



forschen.
vernetzen.
anwenden.

Innovationsreport 2023

Industrielle Gemeinschaftsforschung

IGF-Forschungsvorhaben 21283 N

Praxisnahe Labortests mobiler Entstaubungssysteme mit abreinigbaren Filtern

Laufzeit:

01.11.2020 – 31.03.2023

Beteiligte Forschungsstelle(n):

Universität Duisburg-Essen
Institut für Verbrennung und Gasdynamik
Lehrstuhl Nanopartikel-Prozeßtechnologie NPPT

Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik e.V. (IUTA)
Forschungsabteilung Luftreinhalteung & Gasreinigung

iuta.de

Schlussbericht vom 30.06.2023

zu IGF-Vorhaben Nr. 21283 N

Thema

Praxisnahe Labortests mobiler Entstaubungssysteme mit abreinigbaren Filtern

Berichtszeitraum

01.11.2020 - 31.03.2023

Forschungsvereinigung

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

Forschungseinrichtung(en)

FE 1: Universität Duisburg-Essen (IVG; Nanopartikel-Prozesstechnik)

FE2: Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik e.V. (IUTA)

Forschungseinrichtungen

- 1 Universität Duisburg-Essen, Institut für Verbrennung und Gasdynamik
Lehrstuhl Nanopartikel-Prozesstechnik
Lotharstraße 1
47057 Duisburg

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

Inhalt

1	Thema	4
2	Zusammenfassung	4
3	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	5
3.1	Ausgangssituation	5
3.2	Problemstellung	6
4	Forschungsziel, Lösungsweg, Umsetzung und Ergebnisse	12
4.1	Lösungsweg	12
4.2	Auswahl und Beschaffung der Staubabscheider/ AP 1 (FE 1)	13
4.3	Aufbau der Prüfvorrichtung nach Normentwurf / AP 2 (FE 1)	14
4.4	Prüfung des Abscheiders im Neuzustand / AP 3 (FE 1)	16
4.5	Beschaffung und Prüfung real gealterter Filter / AP 4 (FE 1)	41
4.6	Prüfung von Filtermedien im Neuzustand und nach Schnellalterung / AP 5 (FE 1)	49
4.7	Klassierung der PM ₁ -, PM _{2,5} - und PM ₁₀ -Abscheidegrade/ AP 6 (FE 1)	56
4.8	Modellierung des Abscheideverhaltens und des Abreinigungszyklus / AP 7 (FE 2)	62
4.9	Herleitung einer Prüfmethode zur Abbildung des Realverhaltens / AP 8 (FE 1)	82
5	Fazit	86
6	Verwendung der Zuwendung	88
7	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	89
8	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten	89
9	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	91
9.1	Durchgeführte Transfermaßnahmen	91
9.2	Geplante Transfermaßnahmen	93
9.3	Einschätzung der Realisierbarkeit des Transferkonzeptes	93
10	Anhang	94
10.1	Abbildungsverzeichnis	94
10.2	Tabellenverzeichnis	98
10.3	Literatur- und Quellenverzeichnis	99

1 Thema

Praxisnahe Labortests mobiler Entstaubungssysteme mit abreinigbaren Filtern

2 Zusammenfassung

Mobile Entstaubungssysteme mit integriertem Ventilator werden seit langer Zeit eingesetzt, um hohe Staubkonzentrationen am Arbeitsplatz zu reduzieren. Im Fall der Schweißrauchabsaugung waren mit der DIN EN ISO 15012 Teil 1-4 [1] normative Prüfprozeduren auf internationaler Ebene festgelegt. Diese Normenreihe wurde umstrukturiert und läuft nun unter der Nummer DIN EN ISO 21904. Für andere Absaugsysteme ist dies bislang noch nicht geschehen, und soll national durch den DIN-Normenausschuss Maschinenbau (NAM) - Arbeitsausschuss Luftfilter (SpA) bzw. international im Rahmen eines „New work item proposal“ (PWI) ([2], [3]) erfolgen. Problematisch ist dabei insbesondere die Festlegung auf eine einheitliche Prüfprozedur für alle unterschiedlichen Bauarten und -formen von Absaugsystemen.

An diesem Punkt setzt das hier beschriebene Projekt an: Ziel des Vorhabens ist es, basierend auf experimentellen Ergebnissen sowie einer Simulation zum Strömungsverhalten die beschleunigte Alterung von mobilen Entstaubungsanlagen im Labor zu untersuchen und somit eine Grundlage für kommende Normtests zu schaffen.

Es konnte anhand eines mobilen Entstaubers gezeigt werden, dass eine Alterung der Filter anhand der hier getesteten Prüfprozedur stattgefunden hat. Es zeigten sich zwar Unterschiede zu real gealterten Filtern, jedoch ließen diese sich auf die verschiedenen Stäube, welche zur Alterung genutzt wurden, zurückführen. Durch die numerische Berechnung von Druck, Geschwindigkeit und Partikelabscheidung im Rohgasraum konnte gezeigt werden, dass die Filterpatronen über der Höhe ungleichmäßig beladen werden. Verschiedene Variationsrechnungen wurden durchgeführt, wobei die Variation der Geometrie mit zwei Einlässen als einzige zu einer gleichförmigeren Beladung der Filterpatronen führte.

Die in diesem Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse werden die Wettbewerbsfähigkeit insbesondere kleiner und mittlerer Filterhersteller steigern, da sie ihre Produkte gezielter auslegen und weiterentwickeln können. Auch Anwender der abreinigbaren Filter profitieren durch besser vergleichbare Daten bei der Auswahl eines mobilen Entstaubungssystems.

3 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

3.1 Ausgangssituation

Wegen der flexiblen Einsetzbarkeit und einfachen Handhabung werden mobile Entstaubungssysteme mit abreinigbaren Filtern häufig verwendet, um hohe Partikelbelastungen an mobilen Arbeitsplätzen zu reduzieren und die Partikel aus der Raumluft zu entfernen. Das Leistungsvermögen des Entstaubungssystems hängt dabei von vielen Faktoren ab: dem verwendeten Filterelement, den Staub- und Trägergaseigenschaften, der Betriebsmethode und -dauer. Die Größe und Bauform basiert maßgeblich auf dem Absaugvolumenstrom sowie der Staubkonzentration. Staubabscheider verschiedener Hersteller unterscheiden sich somit konstruktionsbedingt in ihrer Abscheideleistung.

Da mobile Staubabscheider als flexibles System hergestellt werden, benötigen Anwender keine speziellen Kenntnisse über die Filtration bzw. das Entstaubungssystem. Der Benutzer wählt ein solches System basierend auf den Herstellerangaben im Abgleich mit seinem Bedarf aus. Zwar bewerten einige Hersteller die Leistung ihrer Produkte im simulierten Dauerzustand anhand eigener Kriterien, jedoch ist eine Vergleichbarkeit dieser Ergebnisse unter verschiedenen Herstellern nicht gewährleistet. Des Weiteren ist die Effizienz der Abscheider nach Herstellertests nicht mit der unter realen Bedingungen vergleichbar und ändert sich nicht nur mit der Betriebszeit, sondern ist ferner abhängig vom Teststaub, der Staubkonzentration und weiteren Einflüssen.

Um dem Nutzer dieser Abscheidesysteme einheitliche Bewertungskriterien an die Hand zu geben, ist der Normentwurf ISO/PWI 16313-2 [3] erstellt worden. Zielsetzung war es, ein Prüfschema festzulegen, um die Leistung von Entstaubungssystemen mit integriertem Ventilator und abreinigbaren Filtern nach langer Einsatzzeit bereits im Vorfeld bewerten und unter verschiedenen Herstellern vergleichen zu können. In der Prüfung nach Normentwurf sollten Leistungsdaten, wie Systemdruckverlust, Gasdurchsatz, Energieverbrauch des Systems und die Partikelemission aus dem System nach beschleunigter Alterung ermittelt werden. Das Prüfverfahren beinhaltete die Anlagerung von Reststaub im Filtermedium durch Wiederholung der Kurzzeit-Impulsreinigung bei gleichzeitiger Staubzufuhr. Da auch die Filterwirkungsgrade (oder

Emissionen) von PM₁, PM_{2,5}, PM₁₀ weitere wichtige Leistungsmerkmale des Systems sind, sollten diese optional ermittelt und ausgewiesen werden können. Inzwischen ist der Normentwurf zurückgezogen worden, da sich das Gremium nicht auf eine einheitliche Prüfprozedur für alle unterschiedlichen Bauarten und -formen einigen konnte.

An diesem Punkt soll das hier beschriebene Projektvorhaben ansetzen: Ziel des Vorhabens ist es, die beschleunigte Alterung von mobilen Entstaubungsanlagen im Labor zu untersuchen und somit eine Grundlage für kommende Normtests oder technische Regeln in Anlehnung an die ISO/PWI 16313-2 [3] zu schaffen. Dabei soll unter anderem ermittelt werden, wie möglichst schnell ein stabiler Zustand des Systems, also ein konstanter Restdruckverlust nach Reinigung, erreicht werden kann. Auch ein Abgleich mit Filtermedien ist vorgesehen, um die Frage zu beantworten, ob Prognosen zum Langzeitverhalten auch schon anhand günstigerer Medientests möglich sind. Abschließend soll eine Empfehlung gegeben werden, wie das Realverhalten von mobilen Entstaubern durch Laborversuche prognostiziert werden kann. Da bislang keine Forschungsaktivitäten zu der ISO/PWI 16313-1 [2] bekannt sind, schafft diese Prüfmethode die Grundlage für beide Teile des ISO/PWI 16313 ([2], [3]), da sie mit einigen Änderungen auch auf Systeme mit externen Ventilatoren übertragen werden kann.

3.2 Problemstellung

Bei spanender Bearbeitung von Werkstoffen entstehen Späne und Stäube. Die Stäube vieler Werkstoffe können, wenn sie eingeatmet werden, die Gesundheit des Menschen schädigen (z. B. Allergien oder Krebs verursachen) oder in aufgewirbeltem Zustand mit der umgebenden Luft explosionsfähige Staub-Luft-Gemische bilden [4].

Die aktuell gültigen Arbeitsplatzgrenzwerte mit Schichtmittelwerten und den dazugehörigen Kurzzeitwerten können den Technischen Richtlinien für Gefahrstoffe TRGS 900 [5] entnommen werden. Für den Umgang mit Erzeugnissen, die aus hergestellten Nanomaterialien bestehen bzw. solche enthalten, gibt es die TRGS 527 [6]. Nicht berücksichtigt werden dabei jedoch Nanopartikel, die natürlich vorkommen oder bei einem Prozess entstehen und aufgrund ihrer Alveolengängigkeit als gesundheitsschädlich gelten. Untersuchungen zur Freisetzung von Nanopartikeln aus unterschiedlichen Bearbeitungsschritten wie Schleifen und Bohren wurden beispielsweise in dem

MARINA-Projekt durchgeführt [7]. Expositionsmessungen und die Bewertung von Industriearbeitsplätzen, an denen Nanopartikel freigesetzt werden, die gesundheitliche Beschwerden hervorrufen können, wurden erst vor rund 20 Jahren durchgeführt ([8], [9]). Stäube mit Inhaltsstoffen wie Blei, Cadmium, Arsen, Nickel oder polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (Benzo(a)pyren sowie Sulfate und Nitrate) sind außerdem schädlich für die Umwelt. Besonders gefährlich sind faserförmige Stäube wie Asbest aufgrund ihrer krebserzeugenden Eigenschaften [10]. Asbest selbst darf seit langem nicht mehr eingesetzt werden, aber auch die Einschätzung von Fasern aus mineralischem Dämmmaterial hat sich deutlich geändert. Des Weiteren können Späne und Stäube die Arbeitsumgebung verschmutzen und das Arbeitsergebnis, das heißt die Produktqualität, beeinträchtigen.

Stäube aus dem Produktionsbetrieb müssen daher bestmöglich erfasst und ordnungsgemäß entsorgt werden. Grundsätzlich gilt: je größer die Gesundheitsgefahr eines Staubes ist, desto wirkungsvoller muss die Abscheideleistung des Entstaubers sein [4]. Am wirkungsvollsten ist dabei die Absaugung an der Entstehungsstelle (brennerintegrierte Absaugung, mobile oder stationäre Absauganlagen) ([11], [12]).

Die Leistungsfähigkeit des Entstaubers/Staubsaugers hängt laut DGUV Info 209-084 [4] unter anderem ab von:

- der Staubsammeleinrichtung (Papierfiltertüte, Vlies, Entnahmesäcke)
- dem Hauptfilter (Art des Materials, Größe der Filterfläche)
- dem Abreinigungsmechanismus des Hauptfilters (wenn vorhanden)
- dem maximalen Volumenstrom
- dem maximalen Unterdruck
- der Größe des Staubsammelbehälters

Laut BGI 5121 „Arbeitsplatzbelüftung“ [13] haben filternde Abscheider die größte Verbreitung und nehmen an Bedeutung zu, weil mit modernen Filtermedien und Abreinigungsanlagen durchweg Abscheidegrade über 99 % bzw. von der Staubbelastung nahezu unabhängige Reststaubgehalte weit unter 1 mg/m³ erreicht werden können. Die Anwendungsbereiche der mobilen Entstaubungssysteme, die meist innerhalb von Werkhallen verwendet werden, sind sehr unterschiedlich. Dementsprechend unterschiedlich ist auch die jeweilige Ausführung der Geräte. In der nachfolgenden Abbildung sind Ausführungsbeispiele für mobile Entstaubungssysteme dargestellt: ein

Schweißrauchfilter der Firma ILT Industrie-Luftfiltertechnik GmbH [14] und ein Speicherfiltergerät bzw. Patronenfiltergerät der Firma ULT Umwelt-Lufttechnik AG [15].

