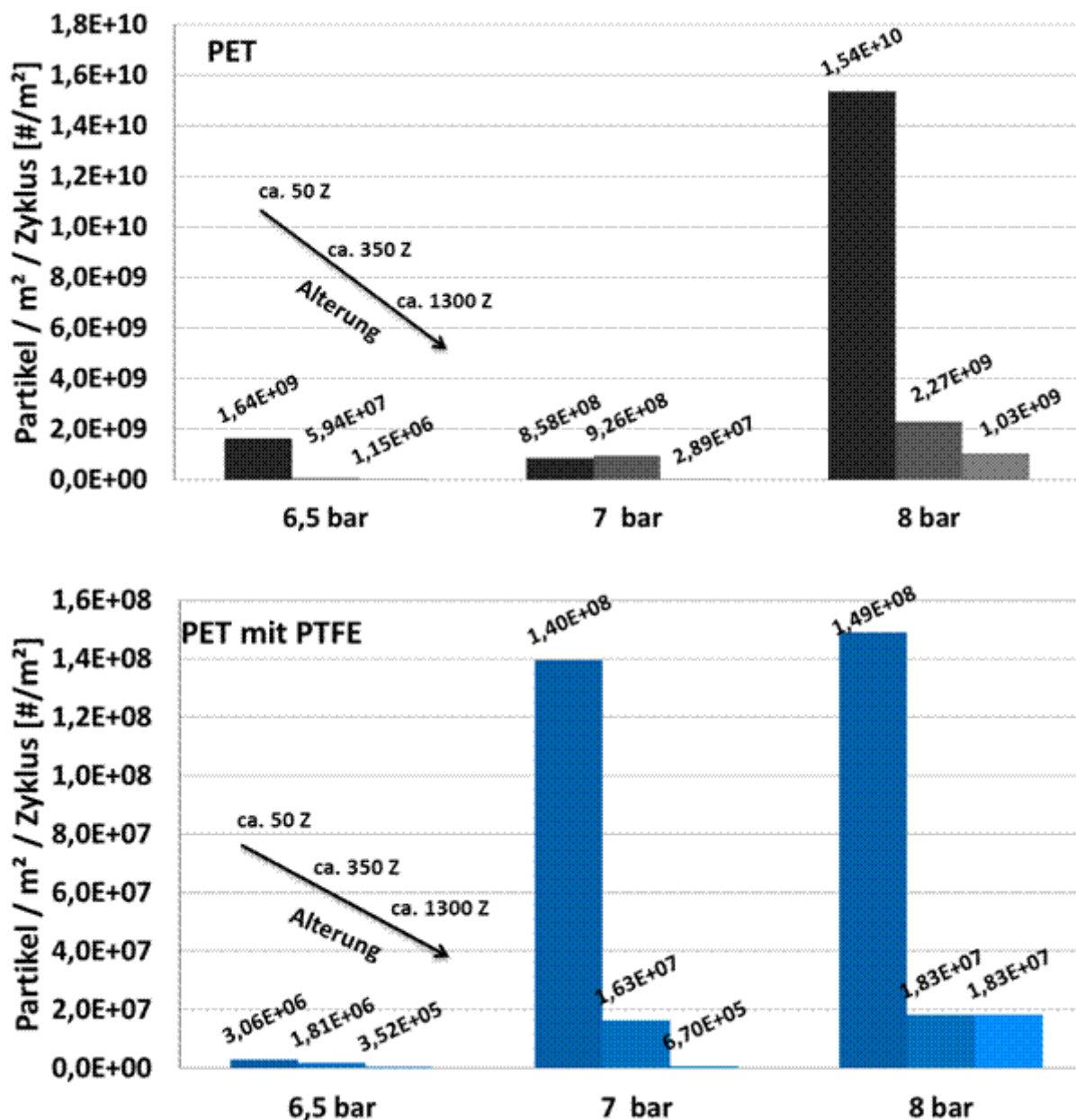


Abbildung 51: Vergleich der Emissionsdaten von PET (oben, schwarz) mit PET mit Membranauflage (unten, blau)

Im Vergleich zu den Emissionen des PET sind die Emissionen des PET mit Membran auf sehr niedrigem Niveau. Zum Teil finden sich beim PET mit Membranauflage selbst im stabilen Betrieb weniger als 10 Partikel pro Zyklus und mm². Nur im instabilen oder fast instabilen Betrieb des PET finden sich bei ähnliche Emissionen wie beim PET im stabilen Betrieb.

Bei stabilen Filtrationsbetrieb beider Medien (also bei 8 bar Tankdruck) stellt sich ein relativ konstantes Emissionsverhältnis des PET zu PET mit Membranauflage von ca. 100 ein. D.h. Die stark emittierenden Medien haben im stabilen Betrieb ca. 100 mal höhere Emissionen.

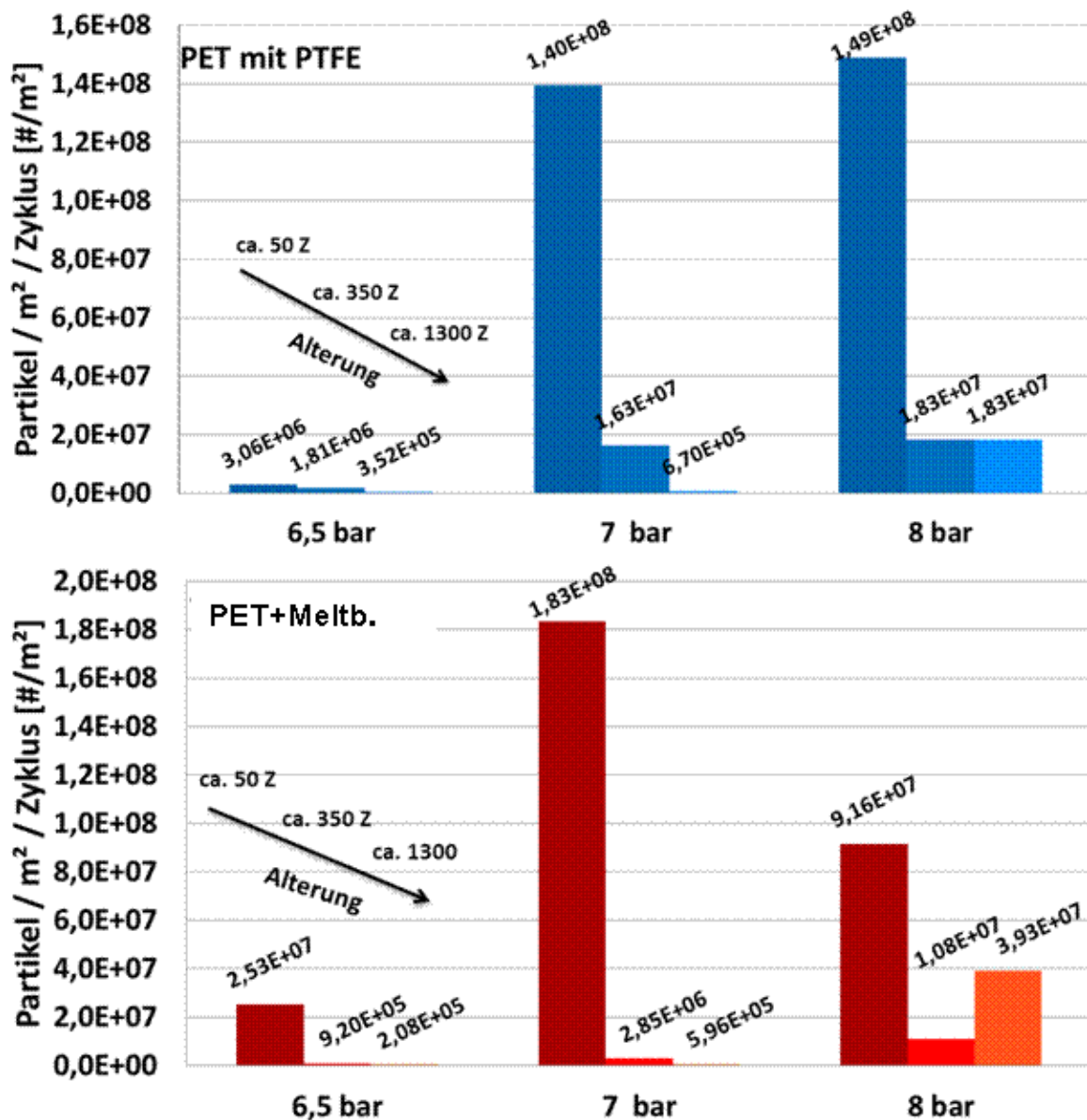


Abbildung 52: Vergleich der Emissionsdaten von PET mit Membranauflage (oben, blau) mit PET mit Meltblownauflage (unten, rot)

Beim direkten Vergleich der beiden hochwertigen Filtermedien erkennt man, dass diese auf vergleichbar niedrigem Emissionsniveau liegen. Jedes der Medien hat bei bestimmten Alterungszuständen bzw. Tankdrücken die besseren Filtrationseigenschaften. Dies liegt zu großen Teilen an der bereits angesprochenen Datenauswertung bei den schwach emittierenden Medien, welche zu starken Schwankungen führt.

Zusammenfassung der OPC-Messungen

Die Messungen an der NMA mittels OPC erlaubten es die Filtrationseigenschaften der untersuchten Filtermedien zu Charakterisieren. Dazu mussten zunächst die Messtechnik an der Nederman-Anlage installiert und einige Schwierigkeiten wie die parallele Untersuchung von vier Filtergruppen und die daraus resultierenden verschobenen Alterungszustände bewältigt werden. Zusätzlich musste noch eine Technik gefunden werden die Emission den erfolgten Abreinigungspulsen zuzuweisen.

Die stark emittierenden Filtermedien (PET und PET mit Feinfaserauflage) haben im Mittel 20 bis 100 mal höhere Emissionen als die schwach emittierenden Filtermedien PET mit Meltblownauflage bzw. Membranauflage. Nur bei sehr schlechter Abreinigung, wie sie an der Nederman-Anlage bei 6,5 bar auftrat, haben auch Standard Medien vergleichbar niedrige Emission. Bei sehr guter Abreinigung (hier 8 bar) fand eine Stabilisierung der Emission bei allen Medien mit dem Alter statt. Dagegen zeigte sich bei mäßiger und bei schlechter Abreinigung ein deutlicher Alterungseffekt bei allen Medientypen, der sich durch einen Zurückbleibenden Kuchen erklären lässt. Dies ist wiederum ein indirekter Beweis für den Einfluss der Anlagenbetriebsweise (Tankdruck) auf die Emission. Bei den durchgeführten Messungen an der Nederman-Anlage ist der Einfluss des Tankdrucks geringer als der Einfluss des Medientyps.

7.2. Reingaskonzentration, Umlaufzeiten und Medienwiderstand an der NMA

Konzentrationsmessungen mit PM2.5-Zyklon und Absolutfiltern

Zur Messung der Reingaskonzentration in der NMA standen 4 PM2.5 Zykone zur Verfügung. Die Zykone dienen dabei als Vorabscheider für einen darauffolgenden Absolutfilter, die nur Feinststaubpartikel nach PM2.5 Definition durchlassen. Die Zykone müssen mit einem Volumenstrom von 1 m³/h betrieben werden, da die exakte Trennkurve nur bei diesem Volumenstrom funktioniert. Um den Volumenstrom genau einzustellen wurde eine Kombination von kritischen Düsen und Nadelventilen verwendet. Vor jeder Messung wurde zudem mittels eines Durchströmungsmessgerät (Bubbleflow) der exakte Volumenstrom eingestellt. Durch die regelmäßige Kontrolle des Druckabfalls vor der kritischen Düse konnte die korrekte Absaugung sichergestellt werden. Wie schon beim OPC erfolgte die Absaugung nicht isokinetisch.

Die mittlere Konzentrationen der aus dem untersuchten Filtermedien austretenden Volumenströme wurden bei den einzelnen Versuchen für jeweils ca. 10-12 h erfasst. Für die gravimetrische Auswertung der Absolutfilter ist dies jedoch eine sehr kurze Messdauer. Der angegebene Zeitraum entspricht je nach Alterungsstufe der Filtermedien ca. 50-150 Abreinigungen. In Abbildung 53 ist der an die NMA angebrachte Aufbau der Zykone mit Absolutfilter und die kritischen Düsen mit Nadelventil zu erkennen.



Abbildung 53: Aufbau der Reingasmessungen an der NMA

Die gemessene Reingaskonzentration war bei allen Versuchen und Filtermedien zwischen 0,01 und 0,1 mg/m³ und damit Nahe der Nachweisgrenze von gravimetrischen Messverfahren. In Abbildung 54 ist eine Überblick über die Reingaskonzentration aller Versuche geboten.