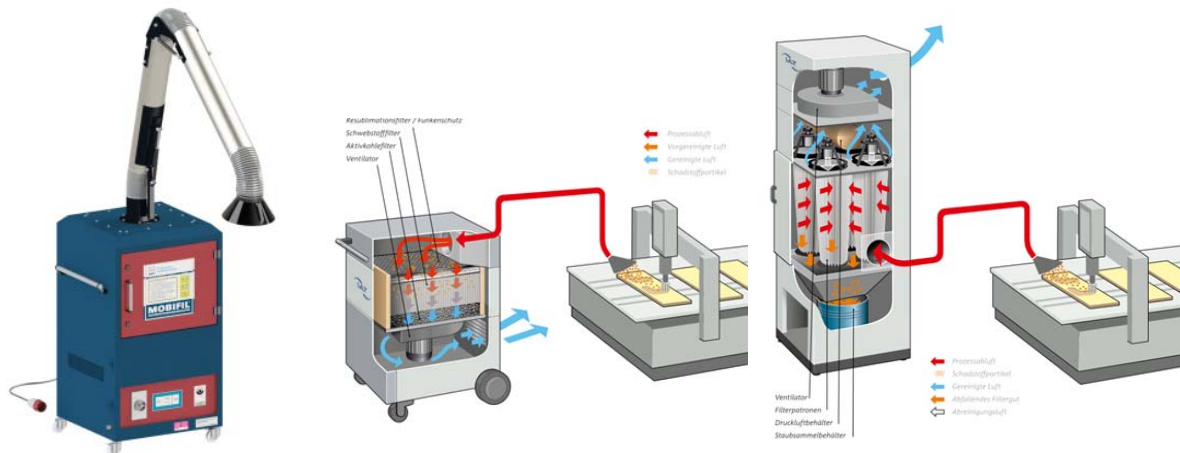


Abbildung 3-1: Unterschiedliche Ausführung mobiler Entstaubungssysteme ([14], [15])

Industrielle Staubsauger und mobile Entstauber werden nach DIN EN 60335-2-69 [16] hinsichtlich ihres Abscheidegrades nach Staubklassen eingeteilt:

Tabelle 3-1: Einteilung der industriellen Staubsauger und mobilen Entstauber nach DIN EN 60335-2-69

Klasse	Gefährlichkeit des Staubes	Abscheidegrad
L (Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) > 1 mg/m ³)	Leicht	99%
M (AGW ≥ 0,1 mg/m ³)	Mittel	99,9%
H (AGW < 0,1 mg/m ³) und krebserzeugende Gefahrstoffe	Hoch	99,995%

Nicht alle Mobilentstauber einer Staubklasse sind für die Erfassung bestimmter Stäube geeignet. So haben sich bspw. zweistufige Mobilentstauber mit Papierfiltertüten bei mineralischen Stäuben als nachteilig erwiesen, da durch den Feinstaubanteil im erfassten Staub schon nach kurzer Zeit die Oberfläche der Filtertüte sehr dicht belegt und dadurch die Saugleistung des Entstaubers deutlich reduziert wird. Zur Aufrechterhaltung der Saugleistung muss bei hohem Staubanfall alle 10 bis 20 Minuten die Filtertüte gewechselt werden [13].

Bei filternden Abscheidern wird nach BGI 5121 „Arbeitsplatzbelüftung“ [13] unterschieden zwischen:

- Nicht abreinigbare Filter zum Abscheiden geringer Partikelkonzentrationen aus Umgebungsluft (unter 5 mg/m^3) oder Prozessgasen (unter etwa 20 mg/m^3), die als Speicherfilter ohne Abreinigung nach Erreichen des vorgegebenen Druckverlustes ausgetauscht werden müssen. Sie sind zur Abscheidung von Partikeln und Tröpfchen geeignet.
- Abreinigbare Filter zum Abscheiden höherer Partikelkonzentrationen aus industrieller Abluft oder zur Produktabscheidung, die mit einem Abreinigungssystem für weitgehend konstanten Druckverlust ausgestattet sind. Sie werden im Wesentlichen zur Abscheidung trockener Partikel eingesetzt. Bei flüssigen und klebrigen Partikeln ist die geringere Abreinigbarkeit des Filtermediums zu beachten.

Bei abreinigbaren Filtern ist das mit Abstand am häufigsten eingesetzte Verfahren, die so genannte Druckluftimpulsabreinigung, bei der die Filterelemente zeitabhängig oder differenzdruckgeregelt durch ventilgesteuerte Druckstöße von 2 bis 7 bar Druck in der dem Luftstrom entgegengesetzten Richtung abgereinigt werden [13].

Die entscheidende Projektierungsgröße bei der Auslegung ist die Filtrationsgeschwindigkeit, mit der der zu reinigende Luftstrom durch das Filtermedium strömt. Sie ist dann nicht zu hoch gewählt (ausreichend dimensioniert), wenn sich im Betrieb ein weitgehend konstanter Druckverlust und damit Luftvolumenstrom einstellt. Sie ist ferner ausschlaggebend für Abscheidegrad, Standzeit, Baugröße sowie Investitions- und Betriebskosten filternder Abscheider [13].

Die Anströmgeschwindigkeiten des Filtermediums betragen üblicherweise 1 cm/s bis 10 cm/s bei einem Druckverlust zwischen 500 Pa und 2000 Pa . Die Standzeit moderner Filtermedien beträgt bei richtiger Auslegung durchweg mehrere Jahre [13]. Die gefilterte Luft darf grundsätzlich wieder in den Arbeitsraum zurückgeführt werden. Entstehen jedoch beim Schweißen krebserzeugende Stoffe, darf die gefilterte Luft nur zurückgeführt werden, wenn entweder ein geprüftes Gerät der Schweißrauchabscheideklasse W2 oder W3 verwendet wird oder eine Genehmigung der staatlichen Arbeitsschutzbehörde vorliegt [11]. Die Auswahl eines geeigneten Abscheidesystems und seine richtige Auslegung sind für den Betreiber ohne spezielle Erfahrung meist

schwierig, zumal in der betrieblichen Praxis kaum Gelegenheit besteht, verschiedene Systeme unter denselben Bedingungen zu vergleichen [13].

2001 veröffentlichte der Lehrstuhl und das Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart den Abschlussbericht zu dem AIF-Projekt 12311 „Auslegung von Absaughauben bezüglich der Späneerfassung durch Simulationsrechnung“ [17]. Ziel des Projektes war, die Funktion und den Wirkungsgrad von Absaughauben vor Inbetriebnahme berechnen und abschätzen zu können.

Strömungstechnische Simulationsrechnungen (Computational Fluid Dynamics, CFD) werden zur Analyse und Optimierung der unterschiedlichsten Entstaubungssysteme eingesetzt. So berechneten Schrooten et al. [18] mittels CFD-Simulationen den Ist-Zustand einer Schlauchfilteranlage und optimierten die Strömungsverteilung durch eine individuelle, gezielte Strömungsführung. Der linke Konturplot in Abbildung 3-2 zeigt die ausgesprochen schlechte Strömungsverteilung im Schlauchfilter vor der Optimierung. Durch den Einbau verschiedener Leit- und Lamellenbleche konnte die Anströmung der Filterelemente vergleichmäßigt werden (rechter Konturplot).

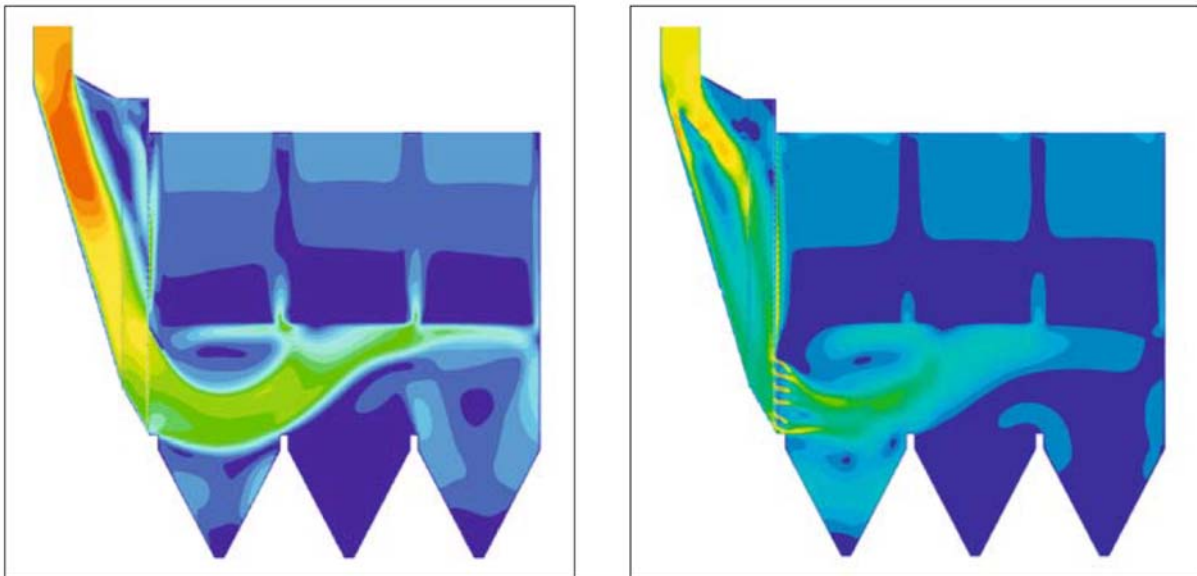


Abbildung 3-2: Geschwindigkeitsprofil in einer Schlauchfilteranlage vor und nach Optimierung [18]

Veröffentlichungen zu strömungstechnischen Untersuchungen von mobilen Entstaubern wurden bei einer ausführlichen Literaturrecherche nicht gefunden. Im beantragten Vorhaben sollen CFD-Berechnungen Aufschluss darüber geben, welche Orte am stärksten von den Partikeln belastet werden und wo der Filter als erstes verblockt,

um abzuleiten, welche Regionen ausschlaggebend für den Druckverlustanstieg und somit für die Abreinigung bzw. den Austausch des Filters sind.

Unterschiedliche Arten der Absaugungen für Lötrauchemissionen wurden 2004 durch das Berufsgenossenschaftliche Institut für Arbeitsschutz [19] untersucht. Dazu wurden Messungen in einer Prüfkabine durchgeführt, um realitätsnahe reproduzierbare Randbedingungen zu kreieren. Es wurden insgesamt 10 Absauggeräte mit Hauben- und 6 mit Spitzenabsaugung untersucht. Hauptaugenmerk lag dabei auf der Rauch- und Gasmessung und Filterwägung, die Effizienz und der Druckverlust der Filter in Abhängigkeit der Beladung wurden hier nicht betrachtet.

In dem IGF-Projekt 19163 N/1 „Effizienzsteigerung der Späneerfassung bei der spannenden Bearbeitung von Verbund- und Holzwerkstoffen sowie Kunststoffe“ der Universität Stuttgart [20] wurde ein Musterprozess zur Beurteilung von Erfassungsgraden entwickelt.

Die RWTH Aachen untersucht aktuell zusammen mit der Uniklinik der RWTH Aachen im Rahmen des AiF-Projektes 20047 N „Die Schweißrauchexpositionen beim MSG (Metall-Schutzgas)-Schweißen unter definierten, realitätsorientierten Umgebungsbedingungen“ [21]. Dabei wird die Rauchgasexposition des Schweißers für unterschiedliche Schweißprozesse untersucht und der Einfluss verschieden positionierter Absaugungen betrachtet.

Die meisten wissenschaftlichen Untersuchungen behandeln die Erfassung der Stäube und Späne an der Absaughaube, Veröffentlichungen zu dem Wirkungsgrad von mobilen Entstaubern im Ganzen wurden bei einer ausführlichen Literaturrecherche nicht gefunden.

4 Forschungsziel, Lösungsweg, Umsetzung und Ergebnisse

Ziel des Forschungsvorhabens war es, basierend auf wissenschaftlichen Untersuchungen zur beschleunigten Alterung von mobilen Entstaubungsanlagen folgende Fragen zu beantworten:

- Wird das reale Verhalten durch die vorgeschlagenen Prüfungen des Normentwurfs abgebildet?
- Wird der stabile Zustand des Abscheiders erreicht?
- Ergeben sich durch die in dem Normentwurf vorgeschlagenen unterschiedlichen Anordnungen des Prüfaufbaus Unterschiede im Beladungszustand und den Leistungsdaten?
- Führt eine „offline“-Abreinigung vielleicht schneller zu einem stabilen Zustand des Abscheiders?
- Wie sind die PM_{1-} , $PM_{2,5-}$ und PM_{10-} Abscheidegrade?
- Ist eine Übertragbarkeit von Medientests gegeben, so dass Vorhersagen anhand dieser günstigeren Prüfungen getroffen werden können?

4.1 Lösungsweg

Zur Beantwortung dieser Fragen waren Laboruntersuchungen an Staubabscheidern notwendig. Das Vorhaben umfasste 8 übergeordnete Arbeitspakete (AP 1 - 8). Zunächst wurden mobile Entstauber mit den jeweiligen Filtern und Filtermedien von den Mitgliedern des PA zur Verfügung gestellt bzw. zugekauft (AP 1) und die Prüfvorrichtung aufgebaut (AP 2), in der anschließend die Abscheider vermessen wurden (AP 3). Zum Abgleich wurden real gealterte Filterelemente besorgt (AP 4) und Medientests durchgeführt (AP 5). Eine anschließende Klassierung nach DIN EN ISO 16890 sollte Aufschluss über den Einfluss der künstlichen Alterung auf die ePM_x Klassen geben (AP 6). Zusätzlich sollte eine Modellierung der Strömungssituation und der Partikelabscheidung stattfinden (AP 7). Auf Basis aller experimentellen und theoretischen Ergebnisse sollte abschließend eine Prüfmethode entwickelt werden, die das reale Verhalten der Filter durch Labortests abbilden kann (AP 8). Die einzelnen Bearbeitungsschritte sind in Abbildung 4-1 grafisch dargestellt.

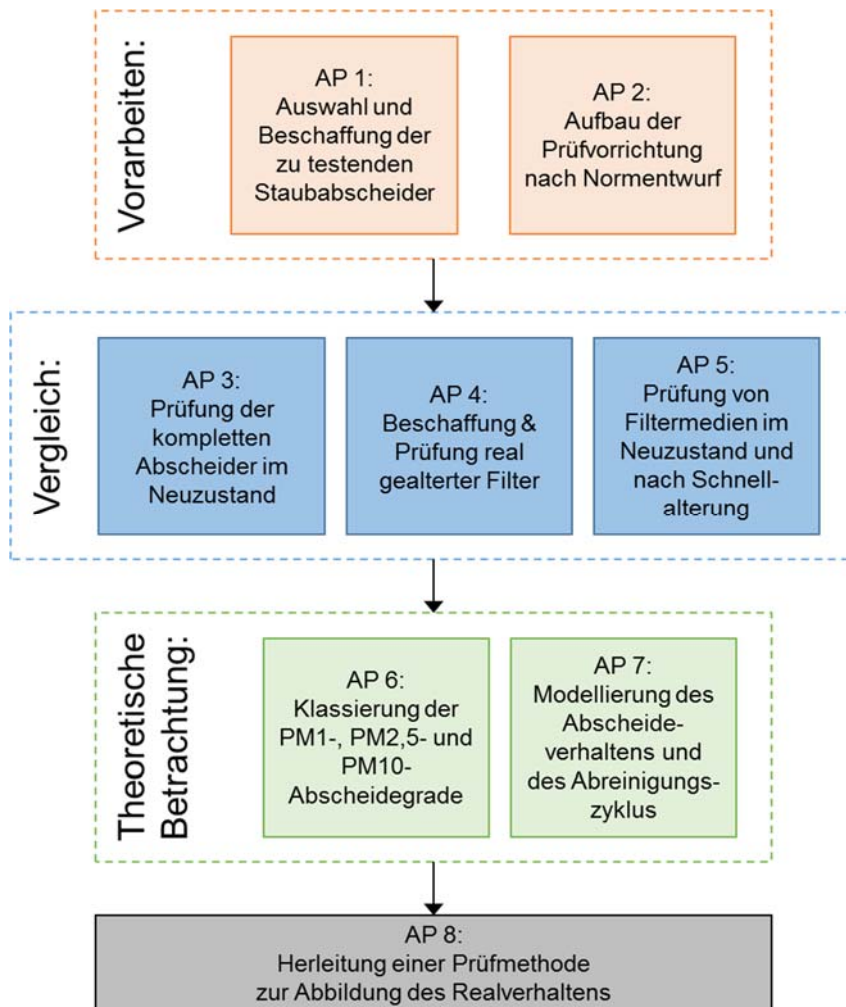


Abbildung 4-1: Grafische Darstellung der Arbeitspakete

4.2 Auswahl und Beschaffung der Staubabscheider/ AP 1 (FE 1)

Die Ausführung von mobilen Entstaubungssystemen variiert je nach Anwendungsbereich. Dabei unterscheiden sich der generelle Aufbau, der Volumenstrom, der Abreinigungsmechanismus (wenn vorhanden) oder auch Größe und Material des Hauptfilters. Um ein breites Spektrum der am Markt vertretenen Modelle abzubilden, wurden einige mobile Entstaubungssysteme detailliert verglichen. Somit sollte gewährleistet werden, dass die, in diesem Projekt entstandene, Alterungsprozedur für die verschiedensten Staubabscheider geeignet ist.

Untersucht wurden hierbei zwei mobile Entstaubungssysteme, welche durch Mitglieder des Projektausschusses zur Verfügung gestellt wurden. Der erste Entstauber ist der Entstauber A. Dieser wird unter anderem für die Schweißrauchabsaugung genutzt. Der Entstauber A besitzt mit 2 x 12 m² eine im Vergleich zu den meisten mobilen

Entstaubern große Filterfläche. Zusätzlich repräsentiert dieser Entstauber mit einem maximalen Luftstrom von 3300 m³/h die leistungsstärkeren mobilen Entstaubungssysteme.

Beim zweiten Entstauber handelt es sich um den Entstauber B, welcher typischerweise als Absauganlage für Laserrrauch verwendet wird. Interessant bei diesem Gerät ist die für mobile Entstauber große Gesamtfläche des H14 HEPA-Hauptfilters (4 x 4,5 m²) bei vergleichsweise geringem Nennvolumenstrom (860 m³/h; 2800 Pa).

Beide Geräte nutzen zur Reinigung und Verlängerung der Lebensdauer der Filterpatronen die Methode der differenzdruckgesteuerten Jet-Pulse Filterabreinigung. Hierbei wird bei Erreichen einer vorher eingestellten Druckdifferenz der Filterkuchen während des Betriebs durch einen reingasseitigen Druckluftimpuls abgetragen. Dieser abgetragene Staub wird in einem Staubsammelbehälter angehäuft.

4.3 Aufbau der Prüfvorrichtung nach Normentwurf / AP 2 (FE 1)

Zur Gewährleistung von gleichbleibenden Versuchsbedingungen und zum Schutz von Laborgeräten und -personal wurden die Schnellalterungsversuche innerhalb einer Prüfkabine durchgeführt. Die Konstruktion erfolgte auf Basis der DIN EN ISO 21904-2 [22] und ist schematisch in Abbildung 4-2 dargestellt. Die angesaugte Raumluft wird mit Hilfe des Staubdispergierers (SAG 420, Topas GmbH) beladen und durch den Rohluft-Messkanal direkt in die Abscheideeinrichtung geführt. Beim SAG 420 handelt es sich um einen Banddosierer, welcher sich für die Erzeugung von hohen Staubkonzentrationen eignet. Zur Beladung der Filter wird ein Dolomitstaub der Firma Kremer Pigmente GmbH & Co. KG mit einem mittleren Partikeldurchmesser von 10 µm genutzt. Die durch den Abscheider gereinigte Luft wird im nächsten Schritt in die Prüfkammer geleitet, in der sie mit dem Feinstaubmessgerät (Fidas® 200 S, Palas GmbH) vermessen wird. Das Fidas® 200 S ist ein Aerosolspektrometer, das kontinuierlich die Partikelanzahlkonzentration C_n und die -größenverteilung bestimmt. Die Partikelanzahl berechnet das Gerät anhand von Streulichtimpulsen. Diese entstehen durch das homogene Ausleuchten der Partikel durch eine polychromatische LED-Lichtquelle. Zusätzlich werden die Massenkonzentrationen PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_{10} und PM_{tot} berechnet. Aufgezeichnet werden Lufttemperatur, -druck und -feuchte.

Aus der Prüfkammer wird Luft mit Hilfe eines Ventilators in das Labor geleitet. Dem Ventilator ist ein HEPA-Filter vor- und nachgeschaltet, um den Reststaub zu reduzieren.

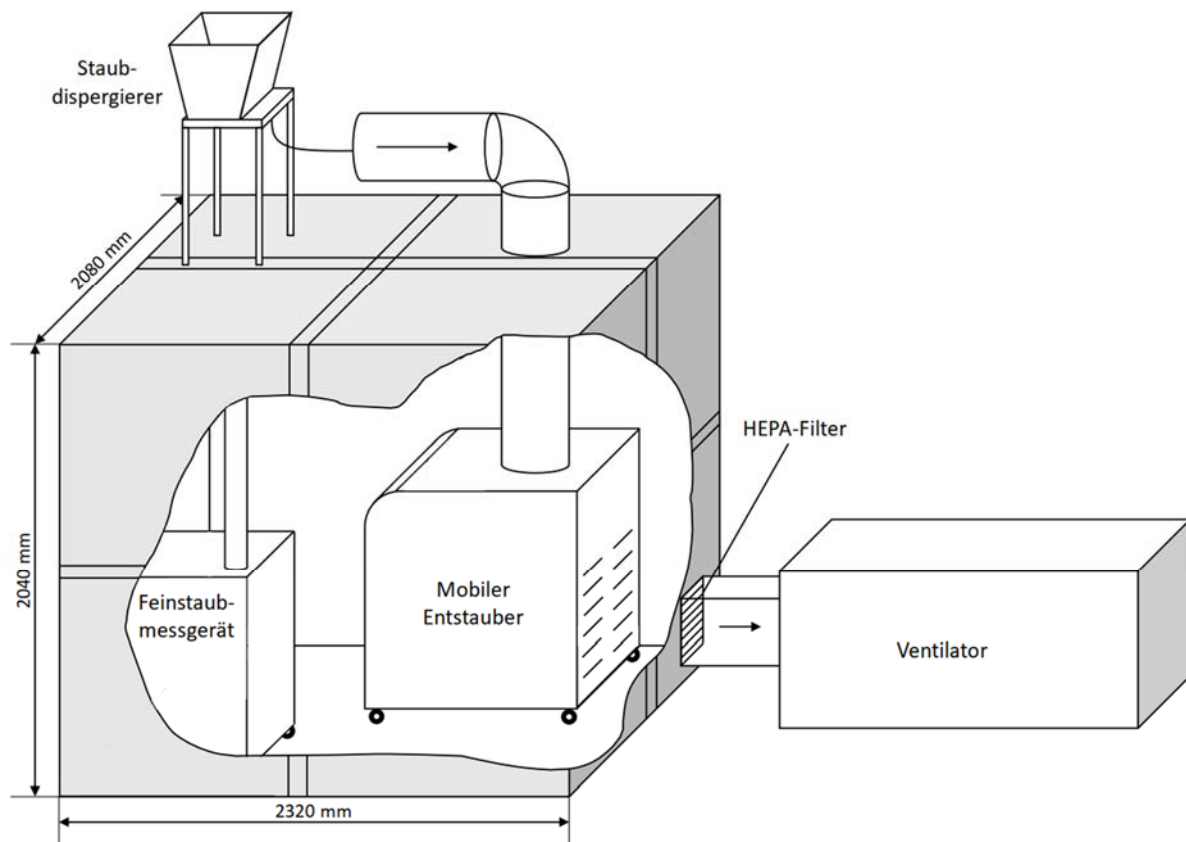


Abbildung 4-2: Schemabild Prüfkammer in Anlehnung an Prüfkabine aus DIN EN ISO 21904-2 [22]

Aufgrund der Bedenken über die Genauigkeit der Messungen innerhalb der Prüfkammer, wurde eine Änderung an dieser durchgeführt. Diese Änderung ist in Abbildung 4-3 zu sehen. Dabei wurde das Feinstaubmessgerät außerhalb der Prüfkammer positioniert. Außerdem findet die Messung der Partikelkonzentrationen nun im Abluftrohr statt. Zur isokinetischen Erfassung der Partikel wurde ein passendes Probenahmerohr im Abluftrohr befestigt.

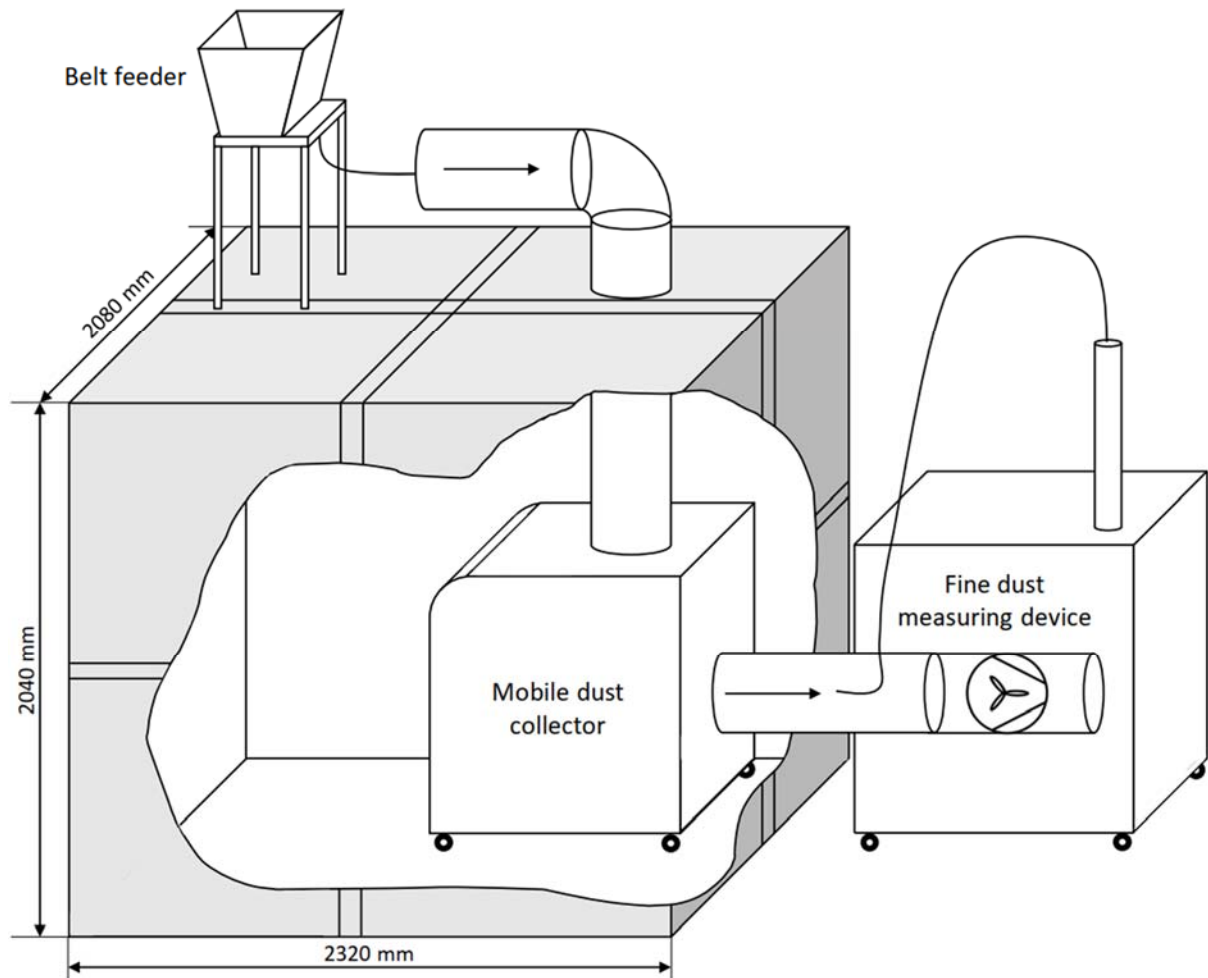


Abbildung 4-3: Geänderte Prüfkammer

4.4 Prüfung des Abscheiders im Neuzustand / AP 3 (FE 1)

Um die Eignung der Prüfkammer zu untersuchen, sind Vorversuche mit einem handelsüblichen Raumlufreiniger durchgeführt worden. Bei diesen Vorversuchen wurde die Versuchsdurchführung leicht abgeändert und die beladene Luft direkt in die Prüfkammer eingeleitet. Als Staubdispersierer wurde für die Vorversuche der Rundbürstengenerator (RBG 1000, Palas GmbH) verwendet. Dieser wurde mit 5 g A2 fine quarzfrei Prüfstaub der Firma DMT GmbH & Co. KG gefüllt. Die beladene Luft wurde durch einen am Dispersierer angeschlossenen Schlauch direkt in die Prüfkammer geleitet, in welcher der Fidas 200 S im Wetterschutzgehäuse und der Raumlufreiniger (Philips AC2887) platziert waren.