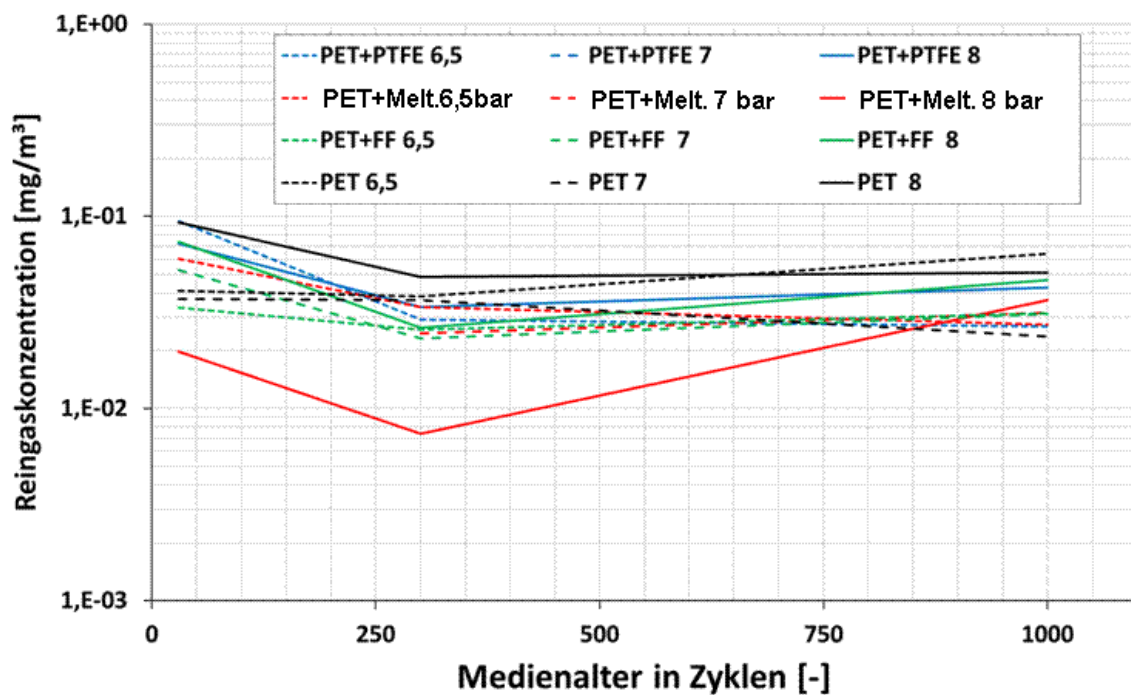


Abbildung 54: Überblick über Reingaskonzentration aller Versuche an der NMA

Eine mögliche Ursache für die sehr niedrigen Reingaskonzentrationen könnte das sehr gutmütige Filtrationsverhalten vom verwendeten Teststaub Trassmehl sein. Der Staub zeigte auch bei den Versuchen an VDI-Anlagen in Karlsruhe sehr geringe Emissionen. Zudem fiel die Abreinigung an der NMA selbst mit 8 bar recht moderat aus, so dass selbst bei diesem Tankdruck ein Restfilterkuchen an der Filtertaschen möglich wäre, der zur deutlichen Senkung der Emissionen beitragen könnte.

Umlaufzeiten an der NMA

Die in der NMA erfassten Umlaufzeiten stellen im Gegensatz zu den Messungen an Filterronden-Testanlagen oder der MSLA eine Mittelung über alle Filtertaschen dar. In den beiden Testanlagen (Filterronden-Testanlage und MSLA) wird jeweils nur ein Filtermedium untersucht, während in der NMA 5 unterschiedliche Medien betrieben werden (die vier Testmedien und die eingebauten Standard Nederman-Filterschläuche). Daher kann man aus den Messungen auch keine Aussagen über die einzelnen Filtermedien treffen, sondern nur über die Betriebsweise bzw. den -zustand der Filteranlage.

Bei den Untersuchungen zu den Umlaufzeiten zeigte sich an der NMA der erwartete Verlauf, wie er schon aus der Mehrschlauch-Laboranlage bekannt ist. Die Umlaufzeit steigt mit zunehmendem Tankdruck. Bei 6,5 bar und 7 bar findet ein schneller und deutlicher Abfall der Umlaufzeit statt (Halbierung der Umlaufzeit). Zum Zeitpunkt der letzten Versuchsserie (nach 1300 Umläufen) weisen die Versuche mit 6,5 bar instabiles Filtrationsverhalten auf. Auch der Filtrationsbetrieb mit 7 bar nähert sich der durch die Anlagensteuerung vorgegebenen minimal möglichen Umlaufzeit (s. Abbildung 55).

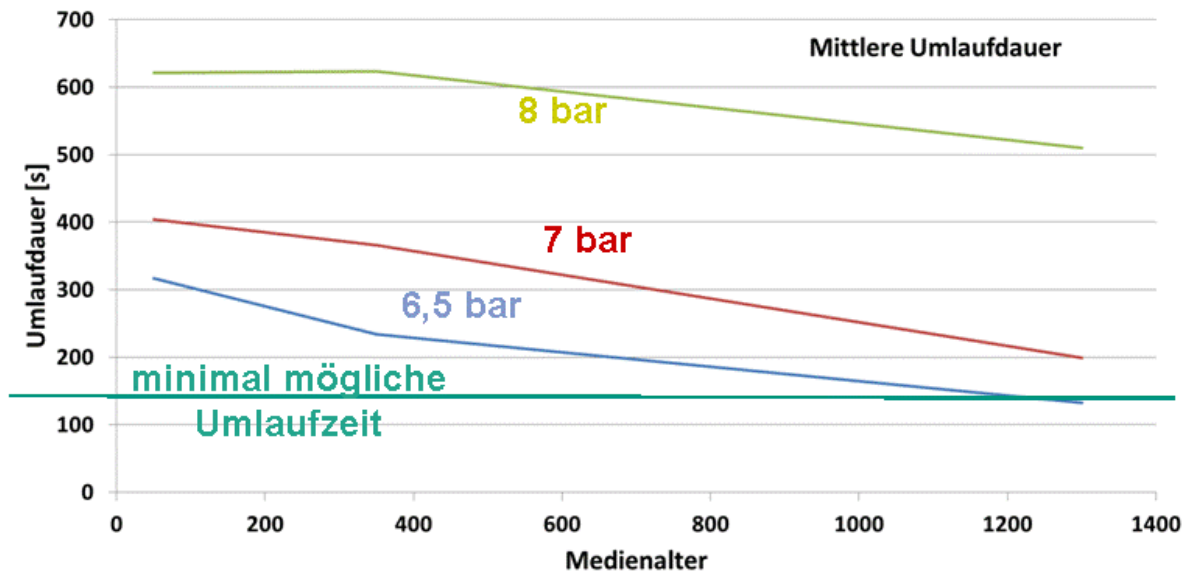


Abbildung 55: Umlaufzeiten in Abhängigkeit des Tankdrucks und des Medienalters in der NMA