Zunächst wurden Versuche zum Sedimentationsverhalten des Staubs in der Prüfkammer durchgeführt. Hierfür wurde der Raumlufreiniger nach der Zuführung der

beladenen Luft in die Prüfkammer nicht eingeschaltet und die Reduzierung der Partikelanzahl- und Massenkonzentration mit dem Feinstaubmessgerät aufgezeichnet. Dieser Versuch wurde insgesamt drei Mal durchgeführt, wobei die Prüfkammer vor bzw. nach jedem Versuch vom Staub gereinigt wurde, um identische Startbedingungen zu gewährleisten.

Die Verläufe der Partikelanzahl- und Massenkonzentrationen sind in Abbildung 4-4 dargestellt. Die Verläufe beginnen vor der Beladung der Luft in der Prüfkammer. Die Beladung startet nach 180 Sekunden durch die beginnende Staubzufuhr. Die Dispergierung der 5 g A2 Staub dauert 540 Sekunden an. Ab diesem Zeitpunkt nehmen die Partikelanzahl- und Massenkonzentrationen nicht mehr zu, womit die Sedimentation für den weiteren Verlauf der Konzentrationen ausschlaggebend ist. Die Konzentrationen nehmen mit der Zeit exponentiell ab.

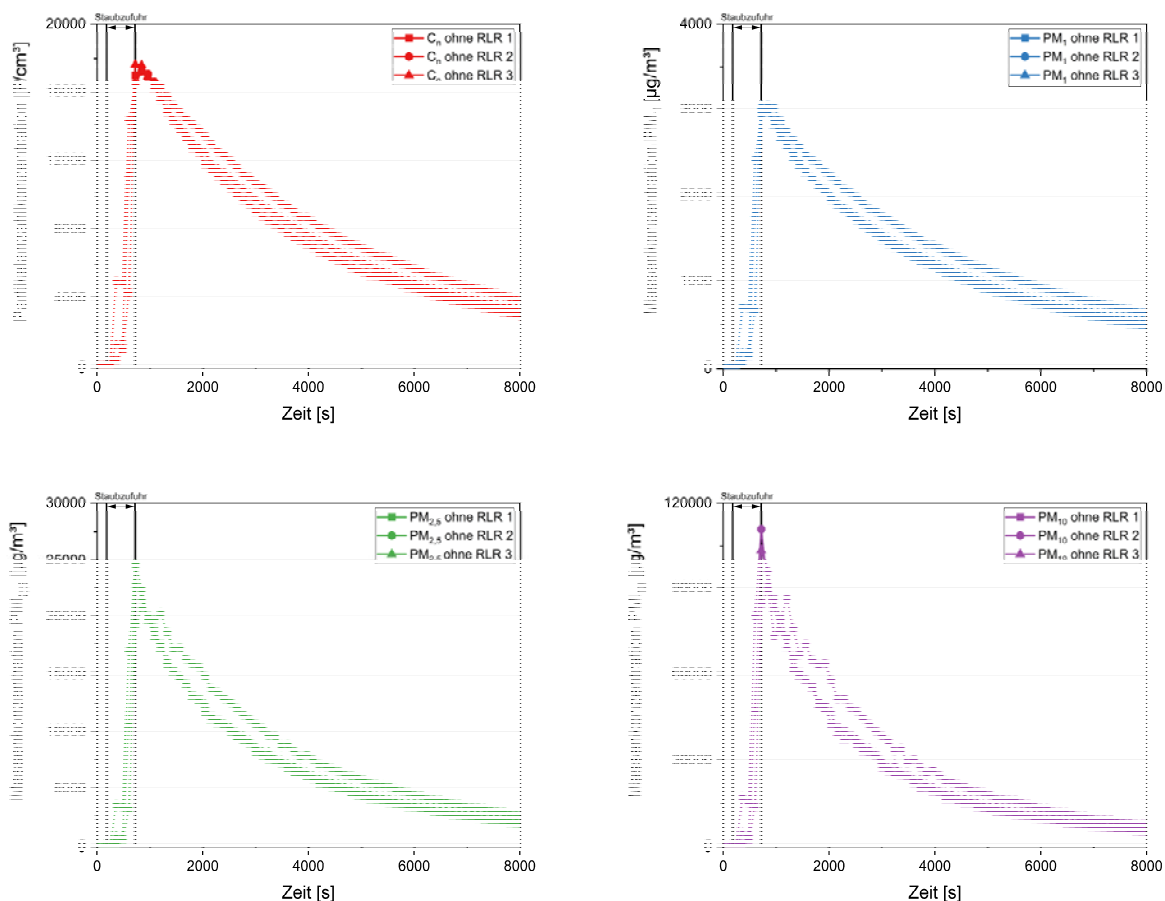


Abbildung 4-4: Partikelanzahl- bzw. Massenkonzentration nach Beladung der Prüfkammer mit 5 g A2 Staub

Abbildung 4-5 zeigt die aus den drei Versuchen gemittelten Verläufe der Massenkonzentrationen PM_{10} , $PM_{2,5}$ und PM_{10} . Um die Verläufe untereinander vergleichen zu

können, wurden diese auf ihren jeweiligen maximalen Wert normiert. Dabei ist zu sehen, dass die Massenkonzentration mit steigender Masse schneller abnimmt. Dies lässt sich anhand der Formel der Sinkgeschwindigkeit w_{sSt} für Partikel im ruhenden Fluid (Stokesbereich) erklären, welche sich aus dem Kräftegleichgewicht am einzelnen Partikel herleiten lässt.

$$w_{sSt} = \frac{\rho_p - \rho_f}{18\eta} \cdot g \cdot d^2 \quad (1)$$

Da die Dichtedifferenz $\rho_p - \rho_f$, die dynamische Viskosität η und die Gravitationsbeschleunigung g für die Partikel in diesem Fall konstant sind, ist der Partikeldurchmesser d für die unterschiedlichen Sedimentationsgeschwindigkeiten verantwortlich.

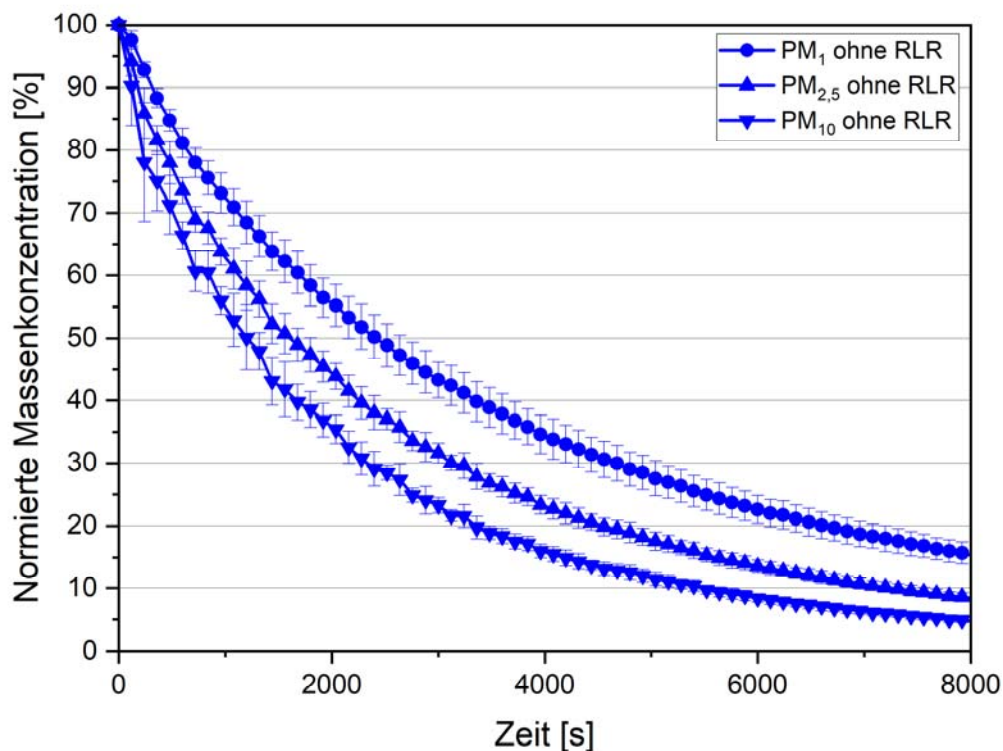


Abbildung 4-5: Normierte Massenkonzentrationsverläufe

Im Anschluss an die Untersuchung des Sedimentationsverhaltens des Staubes wurden Versuche mit dem Raumlufreiniger durchgeführt. Hierfür wurde, wie in den vorherigen Versuchen, 5 g A2 Staub der Firma DMT GmbH & Co. KG dispergiert und in die Prüfkammer geleitet. Nun wurde jedoch nach Beenden der Staubzufuhr der

Raumluftreiniger eingeschaltet und parallel die Belastung der Luft in der Prüfkammer durch den Fidas® 200 S analysiert. Der Raumluftreiniger wurde bei den Versuchen in unterschiedlichen Modi betrieben, welche variierende Ansaugleistungen aufweisen. Der Modus mit der niedrigsten Ventilationsstufe wird im weiteren Verlauf des Berichts als Modus „Stufe 1“ bezeichnet. Die höchste Ansaugleistung besitzt der Raumluftreiniger im Modus „Turbo“. Im „Automatik“ Modus wird die Ansaugleistung der Belastung der Luft angepasst.

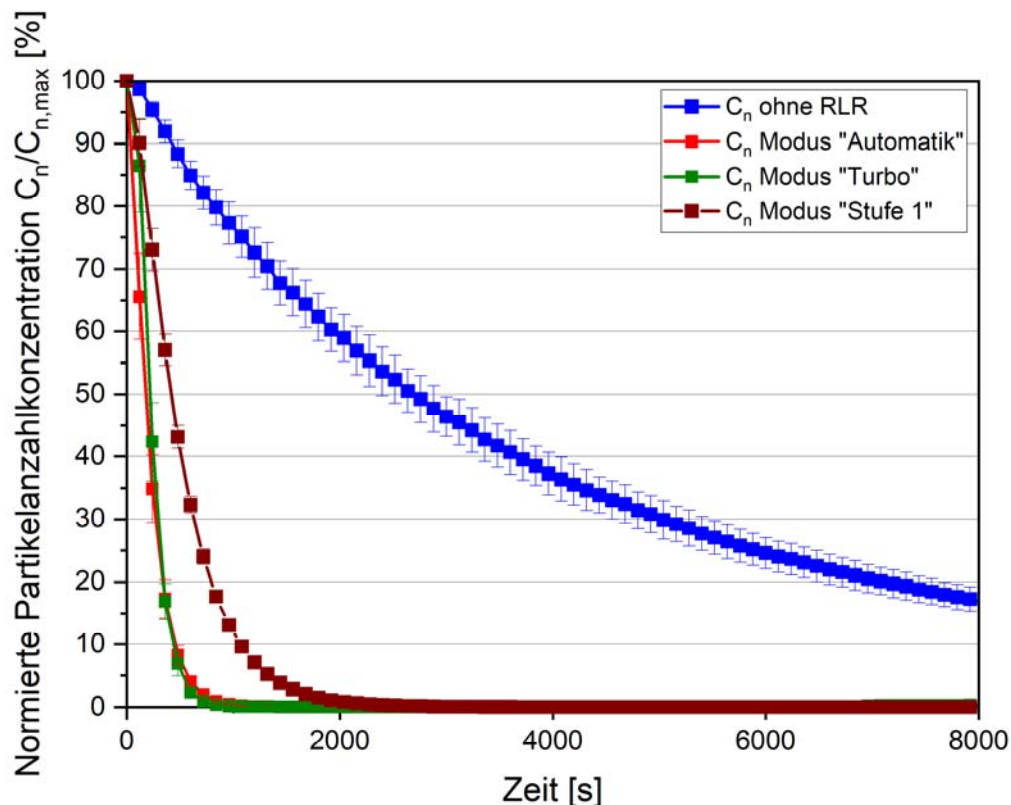


Abbildung 4-6: Normierte Partikelanzahlkonzentrationsverläufe verschiedener Modi des Raumluftreinigers (Philips AC2887)

Abbildung 4-6 zeigt die normierten Partikelanzahlkonzentrationen, welche durch das Feinstaubmessgerät aufgezeichnet wurden. Bei den Kurven handelt es sich um die Mittelwerte aus drei Messungen. Verglichen werden die Partikelanzahlkonzentrationen, die sich bei den vorher benannten Modi, "Automatik", „Turbo“, „Stufe 1“ und ohne Raumluftreiniger ergeben. Ohne eingeschalteten Raumluftreiniger (blaue Kurve in Abbildung 4-6) ist eine Abnahme der Partikelanzahlkonzentration aufgrund der vorher beschriebenen Sedimentation zu erkennen. Unabhängig vom Modus sinkt die Partikelanzahlkonzentration bei eingeschalteten Raumluftreiniger deutlich

schneller. Unterschiede zwischen den Modi sind bis 2000 s zu beobachten. Aufgrund der geringeren Ventilatorleistung reinigt der Raumluftreiniger die Luft innerhalb der Prüfkammer im Modus „Stufe 1“ langsamer ab als in den Modi „Automatik“ und „Turbo“. Jedoch ist kein erkennbarer Unterschied zwischen den Modi „Automatik“ und „Turbo“ zu sehen. Dies lässt darauf schließen, dass der Raumluftreiniger aufgrund der hohen Staubkonzentration im Automatikmodus die volle Leistung des Ventilators nutzt.