Medienwiderstand an der NMA

Für die Messung der Medienwiderstände wurde die aus den Filterschläuchen ausströmende Luftmenge oder die Filteranströmgeschwindigkeit benötigt. Um diese zu erfassen wurden Strömungssensoren der Firma Schmidt Technology des Typs SS20.250 verwendet. Zunächst musste das Strömungsprofil längs der Filtertasche aufgenommen werden. Diese ist in Abbildung 56 auf der linken Seite dargestellt. Die Messposition des Strömungssensors wurde danach so gewählt, dass sie der Mittleren Ausströmgeschwindigkeit aus der Filtertasche entsprach. Der Volumenstrom berechnete sich aus der mittleren Ausströmgeschwindigkeit und der Ausströmfläche. Die Anbringung des Strömungssensors ist in Abbildung 56 auf der rechten Seite erkennbar.

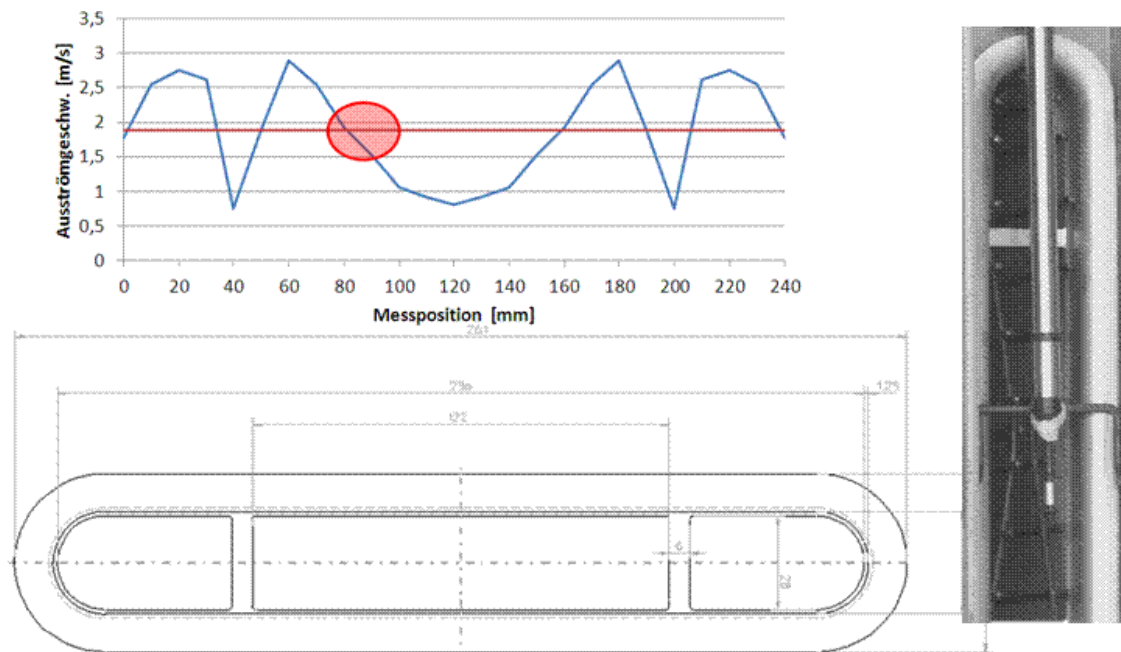


Abbildung 56: Geschwindigkeitsprofil längs der Filtertasche und Einbau des Strömungssensors

Zunächst soll wieder ein Überblick über alle Versuche gegeben werden. In Abbildung 57 wurden die Ergebnisse der Filterwiderstände für alle Filtermaterialien und Tankdrücke zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass die Filtermedien sich entsprechend dem Abreinigungsdruck gruppieren. Von Beginn an bis zu höheren Medienaltern finden sich bei niedrigen Tankdrücken sehr hohe Medienwiderstände. Dies bestätigt die Annahme einer unvollständigen Abreinigung der Filterschläuche.

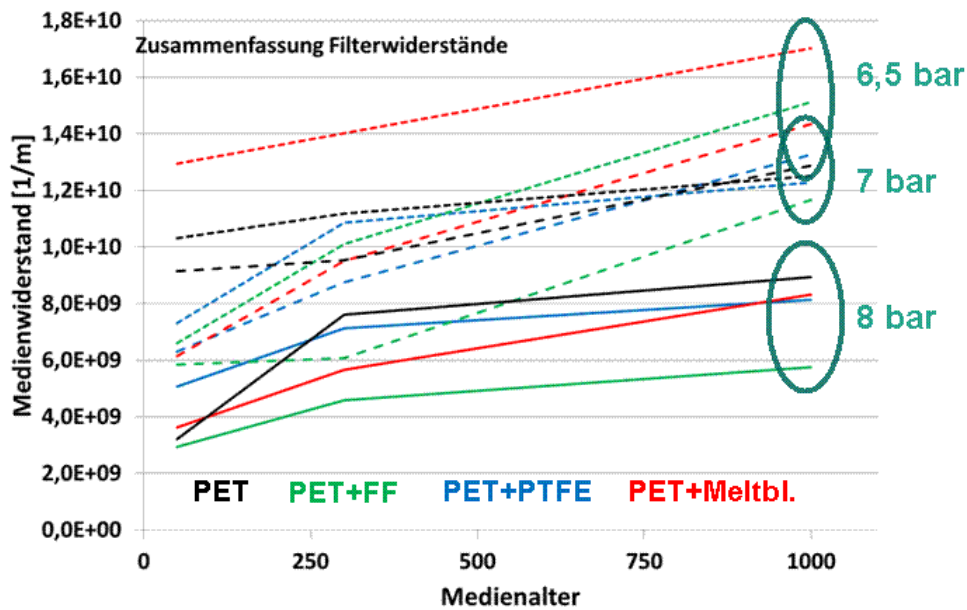


Abbildung 57: Zusammenfassung der Medienwiderstände

Da der Medienwiderstand bei unvollständiger Abreinigung keine Aussage zu den Medieneigenschaften erlaubt soll hier fortan nur noch der Widerstand der mit 8 bar abgereinigten Medien betrachtet werden. In Abbildung 58 sind die Filterwiderstände bei 8 bar Tankdruck dargestellt. Im Neuzustand bzw. bei geringem Medienalter weisen PET und PET mit Feinfaserauflage den niedrigsten Medienwiderstand auf, der Widerstand des PET mit Meltblown liegt unter dem des PET mit Membranauflage. Ab fortgeschrittenem Medienalter liegt der Widerstand des PET über dem der anderen Medien. Dies kann zum einen an einer Einlagerung des Trassmehls in inneren des Filtermediums liegen, an einer schlechteren Abreignbarkeit des PETs aufgrund der faserigen Oberflächenstruktur oder an einer Veränderung der Messposition des SS20250 Strömungssensors. Das PET mit Feinfaserauflage hat über alle Alterungszustände den niedrigsten Medienwiderstand und dementsprechend den niedrigsten Energieverbrauch in Betrieb.

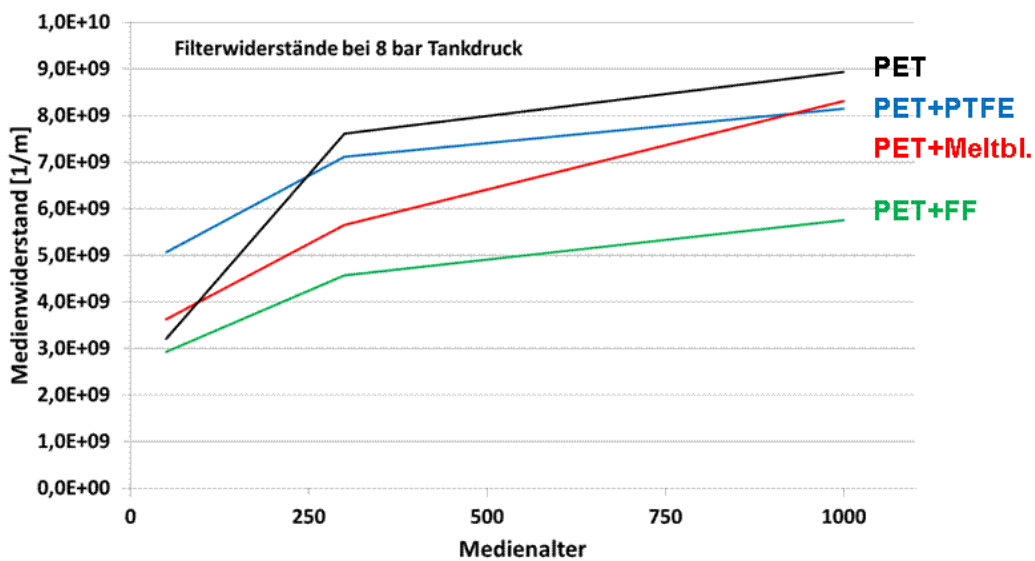


Abbildung 58: Filterwiderstände bei 8 bar Tankdruck

8. Ergebnisse Teilprojekt 3

Ursprünglich verantwortlicher Partner: Ing.-Büro Dr. W. Schulteß

Zentrales Ziel: Sammlung und Bewertung der Ergebnisse aus Praxissicht

AP3.1 Bewertung der Ergebnisse

Das Teilprojekt 3 sollte durch das Ing.-Büro Dr. W. Schulteß erfolgen. Aufgrund persönlicher Umstände von Seiten Herrn Schulteß und der Verzögerung der Messungen den Industrieanlagen konnte das Teilprojekt 3 nicht wie geplant bearbeitet werden. Die Bewertung der Ergebnisse erfolgte aus diesem Grund in den Teilprojekten der anderen Projektpartner.

8.1. Zusammenfassung:

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde der Einfluss von verschiedenen Betriebsbedingungen – namentlich Tankdruck (und damit die Regenerierungsintensität), Medienalter, Filtermedium und Abreinigungsfolge – auf das Emissionsverhalten von abreinigbaren Filtermedien untersucht, um daraus eine optimale Betriebsweise in Hinblick auf eine Minimierung der Feinstaubemission abzuleiten. Da eine solche Strategie nur bei Wahrung der Energieeffizienz umsetzbar ist, wurde zudem der Einfluss der Betriebsweise auf Restdruckverlust (bzw. Filterwiderstand) und Zyklusdauer betrachtet. Diese Untersuchungen wurden auf einer Mehrschlauchanlage mit industriellen Ausmaßen mit zunächst unbestaubten Filtermedien durchgeführt und dann auf definiert gealterte Filtermedien ausgedehnt, um die Gültigkeit der Aussagen für das industriell besonders relevante Langzeitverhalten zu verifizieren.

Im dem Projekt vorausgehenden Untersuchungen wurden die maßgeblichen Emissionsmechanismen identifiziert, da deren Kenntnis für die zielgerichtete Anpassung der Betriebsweise zur Minimierung der Emissionen nützlich ist. Des Weiteren wurden alle Vorgänge durchleuchtet, welche zeitlich unmittelbar mit der Regenerierung des Filtermediums zusammenhängen. Ausgangspunkt der Überlegungen war dabei, dass die Partikelemission unmittelbar nach dem Druckstoß ihr Maximum aufweist und daher auch von gleichzeitig ablaufenden Vorgängen vor oder im Filtermedium am stärksten beeinflusst werden würde. Für die zeitaufgelöste Messung der Emissionen wurde ein kommerzieller Streulichtpartikelzähler für den Teststaub Pural SB kalibriert, so dass die gemessene Anzahlverteilung der emittierten Partikeln direkt in eine Massenverteilung und Massenkonzentration umgerechnet werden konnte. Die Kalibrierung wurde durch eine Gewichtung nach PM_{2.5} ergänzt, womit direkt die Daten der Feinstaubfraktion zur Verfügung standen.

Im Rahmen der Untersuchungen zum Einfluss der Betriebsbedingungen auf das Verhalten eines Oberflächenfilters erwiesen sich der Tankdruck und damit die Regenerierungsintensität sowohl bei neuen als auch bei gealterten Filtermedien als der wesentliche Einflussfaktor auf das Betriebs- und Emissionsverhalten. Es konnte stets mit dem niedrigsten gewählten Tankdruck die niedrigste Emission pro Zyklus und auch die niedrigste Massenkonzentration erreicht werden, allerdings auf Kosten der Zyklusdauer und des Restdruckverlustes. Insbesondere hat sich gezeigt, dass eine Erhöhung der Regenerierungsintensität über ein bestimmtes Maß hinaus keine wesentliche Verbesserung von Zyklusdauer und Restdruckverlust mehr bewirkt, sich aber deutlich negativ auf das Emissionsverhalten auswirkt.