Vor den Versuchen mit der künstlichen Alterungsprozedur, d.h. die Beladung mit dem Prüfstaub im Wechsel mit der Abreinigung durch einen Druckluftstoß, wurden auch am Entstauber A Vorversuche durchgeführt, um das Verhalten des Entstaubers bei Belastung einschätzen zu können. Dafür wurden ca. 250 g Dolomitstaub der Firma Kremer Pigmente GmbH und Co. KG durch den Staubgenerator SAG 440 der Firma Topas GmbH dispergiert und dem Entstauber A der Abbildung 4-2 entsprechend zugeführt. Die durch den Entstauber A gefilterte Luft wurde in die Prüfkammer geleitet, in der sich das Feinstaubmessgerät befand. Nach Beenden der Beladung wurde der Entstauber A weiter betrieben, um die Partikelanzahlkonzentration innerhalb der Prüfkammer wieder zu senken. Nach der Abschaltung des Geräts startete die automatische Druckluftabreinigung. Dieser Vorversuch wurde zwei Mal durchgeführt. Abbildung 4-7 zeigt die Massenkonzentrationsverläufe während der Beladung des Entstaubers und nach der automatischen Abreinigung. Beim ersten Vorversuch wurde 260 g Dolomitstaub über einen Zeitraum von 18 Minuten dispergiert. Bei einer konstanten Staubzufuhr und einem konstanten Volumenstrom des Entstaubers A von 3300 m³/h ergab sich rechnerisch eine Staubkonzentration von 0,26 g/m³. Während der Bestäubung der Filter stiegen die Massenkonzentrationen in der Prüfkammer an, bis sich durch den Filterkuchenaufbau die Filterleistung verbessert. Während der Beladung kam es zu Massenkonzentrationen von bis zu 55 µg/m³ (PM₁), 100 µg/m³ (PM_{2,5}) und 125 µg/m³ (PM₁₀). Bei der Abreinigung der Filter kam es dann erneut zu einer hohen Feinstaubbelastung mit einer PM₁₀-Massenkonzentration von bis zu 350 µg/m³.

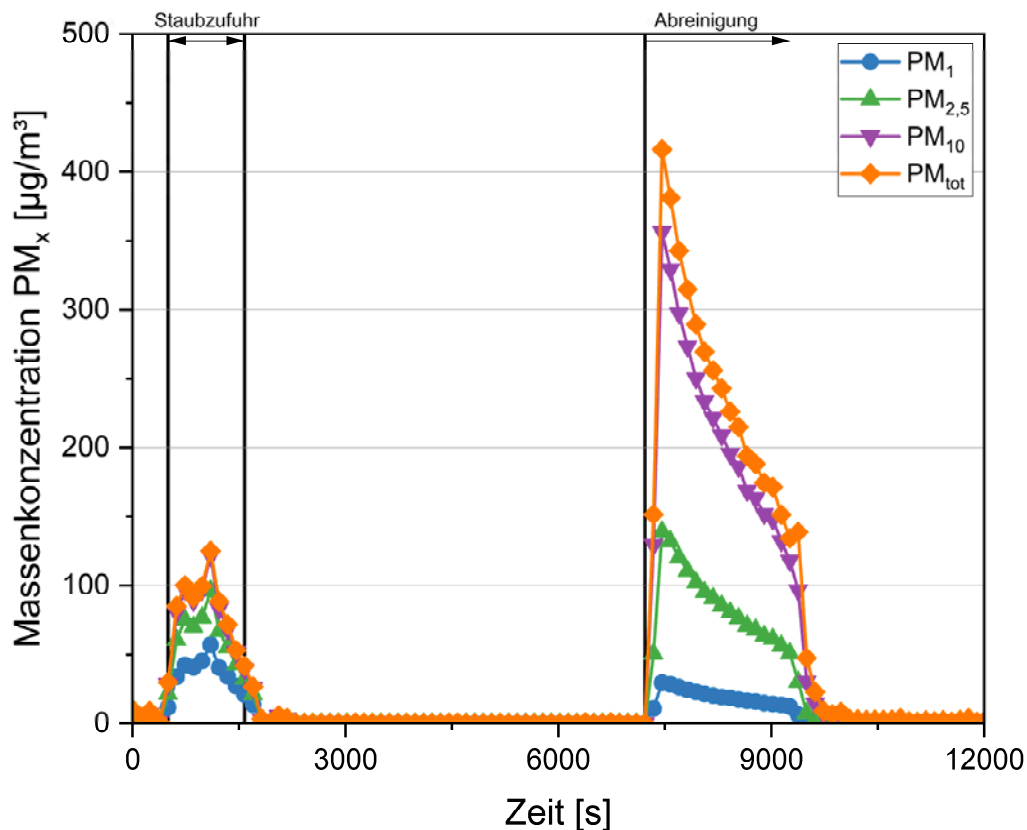


Abbildung 4-7: Massenkonzentrationsverläufe bei Beladung des Entstaubers A mit 260 g Dolomitstaub

Die zweite Messung, bei der 250 g Dolomitstaub in einem Zeitraum von 21 Minuten dispergiert wurde (wodurch sich eine rechnerische Staubkonzentration von $0,22 \text{ g/m}^3$ ergab), zeigte ähnliche Ergebnisse. Da die künstliche Alterung der Filter nach dem Normentwurf (ISO/CD 16313-2) bei höheren Staubkonzentrationen durchgeführt werden sollte ($2\text{-}2,5 \text{ g/m}^3$), wurde der Staubgenerator SAG 440 durch einen Staubgenerator SAG 420 ersetzt, welcher bis zu 12 kg Staub pro Stunde dispergieren kann. Auch hier wurden wieder Vorversuche mit geringeren Mengen Dolomitstaub aber höheren Staubkonzentrationen durchgeführt, um mit den Einstellungen des SAG 420 vertraut zu werden und das Verhalten des Entstaubers A zu beobachten. Beim ersten Vorversuch mit dem SAG 420 wurden 500 g Dolomitstaub in einem Zeitraum von 8 Minuten dispergiert (rechnerische Staubkonzentration von $1,14 \text{ g/m}^3$).

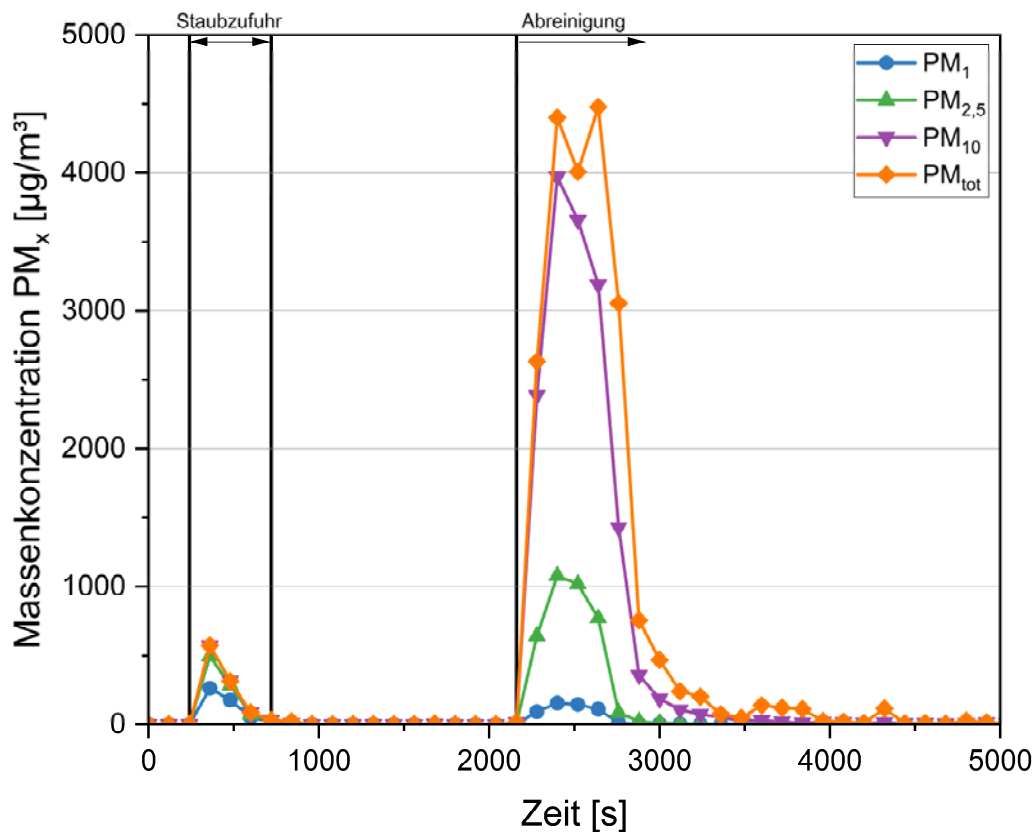


Abbildung 4-8: Massenkonzentrationsverläufe bei Beladung des Entstaubers A mit 500 g Dolomitstaub durch SAG 420

Während des Filtrervorgangs wurden PM_{10} -Massenkonzentrationen von maximal 570 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen (s. Abbildung 4-8). Dieser Wert fiel jedoch nach Erreichen des Maximums schnell wieder ab, was auf eine verbesserte Filterleistung aufgrund der Bildung eines Filterkuchens schließen lässt. Bei der Beladung der Filter kam es erwartungsgemäß zu einem Druckverlustanstieg. Zu Beginn der Messung betrug der Druckverlust über den Filtern 4,4 mbar und stieg während der Beladung auf 8,0 mbar an. Während des Abreinigungsprozesses und damit der Entfernung des Filterkuchens wurden signifikant erhöhte Feinstaubkonzentrationen mit einer maximalen PM_{10} -Massenkonzentration von 4000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen.

Eine Übersicht über die am Entstauber A durchgeführten Versuche zeigt Tabelle 4-1. Bei den durchgeführten Versuchen wurden die Parameter zugeführte Masse, Zustand des Ventilators und der Probenahmeort variiert.

Tabelle 4-1: Versuchsübersicht Entstauber A

Versuch	Zugeführte Masse [kg]	Aerosolkonzentration [g/m ³]	Ventilator	Probenahmeort
I	0,5	1,136	Ausgeschaltet	Innerhalb der Kammer
II	0,5	3,03	Ausgeschaltet	Innerhalb der Kammer
III	0,5	3,03	Ausgeschaltet	Innerhalb der Kammer
IV	1	3,03	Eingeschaltet	Innerhalb der Kammer
V	0,5	3,03	Ausgeschaltet	Im Auslassrohr
VI	1	3,03	Eingeschaltet	Im Auslassrohr
VII	1	3,03	Ausgeschaltet	Im Auslassrohr
VIII	1	3,03	Eingeschaltet	Im Auslassrohr

Bei den Versuchen I bis VIII aus Tabelle 4-1 fand am Ende jedes Versuchs eine Offline-Abreinigung der Filter statt. Außerdem wurden vor, während und nach der Beladung die Druckverluste aufgenommen. Der Verlauf des Druckverlustes im Laufe der Versuche ist in Abbildung 4-9 dargestellt. Die Graphik ist in Bereiche für die jeweiligen Versuche I bis VIII eingeteilt. Ziel der Versuche war das Erreichen des stabilen Zustands der Filter. Bei Erreichung des stabilen Zustands erhöht sich der Anfangsdruckverlust der Filter nach der Abreinigung nicht mehr. Dies ist in Abbildung 4-10 grafisch dargestellt. Im Bereich des instabilen Zustands findet eine unzureichende Abreinigung statt, wodurch der Druckverlust nicht auf den Anfangswert zurückfällt. Vergleicht man nun die Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10 ist erkennbar, dass der Anfangsdruckverlust des Entstaubers A nach jedem Versuch steigt und dieser sich somit noch im instabilen Zustand befindet.

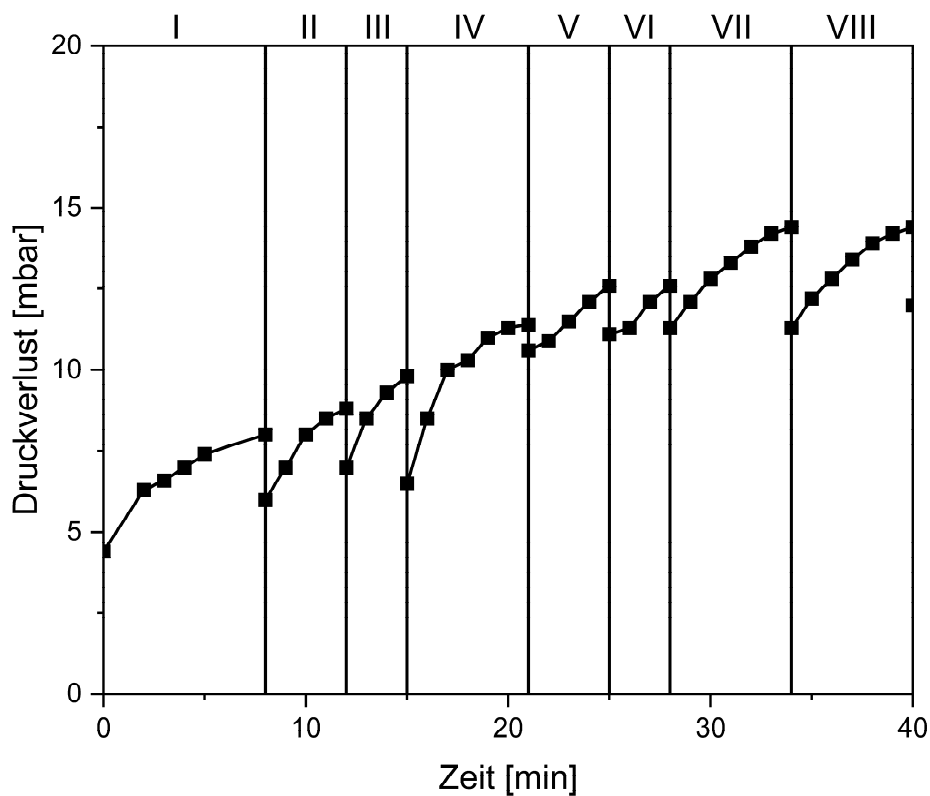


Abbildung 4-9: Druckverlust des Entstaubers A nach Staubzufuhr und Offline-Abreinigung