Bei den Untersuchungen an gealterten Filtermedien konnte zunächst für alle Filtermaterialien die bekannte Erhöhung des Restdruckverlustes sowie die Verringerung von Zyklusdauer und Emission pro Zyklus mit zunehmendem Medienalter bestätigt werden. Der Verlauf über die Anzahl der Alterungszyklen war für unterschiedliche Medien jedoch verschieden.

Allen Versuchen mit gealterten Filtermedien ist gemein, dass eine endgültige Stabilisierung von Restdruckverlust und Zyklusdauer nicht beobachtet werden konnte, die Veränderungen sind aber nach 10.000 Zyklen nur noch recht gering. Weiterhin konnte in der Regel zwar mit zunehmender Alterung eine Verringerung der Emission pro Zyklus festgestellt werden, die Reingasmassenkonzentration hat sich aufgrund der Verkürzung der Zyklusdauer jedoch eher erhöht. Lediglich bei einem verringerten Tankdruck konnte – trotz eines Betriebszustandes nahe der Instabilität – eine Reduzierung der Massenkonzentration der Emissionen mit zunehmendem Medienalter erreicht werden.

Die Filtrationseigenschaften der untersuchten Filtermedien wurden auf VDI-Filteranlagen charakterisiert. Hierzu musste zunächst die Messtechnik auf die Messmöglichkeit von PM_{2,5}-Feinstaub mittels PM_{2,5}-Zyklon erweitert werden.

Die schwach emittierenden Filtermedien (Nadelfilz mit Meltblownauflage bzw. Membranauflage) zeigten je eine 10 bis 50-fach geringere PM_{2,5}-Feinstaubemission als die stark emittierenden Filtermedien (Standard-Nadelfilz und Feinfaser-Nadelfilz).

Bzgl. des jeweiligen Druckverlustverhaltens der untersuchten Filtermedien besaßen die schwach emittierenden Filtermedien Nadelfilz mit Meltblownauflage bzw. Membranauflage die steilsten Filtermedienanstiege. Bei der ersten Versuchsreihe ohne Filtermedienalterung liegen diese beiden Filtermedien im Druckverlustanstieg noch dicht beieinander. Bei der Testreihe mit beschleunigter Alterung besaß das Meltblown-Filter eine starke Abweichung mit einem sehr steilen Druckverlustanstieg gegenüber den anderen Medien. Diese Abweichung ist durch die partielle Meltblown-Beschädigung bei dieser Art der beschleunigten Alterung zu erklären. Bei den Versuchsreihen an Industriefilteranlagen mit realen Filterschläuchen an der Nederman-Filteranlage lagen die schwach emittierenden Filtermedien Nadelfilz mit Meltblownauflage bzw. Membranauflage bzgl. Filtermedienwiderstand auch über dem Feinfaser-Nadelfilz, jedoch noch unterhalb vom Standard-Nadelfilz. Das Meltblown-Filtermedium fiel somit nicht bei den Messungen an der Nederman-Filteranlage bzgl. des Druckverlustniveaus aus dem Bereich der anderen Filtermedien heraus wie es bei den Filterprüfstandsversuchen mit beschleunigter Alterung der Fall war.

Es kann in Aussicht gestellt werden, dass bei den schwach emittierenden Filtermedien Nadelfilz mit Meltblownauflage bzw. Membranauflage mit den Maßnahmen einer optimierten Filterbetriebsweise ein zum Teil höherer Filtermedienwiderstand kompensiert werden kann. So kann eine deutliche Minderung von Feinstaubemission bei geringem Energiemehraufwand erreicht werden.

8.2. Schlussfolgerungen:

Durch einen höheren Druckverlust vor der Regenerierung wird die Zyklusdauer verlängert und damit das durch das Filter tretende Gasvolumen pro Filtrationszyklus erhöht. Aufgrund der vom Druckverlust vor der Regenerierung nahezu unabhängigen Emission pro Zyklus verringert sich folglich die emittierte Massenkonzentration.

Ein niedrige Regenerierungsintensität gewährleistet die Erhaltung einer größeren Restkuchenschicht bzw. eine intensivere Staubeinlagerung im Filtermedium, wodurch der direkte Durchtritt von Partikeln aus dem Rohgas vermindert wird. In jedem Fall ist jedoch eine zu intensive Abreinigung zu vermeiden, da diese keine wesentliche Verbesserung des Betriebsverhaltens mit sich bringt, das Emissionsverhalten aber deutlich verschlechtert. Die Rohgaskonzentration sollte auf Basis der vorliegenden Ergebnisse eher niedrig gewählt werden. Die Möglichkeit der Einflussnahme auf die Staubkonzentration bei bestehenden Anlagen ist allerdings sehr eingeschränkt. An diesem Punkt wird auch deutlich, dass die Einhaltung von Emissionsgrenzwerten bei extrem hohen Rohgasstaubkonzentrationen und daher besonders hohen Abreinigungsfrequenzen sehr schwierig wird. Dies ist beispielsweise der Fall bei Anlagen zur kombinierten Abcheidung von Schadgasen und Stäuben, die zum Teil mit großen Mengen an Sorbens betrieben werden und Rohgasstaubkonzentrationen von über 1.000 g/m³ erreichen.

Weiterhin muss beachtet werden, dass neben dem Tankdruck auch die Konstruktion der Filteranlage die Regenerierungsintensität definiert. Auch scheinbar nebensächliche Konstruktionsdetails können hier einen signifikanten Effekt aufweisen. Bei industriellen Schlauchfilteranlagen ist eine Vielzahl weiterer konstruktiver Freiheitsgrade – bspw. Schlauchlänge, Ausformung der Blasrohröffnung (z. B. Coanda Injektor), Einsatz eines Venturirohrs etc. – vorhanden, deren Einfluss auf die Regenerierungsintensität oftmals nicht in ausreichendem Maße untersucht ist. Die in der industriellen Praxis vorherrschende Auslegung des Regenerierungssystems auf Basis von Erfahrungen und Firmentraditionen ist daher kritisch zu hinterfragen. Nur in den seltensten Fällen ist eine unveränderte Übertragung des Anlagenkonzepts von einem Anwendungsfall auf den anderen möglich.

Bei den untersuchten Medien zeigte sich, dass sich mit dem neuen Filtermaterial mit Meltblownauflage ähnlich gute Emissionswerte wie mit einem Filtermaterial mit Membranauflage erzielen lassen. Die beiden Filtermedien zeigen jedoch auch erhöhte Filterwiderstände (und somit höhere Energiekosten) im Vergleich zu Standardmedien. Bei entsprechender Anlagenfahrweise (schlechte Regenerierung, Betrieb nahe der Stabilitätsgrenze) konnten auch mit Standardmedien ähnliche niedrige Emissionen erzielt werden. Dabei lagen die Medienwiderstände und somit die Energieaufwendung deutlich über den hochwertigen Medien.

9. Verwertungsplan

9.1. Wirtschaftliche Verwertung

Die Umsetzung der EU-Richtlinien, die mit einer stufenweisen Absenkung der Grenzwerte für Feinstpartikel-Emissionen verbunden ist, macht Maßnahmen zur Verringerung der Feinstpartikel-Emissionen erforderlich. In diesem Kontext sind die in diesem Forschungsvorhaben beobachteten Strategien zur Minderung der Emissionen sowie die Entwicklung und Optimierung der PM_{2,5}-Messtechnik für Aerosolabscheideverfahren an Schlauchfilteranlagen zu sehen. Ein weiterer Aspekt war die Weiterentwicklung bzw. Umsetzung eines etablierten und adaptierten Messverfahrens für PM_{2.5}. Damit wird ein weiterer industrieller Bereich abgedeckt, in dem die erzielten Ergebnisse direkt genutzt werden können.

Die entstandenen Bewertungen von Emissionsminderung lassen sich durch ihre allgemein gültige Darstellung auch auf andere Problemfelder übertragen. Das erarbeitete Lösungskonzept, das universell auf unterschiedliche Staubsorten und Filtermedien übertragen werden kann, ermöglicht ein tief greifendes Verständnis der Emissionsmechanismen.

Mit den erzielten Forschungsergebnissen wird es gelingen, den Marktanteil von filternden Abscheidern weiter zu erhöhen. Hier leistet das Forschungsvorhaben einen wesentlichen Beitrag und stärkt damit die Stellung der in diesem Bereich tätigen Unternehmen.

Die Betreiber von Anlagen, die Aerosole emittieren, erhalten mit der entwickelten Messtechnik ein wichtiges Mittel, ihre Anlagen und Prozesse zu optimieren und gezielt Emissionsminderungsmaßnahmen vorzunehmen. Teure Fehlinvestitionen aufgrund schlecht funktionierender Anlagen werden dadurch vermieden. Von den Forschungsergebnissen profitieren nicht nur die Anwender, sondern vor allem auch die Hersteller von Komponenten und Anlagen zur industriellen Abgasreinigung. Die Ergebnisse geben weiterhin Erbauern und Betreibern von Abreinigungsfilteranlagen eine verlässliche Bewertungsmethode der Filter in die Hand. Sie helfen bei der Klärung der Frage, ob und unter welchen Bedingungen die Einhaltung zukünftiger PM-basierender Grenzwerte überhaupt möglich ist, bzw. welches Potential zur Leistungssteigerung ihrer Produkte noch vorhanden ist.

Nederman Filtration GmbH hat weltweit ein Marktvolumen an FS / FD Filteranlagen installiert von ca. 300.000.000 m³/h und es werden jedes Jahr ca. 20.000.000 m³/h zusätzlich installiert. Bei neu installierten Anlagen zeigt sich ein Trend zu immer niedrigeren Emissionen, die auch von Nederman betriebssicher über Jahre garantiert werden müssen. Gleichzeitig wird der Kostendruck für den Betreiber in der Industrie in Deutschland immer größer, da die Kosten für die Abgasreinigungsanlagen auf die Produkte umgelegt werden müssen. Im Ausland werden oftmals die Produktionsanlagen mit reduzierter Technik betrieben, was dann wiederum zu geringeren Kosten pro Betriebsstunde bzw. pro Produkteinheit führt. Somit besteht ein ständiger Druck auf die

Hersteller von Abgasreinigungsanlagen diese kostengünstig und optimal auszuführen. Hierbei zählen nicht nur die Investitionssumme, sondern auch die Betriebskosten wie elektrische Energie und Standzeit des Filtrationsmaterials bei geringen Staubemissionen. Als Markteintrittswiderstand stehen sowohl die Investitionskosten als auch die Betriebskosten im Vordergrund, da die von Nederman gelieferten Anlagen in der Regel keine Produktfilter sind, sondern ausschließlich zur Luftreinhaltung eingesetzt werden.

Als Anwendergruppe sieht die Fa. Nederman Stahlwerke und Gießereien, die in Deutschland und weltweit Luftmengen mit bis zu 1 Million m³ pro Filteranlage reinigen müssen, aber auch in den vielen kleinen Anlagen, wie für die Ersatzbrennstoffverbrennung (EBS Verbrennung) und für andere Industriebereiche, lassen sich die Ergebnisse übertragen. Eine Hochrechnung ergibt hier ein Marktvolumen von bis zu 1500 Anlagen für die Neuinstallation in den kommenden 5 Jahren für Fa. Nederman. Auf Basis der Frost + Sullivan Studie 2005 welche ein Marktvolumen für Europa von ca. 719 Mio. \$ / a in 2009 prognostiziert, entspräche dies etwa einem Marktanteil von 10 %.

Parallel zu den neu zu installierenden Anlagen wird die Fa. Nederman verstärkt bei Kunden Konzepte zur Umrüstung von bestehenden Anlagen vorstellen. Schon heute existiert eine Abteilung After Sales and Services (ASS), die sich ausschließlich mit Nachrüstung und Umbau von Altanlagen beschäftigt. Für diese Anlagen werden im Rahmen des Forschungsprojektes Konzepte erarbeitet, die dann nach Freigabe durch den Kunden in einem Zeitraum von 3 bis 6 Monaten umgesetzt werden können. Erste Ergebnisse erwartet die Fa. Nederman nach einem Jahr Projektlaufzeit, sodass mit diesen schon die Konzepte für die großtechnische Umsetzung begonnen werden können. Eine Umsetzung aller Erkenntnisse wird ca. 6 bis 9 Monate benötigen nach Abschluss des Projektes.