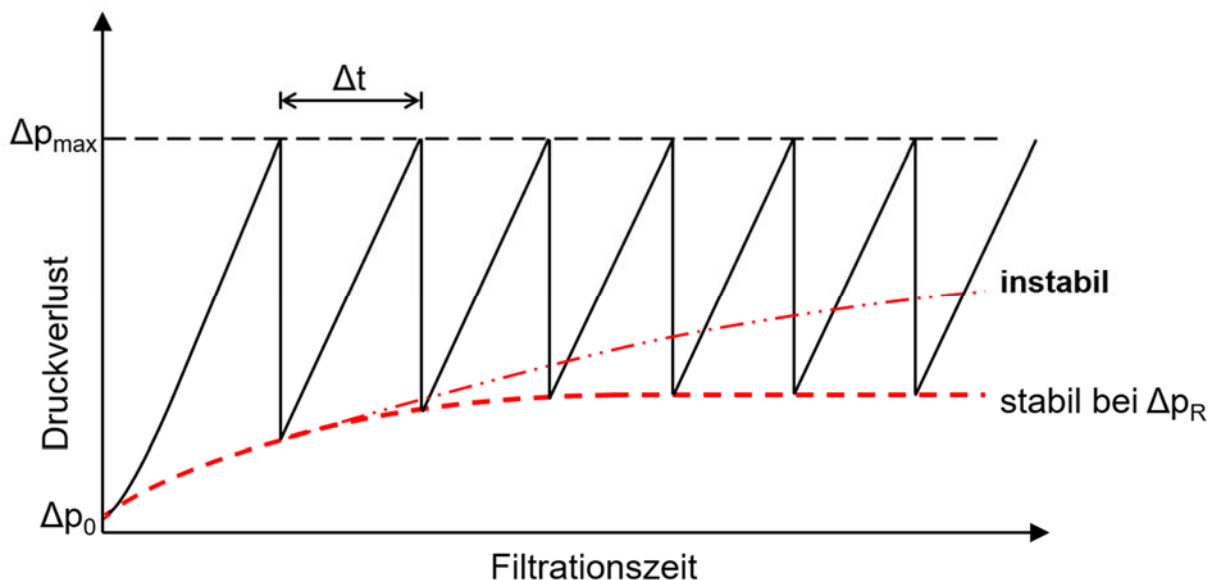


Abbildung 4-10: Schematischer Druckverlustverlauf während der Alterung für instabile und stabile Filter, nach Löffler

So steigt der Druckverlust in Versuch I durch eine Beladung von 0,5 kg Dolomitstaub von 4,4 mbar auf 8 mbar. Nach der Abreinigung fällt der Druckverlust jedoch nur auf

einen Wert von 6 mbar zurück. Dieser Anstieg setzt sich über die Versuche weiter bis zu einem Anfangsdruckverlust von 12 mbar fort. Neben den Druckverlusten wurden bei diesen Versuchen erneut die Massenkonzentrationen aufgezeichnet. Hierbei sollten Unterschiede zwischen den Probenahmeorten „Innerhalb der Kammer“ und „Im Auslassrohr“ sowie zwischen eingeschaltetem und ausgeschaltetem Ventilator deutlich werden. Dafür werden im ersten Fall die Versuche II und V verglichen. In beiden Fällen wurden 0,5 kg Dolomitstaub dispergiert. Außerdem war der Ventilator während der beiden Versuche ausgeschaltet. Bei diesen Versuchen unterscheidet sich nur der Probenahmeort (Versuch II: Innerhalb der Kammer, Versuch V: Im Auslassrohr). Die Änderungen der Massenkonzentrationsverläufe über der Zeit für Versuch II sind in Abbildung 4-11 zu sehen. Für den Vergleich der Versuche sind hierbei die Massenkonzentrationen zu Beginn der Staubzufuhr und der Abreinigung interessant. In Versuch II steigen die Massenkonzentrationen während der Staubzufuhr auf bis zu $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{10} , blaue Kurve), $205 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\text{PM}_{2,5}$, grüne Kurve) und $232 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{10} , lila Kurve) bis sich ein Filterkuchen aufbaut und sich die Filterleistung verbessert. Dies ist an der Verringerung der Massenkonzentration während der Staubzufuhr zu erkennen.

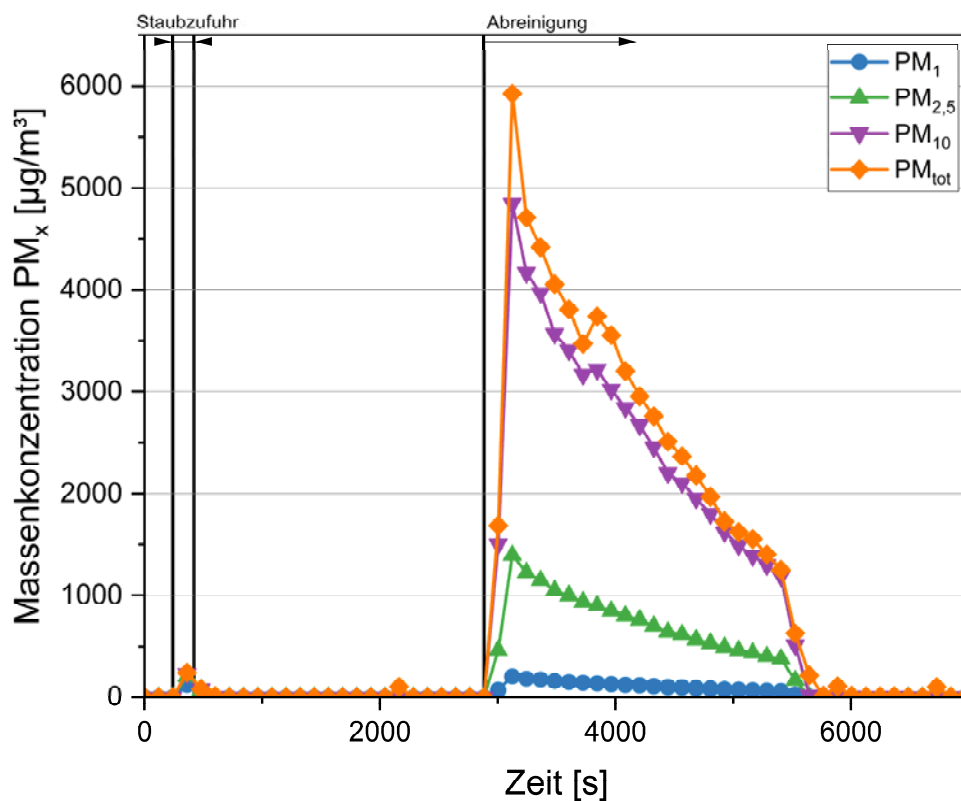


Abbildung 4-11: Massenkonzentrationsverläufe nach Beladung des Entstaubers A mit 500 g Dolomitstaub durch SAG 420 (Versuch II)

Der nächste Anstieg der Massenkonzentration tritt nach der Abreinigung auf. Obwohl die Rohgasseite (Rohgaskanal bis zu den Filtern des Entstaubers) von der Prüfkammer abgeschlossen ist, kommt es dennoch zu einem extremen Anstieg der Massenkonzentrationen. Diese steigen auf Werte von bis zu $206 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM₁, blaue Kurve), $1394 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{2,5}, grüne Kurve) und $4844 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM₁₀, lila Kurve) an. Eine Erklärung hierfür wären Undichtigkeiten im Gehäuse des Entstaubers bzw. des Rohgaskanals durch die die Partikel bei der Abreinigung in die Kammer gelangen können. Zusätzlich ist in der Abbildung der typische Abnahmeverlauf der Kurven aufgrund von Sedimentation erkennbar. Die schnelle Abnahme ab ca. 5500 s folgt aufgrund des angeschalteten Ventilators.

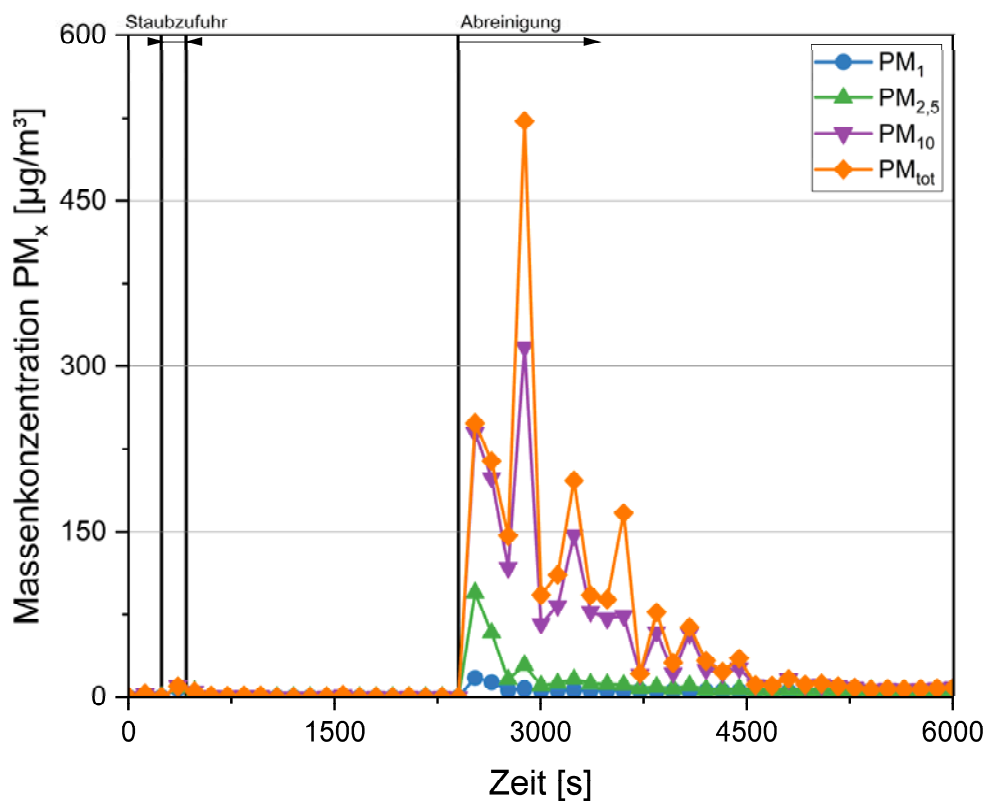


Abbildung 4-12: Massenkonzentrationsverläufe nach Beladung des Entstaubers A mit 500 g Dolomitstaub durch SAG 420 (Versuch V)

In Abbildung 4-12 sind die Massenkonzentrationen des Versuchs V zu sehen. Wie bei Versuch II sind auch hier wieder Anstiege der Massenkonzentrationen während der Staubzufuhr und nach der Abreinigung zu sehen. Diese steigen während der Staubzufuhr auf $8,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_1 , blaue Kurve), $9,42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\text{PM}_{2,5}$, grüne Kurve) und $9,95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{10} , lila Kurve) an. Der nächste Anstieg folgt erneut nach der Abreinigung der Filter. Hierbei steigen die Massenkonzentrationen auf maximal $17,61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_1 , blaue Kurve), $94,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\text{PM}_{2,5}$, grüne Kurve) und $317 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{10} , lila Kurve) an. Es ist zu erkennen, dass die Massenkonzentrationen, die bei Versuch V gemessen wurden, deutlich unter den Massenkonzentrationen von Versuch II liegen. Zwar sollte durch die Messung im Auslassrohr eine genauere Konzentrationsbestimmung erfolgen, jedoch war bei diesem Versuch der Ventilator nicht eingeschaltet, wodurch sich die Partikel zunächst in der Kammer verteilt haben und nicht in das Auslassrohr gesaugt wurden. Dass der Ventilator bei der Messung einen ausschlaggebenden Unterschied macht, ist in den nächsten beiden Graphen erkennbar. Hierbei werden die Versuche VII und VIII verglichen.

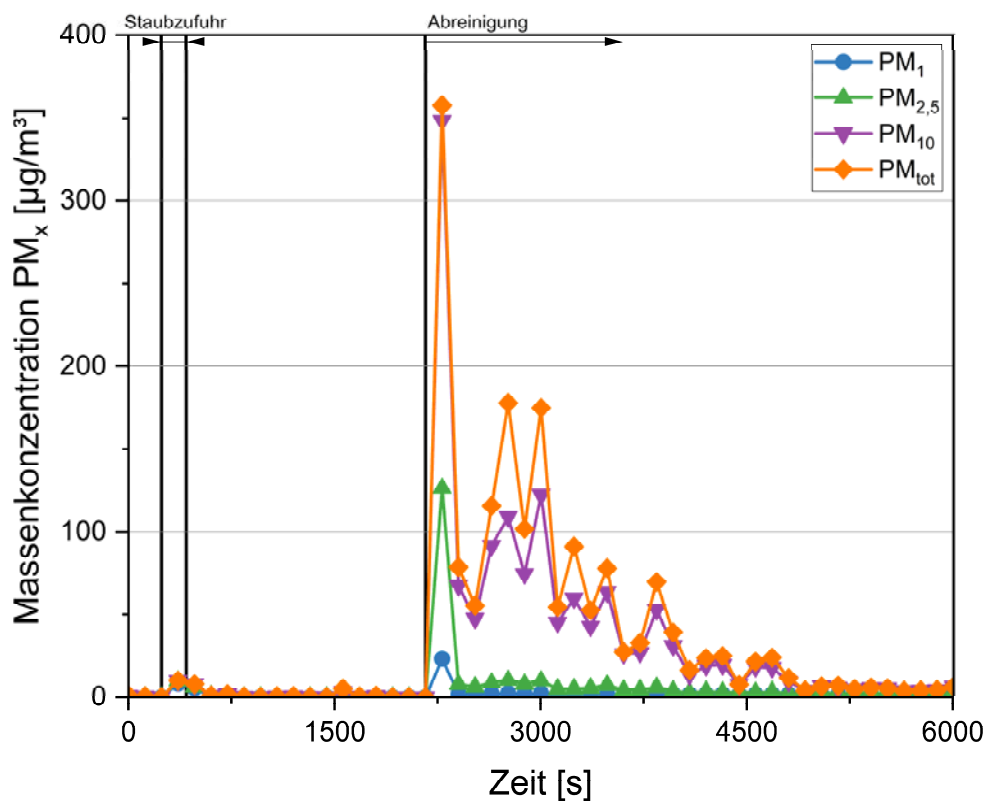


Abbildung 4-13: Massenkonzentrationsverläufe nach Beladung des Entstaubers A mit 1 kg Dolomitstaub durch SAG 420 (Versuch VII)

In Abbildung 4-13 sind die Massenkonzentrationsverläufe des Versuchs VII zu sehen. Wie bei den vorherigen Versuchen sind hier ebenfalls Anstiege der Massenkonzentrationen während der Staubzufuhr und nach der Abreinigung zu erkennen. Während der Staubzufuhr stiegen die Massenkonzentrationen auf $8,35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_1 , blaue Kurve), $9,92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($PM_{2,5}$, grüne Kurve) und $10,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{10} , lila Kurve). Dieser Versuch zeigt somit einen ähnlichen Anstieg der Massenkonzentration wie Versuch V (s. Abbildung 4-12). Nach der Abreinigung erhöhten sich die Massenkonzentrationen auf $23,34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_1 , blaue Kurve), $126,44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($PM_{2,5}$, grüne Kurve) und $348,47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{10} , lila Kurve).

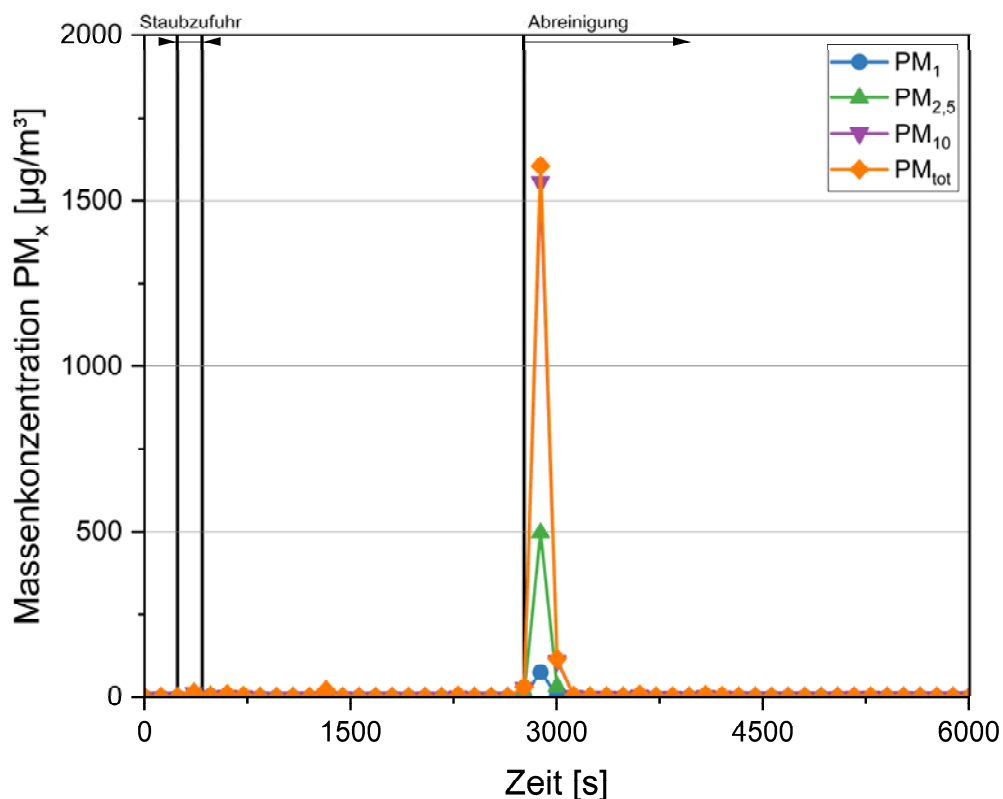


Abbildung 4-14: Massenkonzentrationsverläufe nach Beladung des Entstaubers A mit 1 kg Dolomitstaub durch SAG 420 (Versuch VIII)

Vergleicht man nun diese Werte mit den Messergebnissen des Versuchs VIII (s. Abbildung 4-14) ist durch den eingeschalteten Ventilator ein deutlicher Unterschied zu erkennen. Mit Massenkonzentrationen von $10,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_1 , blaue Kurve), $13,26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($PM_{2,5}$, grüne Kurve) und $14,04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{10} , lila Kurve) unterscheiden sich die Werte nur minimal, da der Auslass des Entstaubers in Richtung des Auslassrohrs gerichtet war und die Partikel sich somit während des Betriebs nur geringfügig in der Prüfkammer verteilt haben. Der Unterschied wird im Anstieg der Massenkonzentrationen während der Abreinigung deutlich. Diese steigen im Versuch VIII auf $75,88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_1 , blaue Kurve), $496,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($PM_{2,5}$, grüne Kurve) und $1556,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{10} , lila Kurve) an und liegen somit um den Faktor 3 - 5 höher. Durch den angeschalteten Ventilator konnten nämlich die freigewordenen Partikel, die sich normalerweise in der Prüfkammer verteilt hätten, direkt in das Auslassrohr abgesaugt werden, wo es zu einer isokinetischen Erfassung der Partikel kam.

Zusätzlich zu den Versuchen aus Tabelle 4-1 wurden Versuche mit größeren Staubmengen durchgeführt. Diese sind in Tabelle 4-2 zu sehen. Die

Aerosolkonzentration wurde in allen Versuchen konstant gehalten. Es wurden jedoch die zugeführte Masse, der Zustand des Ventilators und der Probenahmeort variiert. Wie in den vorherigen Versuchen wurden auch in diesen Fällen die Druckverlustanstiege und die Massenkonzentrationen gemessen.

Tabelle 4-2: Versuchsübersicht Entstauber A für massebezogene Druckverlustmessungen

Versuch	Zugeführte Masse [kg]	Aerosolkonzentration [g/m ³]	Ventilator	Probenahmeort
1	3	3,03	Eingeschaltet	Innerhalb der Kammer
2	6,5	3,03	Eingeschaltet	Innerhalb der Kammer
3	3,5	3,03	Ausgeschaltet	Im Auslassrohr

Im Gegensatz zu Abbildung 4-9 wird hier der Druckverlustanstieg bezüglich der zugeführten Masse aufgezeigt. Dies ist in Abbildung 4-15 dargestellt. Bei Versuch 1 (graue Quadrate) kam es während der Beladung mit 3 kg Dolomitstaub zu einem Druckverlustanstieg von 7,7 mbar auf 15,7 mbar. Während des Versuchs 2 (rote Kreise) stieg der Druckverlust von 10,4 mbar auf 20,4 mbar an. Bei Versuch 3 (blaue Dreiecke) hat sich der Druckverlust von 12 mbar auf 18,5 mbar gesteigert. Es ist anhand der steigenden Startdruckverluste wie in Abbildung 4-9 erkennbar, dass es nach jedem Versuch (und der darauffolgenden Abreinigung) nicht zu einer vollständigen Abtragung des Staubs kam. Zusätzlich ist bei den jeweiligen Versuchen ab einer Beladung von 500 g Dolomitstaub eine relativ konstante (lineare) Druckverlustzunahme zu erkennen.

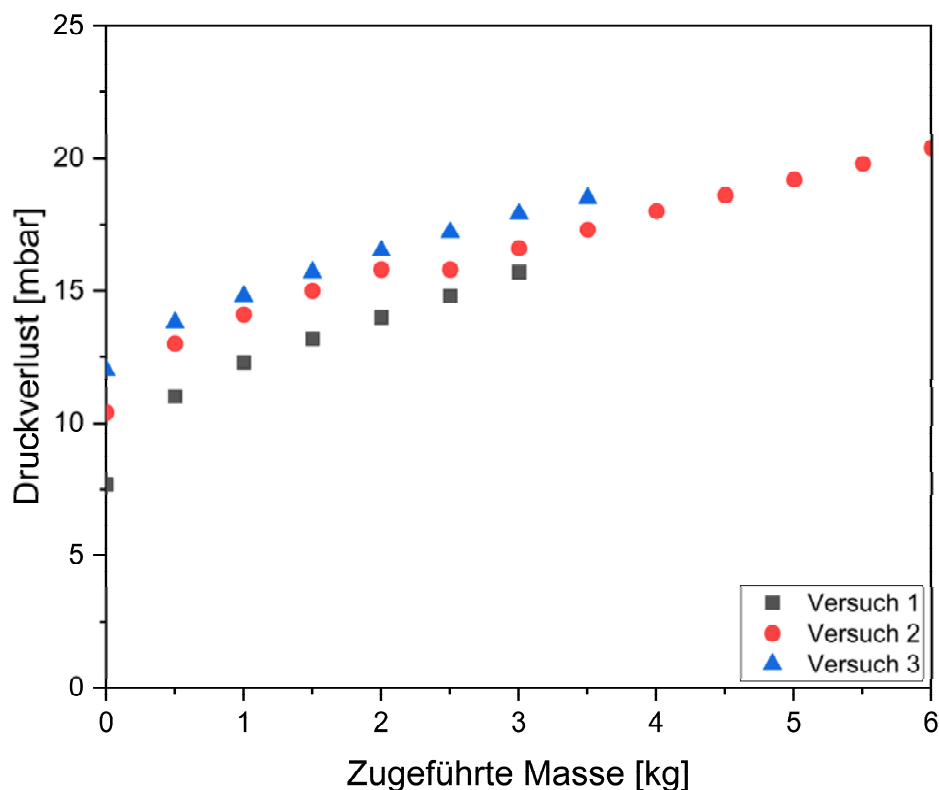


Abbildung 4-15: Druckverlustanstieg Entstauber A bezüglich der zugeführten Masse

Da aufgrund fehlender Softwareeinstellungen keine zeitgesteuerte Abreinigung während des laufenden Betriebs eingestellt werden konnte, wurden die Versuche mit dem mobilen Entstauber A an dieser Stelle abgebrochen.

Entstauber B wurde in die Prüfkammer integriert (s. Abbildung 4-3). Die Bestäubung mit Dolomit der Firma Kremer Pigmente erfolgte mit Hilfe des Staubdispersierers SAG 420. Da dieser mobile Entstauber mit zeitgesteuerter Abreinigung betrieben werden kann, wurde die folgende Alterungsprozedur angewendet (s. Tabelle 4-3).

Tabelle 4-3: Alterungsprozedur

Schritt	Bezeichnung	Beschreibung
1	Break-In	N Beladungszyklen (max. 1 h, nach Herstellerangaben)
2	Alterung	500N Beladungszyklen (max. 5 h) bei Reinigungspausen $\Delta t = 10 - 20$ s

3	Stabilisierung	10N Beladungszyklen (max. 4 h)
4	Leistungsmessung	5N Beladungszyklen (max. 30 min)
5	Optional	Bestimmung PM _x -Wirkungsgrade

Auf Basis der eigenen Versuchsergebnisse und der Auswertung weiterer experimenteller Arbeiten ([23]) wurde die Alterungsprozedur optimiert, um die Alterung schneller umsetzen zu können. Diese optimierte Schnellalterung ist in der nachfolgenden Tabelle 4-4 dargestellt. Aufgrund der Änderungen bei der Alterung (Schritt 2) und der Stabilisierung (Schritt 3) konnte die Durchführungszeit von insgesamt 9 h auf 6 h verkürzt werden. Als Massenkonzentration des Prüfstaubes in der Zuluft wurde bei den Versuchen 5 g/m³ und 10 g/m³ gewählt.

Tabelle 4-4: Optimierte Alterungsprozedur

Schritt	Bezeichnung	Beschreibung
1	Break-In	N Beladungszyklen (max. 1 h, nach Herstellerangaben)
2	Alterung	500N Beladungszyklen (max. 4 h) bei Reinigungspausen $\Delta t = 5 - 20$ s
3	Stabilisierung	10N Beladungszyklen (max. 2 h)
4	Leistungsmessung	5N Beladungszyklen (max. 30 min)
5	Optional	Bestimmung PM _x -Wirkungsgrade

In der folgenden Abbildung 4-16 ist der Druckverlust über den Vorfiltern während der Alterungsprozedur dargestellt. Der Druckverlust wurde jeweils kurz vor Beginn der Abreinigung des ersten Vorfilters und nach Beendigung der Abreinigung aller vier Vorfilter gemessen. Die Massenkonzentration des Staubs in der Zuluft betrug zunächst 5 g/m³. Der Abreinigung der vier Vorfilter (ein Abreinigungsprozess) dauert insgesamt 40,6 s, wobei die Impulsdauer 150 ms und die Pausendauer zwischen den Abreinigungen 10 s betrug. Nach der Abreinigung der vier Vorfilter gab es eine einminütige Stabilisierungsphase der Filter, die sich softwarebedingt nicht abschalten ließ. Bei einer vierstündigen Alterung kam es somit zu über 150 Abreinigungen bei gleichzeitiger Bestäubung. Zu Beginn des Alterungsschritts (Schritt 2) betrug der Druckverlust der Vorfilter ca. 330 Pa. Im Schnitt nahm der Druckverlust über der

einminütigen Bestäubung um etwa 30 Pa zu. Am Ende dieser Alterungsprozedur ist der Druckverlust auf etwa 340 Pa vor und 360 Pa nach Beladung angestiegen. Anhand des erhöhten Druckverlusts ist erkennbar, dass eine Alterung der Filter stattgefunden hat. Da die Kurve im Mittel jedoch weiter steigt, ist davon auszugehen, dass der angestrebte stabile Zustand (siehe Abbildung 4-10) noch nicht erreicht worden ist.