Aufbauend auf das Projekt „Entwicklung einer neuartigen Feinstaubfiltrationsanlage für Abluftsysteme in der Großindustrie“, das vom Land Baden-Württemberg unter der Nummer BUT 026 gefördert wurde, werden im Rahmen dieses Projektes Feinstaubmessungen durchgeführt. Somit werden weitere Erkenntnisse gewonnen, die darauf hindeuten dass ca. 67 Tonnen pro Jahr an Feinstaub durch Anlagen der Fa. Nederman weniger ausgestoßen werden. Parallel wird an den mit Druckluft abgereinigten Neuanlagen mit einer elektrische Energieeinsparung von ca. 30 bis 45 % gerechnet.

Unabhängig vom europäischen Wettbewerb sind noch unsere Bestrebungen und aktiven Beteiligungen in Deutschland zu erwähnen, und hier ganz speziell in Baden-Württemberg, ein Netzwerk/ Cluster im Bereich Umwelttechnik/ Luftreinhaltung aufzubauen. Hierzu sind wir seit Jahren im Europäischen Filterkonsortium am KIT beteiligt. Aber auch unsere aktive Tätigkeit im Beirat der Plattform Umwelttechnik unter der Führung des LVI kann das verdeutlichen. Daneben sind wir in weiteren Verbänden und Organisationen, wie z.B. dem WVIB in Freiburg, tätig um den regelmäßigen wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Austausch zu führen.

Bei diversen Publikationen in Fachzeitschriften und Vorträge z. B. beim VDI und im Haus der Technik stellt Fa. Nederman die neuen Erkenntnisse und die Umsetzung in die Praxis vor. Über das vorhandene weltweite Vertriebsnetz informiert Fa. Nederman regelmäßig die Kunden über Neuerungen an den Abgasreinigungsanlagen. Diese vorhandene Struktur wird auch für die Publikation der Erkenntnisse aus diesem Projekt genutzt.

Junker Filter GmbH - Die Projektergebnisse lassen bei industriellen Anlagen eine Reduzierung der Staubemission um 30 % und eine Verringerung des Energieverbrauchs (vorwiegend durch reduzierten Druckverlust) von 20 % erhoffen. Die Materialkosten werden sich im Vergleich zu PTFE-Membran-Filtermedien voraussichtlich um gesch. 30 - 40 % pro m² erniedrigen. Junker Filter sieht bei vielen vor allem kleinerem und mittelständigen Unternehmen großes Verbesserungspotential in Bezug auf Emissions- und Energieoptimierung, da das filtertechnische Knowhow dort häufig fehlt. Junker Filter wird also verstärkt die verbesserten Filtermedien sowie – im Verbund mit den anderen Partnern – eine verbesserte Anlagenbetriebsstrategie anbieten können. Die Messdaten aus Labor- und Industrieanlagen werden Junker Filter zudem helfen, wo nötig Angebote mit besonders niedriger Emissionsgarantie zu geben. Der Marktanteil von Junker Filter zu wachsen wird, was in der Umsatzsteigerung von etwa 5 % abgeschätzt werden kann.

KIT: Durch die Ergebnisse des Projekts wird die technische Kompetenz und Anerkennung des KIT deutlich gestärkt. Insbesondere ermöglichen die Erkenntnisse aus den Praxistests sowie die Verfügbarkeit einer Testanlage das Einwerben neuer Forschungsmittel.

9.2. Wissenschaftliche Verwertung der Ergebnisse, begleitende Öffentlichkeitsarbeit

Die Forschungsergebnisse wurden in Sitzungen der beteiligten Projektpartner, in Gruppenseminaren, auf Fachkonferenzen sowie Vertretern der Wirtschaft präsentiert und werden in naher Zukunft für Veröffentlichungen in Fachzeitschriften verwendet. Im Rahmen der Lehre verfolgten mehrere Studenten mit wissenschaftlichen Arbeiten das Forschungsthema. Mit diesen Arbeiten werden Studierende in die Thematik und in die Methodik eingeführt.

Die Forschungsstelle ist weiterhin Mitglied im Europäischen Konsortium für Filtertechnik und sorgte auf diesem Wege ebenfalls für eine rasche und gezielte Verbreitung der gewonnenen Erkenntnisse unter den beteiligten Firmen.

Es wurden bereits durchgeführt:

- Wissenschaftliche Präsentation auf Kongressen und Fachvorträgen (Processnet Fachausschuss Gasreinigung 2011, World Filtration Congress 2012, Semanr zu aktuellen Fragen der Mechanischen Verfahrenstechnik)
- Einbeziehung in die Lehre (Vorlesung Gas-Partikel-Trenntechnik, Vorlesung Gas Cleaning)
- Verwertung der Forschungsergebnisse durch die Mitglieder des Europäischen Konsortiums Filtertechnik am KIT (BASF, Bayer Technologies, Bühler, BWF Envirotec, Nederman, Evonik Fibers, Fisia Babcock, Junker-Filter, Heimbach Filtration). Zwischen den Mitgliedern und dem Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik besteht ein reger Technologie-Austausch, in dem einerseits Praxisprobleme angesprochen, andererseits neueste Forschungsergebnisse zur Abreinigungsfiltertechnik mitgeteilt, im Hinblick auf Praxisrelevanz diskutiert und den Mitgliedern zur (freien) Verwertung überlassen werden.

Es sind weiterhin geplant:

- Weitere wissenschaftliche Publikationen der Ergebnisse in Fachzeitschriften (Powder Technology, Filtration & Separation) sowie Kongressen und in Fachvorträgen (Filtech, Partec, AFS)
- Einbeziehung in den Industriekurs Filtertechnik

10. Arbeitsteilung und Zusammenarbeit

Die Zusammenarbeit innerhalb des Projektes erfolgte durch regelmäßige Besprechungen vor Ort durch die beteiligten Projektpartner. Die Messkampagnen wurden gemeinsam geplant und von bearbeitet. Von jedem Projektpartner wurde hierzu ein Mitarbeiter als Ansprechperson designiert.

Die Zusammenarbeit mit Herrn Prof. Schulteß erwies sich aufgrund schwerer persönlicher Umstände und der Verzögerung der Messkampagne als schwierig. Herr Schulteß brachte sich jedoch stets beratend in das Projekt ein.

11. Notwendigkeit der Zuwendung

Die für das Projekt geleistete Arbeit war notwendig und angemessen. Es wurden regelmäßig Treffen der beteiligten Projektpartner durchgeführt. Es sind von keinem der Partner EU-Mittel beantragt worden. Das Vorhaben wurde bei keinem der Partner über andere ähnliche Programme, wie z.B. die "Europäische Territoriale Zusammenarbeit (ETZ)" oder MEPL-II- Maßnahmen gefördert.