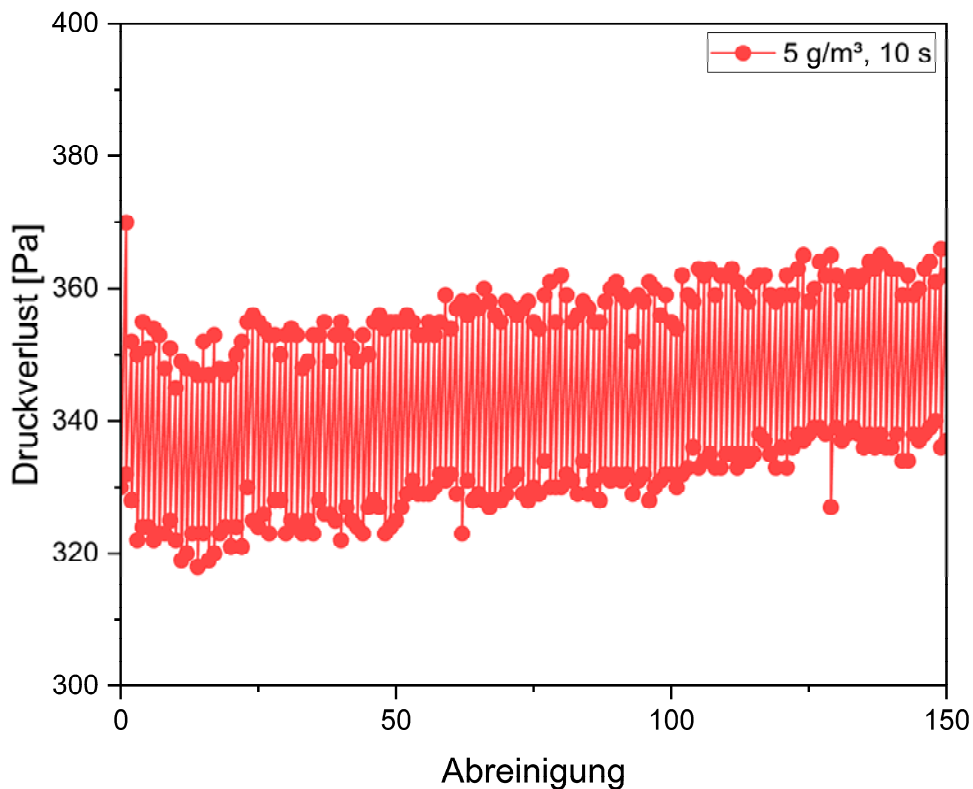


Abbildung 4-16: Druckverlust Entstauber B während der Alterung nach Tabelle 4-4

Um diesen stabilen Zustand der Filter zu erreichen, wurde eine weitere Alterung mit geänderten Randbedingungen durchgeführt. Bei der geänderten Alterungsprozedur wurde die Alterungsdauer auf 1,5 h verringert, bei gleichzeitiger Erhöhung der Aerosolkonzentration von 5 g/m³ auf 10 g/m³. Der Druckverlustverlauf während der angepassten Alterung ist in Abbildung 4-17 zu sehen. Der Druckverlust der Vorfilter betrug zu Beginn der Alterung ca. 320 Pa. Während der einminütigen Bestäubung stieg der Druckverlust jeweils um 30-40 Pa an. Auch während dieser Alterung fiel der Druckverlust nach der Abreinigung nicht auf den vorherigen Wert zurück, was auf eine

erfolgreiche Alterung schließen lässt. Im Vergleich zur Alterung, die in Abbildung 4-16 abgebildet wird, bleiben die Druckverluste vor und nach der Abreinigung ab der zwanzigsten Abreinigung konstant. Somit scheint der stabile Zustand erreicht zu sein. Dies wird in Kapitel 4.5 (Beschaffung und Prüfung real gealterter Filter) weiter überprüft.

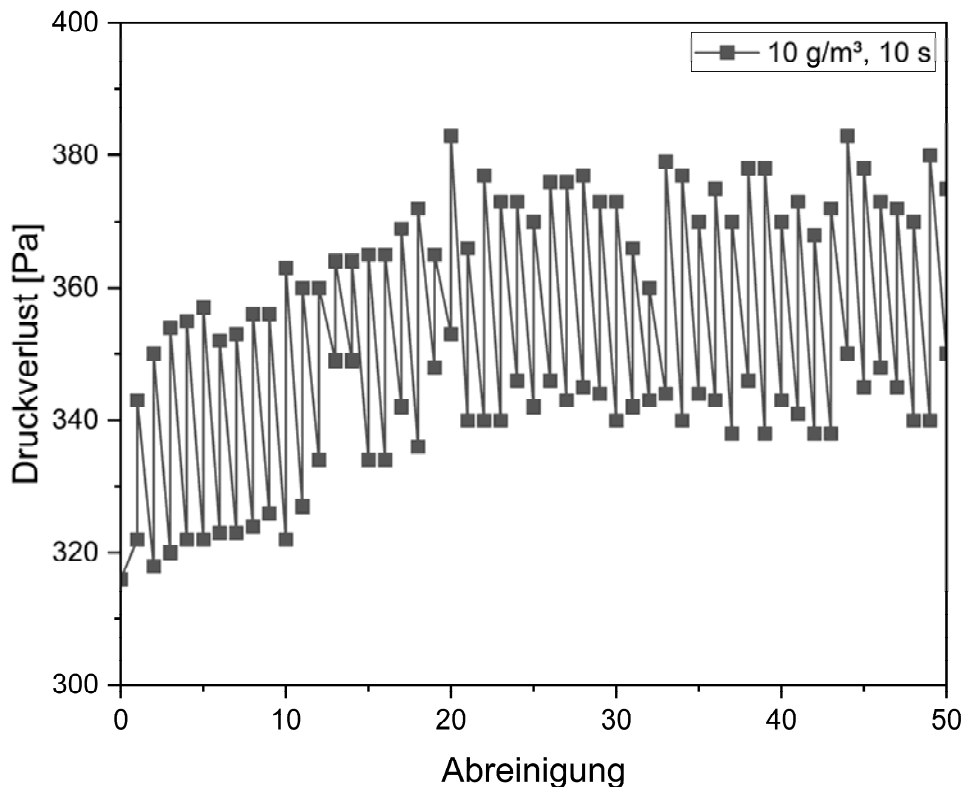


Abbildung 4-17: Druckverlust Entstauber B bei 1,5-stündiger Alterung bei 10 g/m³

Neben dem bereits dargestellten Druckverlust wurden auch die Massenkonzentrationen während der Alterungsprozeduren aufgezeichnet (Abbildung 4-18). Zu Beginn der Alterung lagen die Massenkonzentrationen bei 60 µg/m³ (PM₁), 155 µg/m³ (PM_{2,5}) und 320 µg/m³ (PM₁₀). Aufgrund des sich aufbauenden Filterkuchens verringern sich die Massenkonzentrationen während der Beladung vor der Abreinigung. Durch die Abreinigung und der daraus folgenden Reduzierung des Filterkuchens stiegen diese wieder an. Zusätzlich kann der Abbildung entnommen werden, dass die Massenkonzentrationsverläufe über der Alterungsdauer abnehmen. Dieser Verlauf entsteht in Folge der nicht vollständigen Abreinigung. Oberflächlicher

Staub wird bei der Abreinigung abgetragen, jedoch verbleiben gerade im Filtermedium weiterhin Partikel, die das Absinken der Filterleistung verhindern.

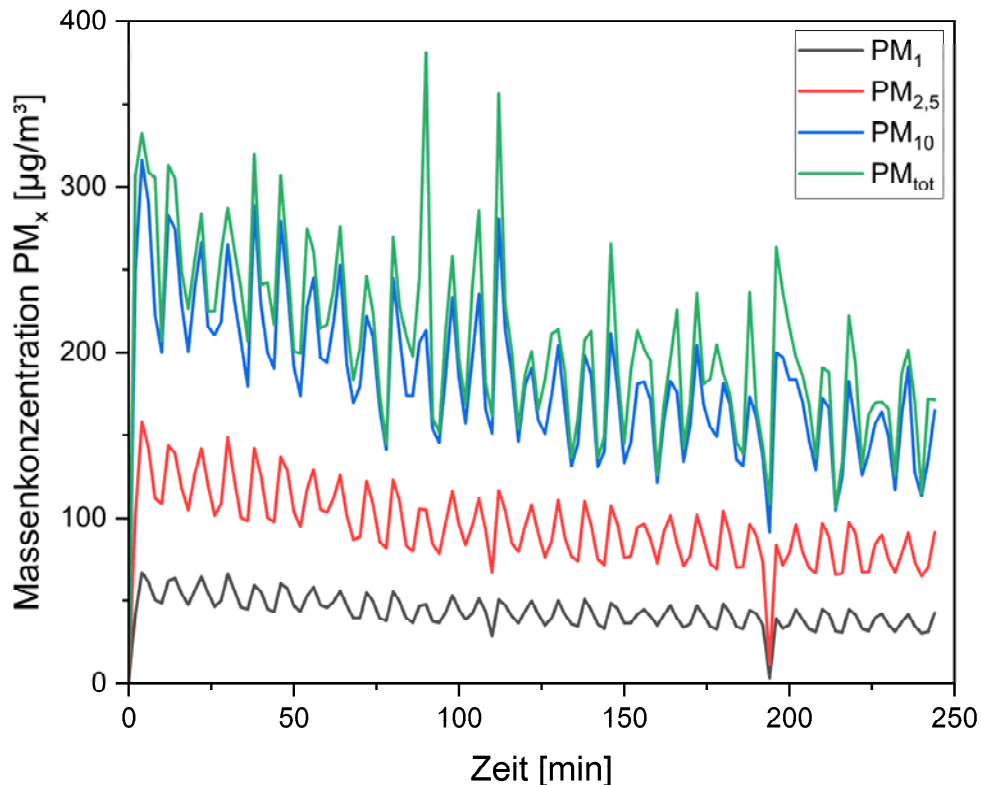


Abbildung 4-18: Massenkonzentrationsverläufe während der Alterung des mobilen Entstaubers B bei 5 g/m³ Aerosolkonzentration

Die Massenkonzentrationsverläufe wurden auch bei der optimierten Alterung aufgezeichnet (Abbildung 4-13). Die Massenkonzentrationen lagen zu Beginn der Alterung bei 35 µg/m³ (PM₁), 80 µg/m³ (PM_{2,5}) und 165 µg/m³ (PM₁₀). Auffallend ist, dass die Massenkonzentrationen aller Fraktionen geringer sind als während der ersten Alterungsprozedur. Dies kann anhand zweier Ansätze erklärt werden. Zum einen wurde durch diese Vorgehensweise eine bessere Filterwirkung aufgrund des sich schneller aufbauenden Filterkuchens erzielt. Zum anderen wäre zu erwarten, dass der Peak der jeweiligen Massenkonzentrationen größer hätte sein müssen. Dass dies nicht so auftrat, kann jedoch mit der Messdauer des Fidas 200 S erklärt werden. Da dieses Feinstaubmessgerät die Massenkonzentrationen als Mittelwert über 120 s darstellt, scheinen sich die verbesserte Filterleistung durch den schneller aufbauenden Filterkuchen und die zu erwartende erhöhte Konzentration aufgrund der größeren

Masse, die abgereinigt wird, auszugleichen. Zusätzlich lässt sich anhand des Verlaufs der Massenkonzentrationen in Abbildung 4-19 erkennen, dass anscheinend ein stabiler Zustand erreicht wurde, da die Massenkonzentrationen während der Alterungsprozedur konstant blieben.

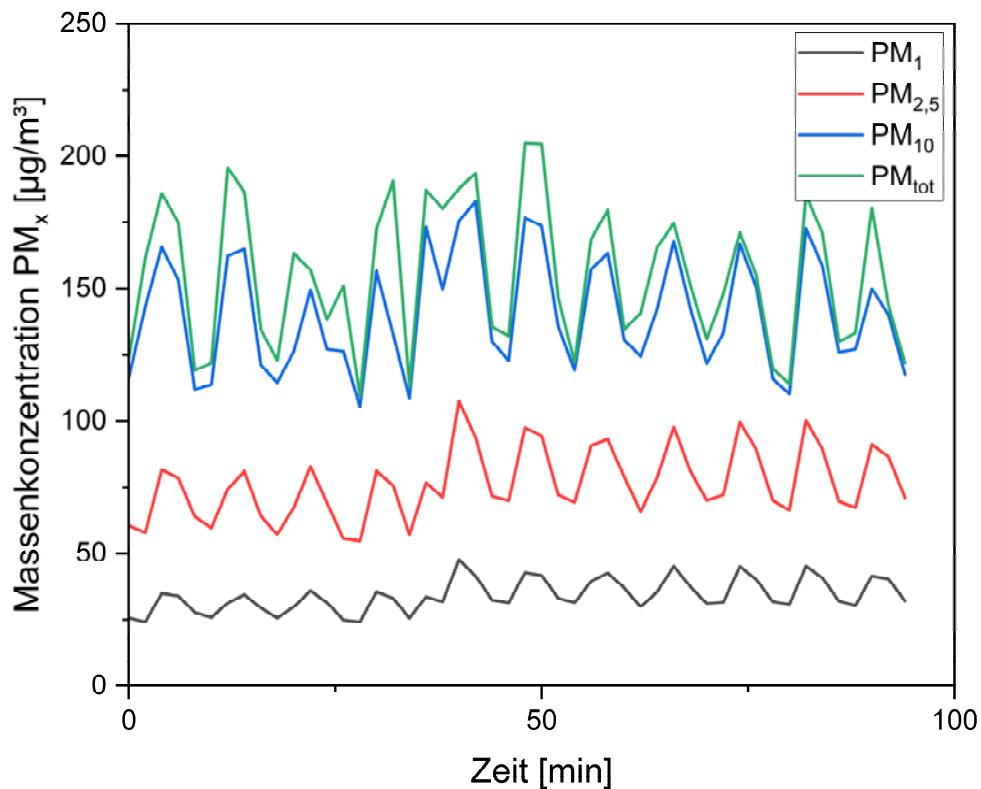


Abbildung 4-19: Massenkonzentrationen während der Alterung des mobilen Entstaubers B bei 10 g/m³ Aerosolkonzentration

Zusätzlich zum Druckverlust und der Massenkonzentrationen sollte überprüft werden, ob sich durch die Alterung die Filtereffizienz geändert hat. Daher wurden vor und nach der Alterungsprozedur die Roh- und Reingaskonzentrationen gemessen und daraus der Fraktionsabscheidegrad als Maß für die Filtereffizienz berechnet. Vor dieser Messung wurden die Vorfilter durch den Druckluftimpuls gereinigt und anschließend mit einem Kilogramm Dolomitstaub beladen. Die Verläufe der berechneten Effizienzen sind in Abbildung 4-20 abgebildet. Die in der Legende der Abbildung genutzten Bezeichnung „Filterstufe 1“ und „Filterstufe 2“ beziehen sich auf die jeweiligen Filter des mobilen Entstaubers B. Die Filterstufe 1 steht hierbei für die vier Vorfilter. Bei der Filterstufe 2 handelt es sich um den Schwebstoff- und Aktivkohlefilter, welche den

Vorfiltern nachgeschaltet sind. Die Kurven in der Abbildung bilden den Mittelwert aus drei aufeinanderfolgenden Messungen ab. Da der Messbereich des Fidas 200 S auf den Bereich von $0,18\ \mu\text{m}$ bis $18\ \mu\text{m}$ beschränkt ist, wird die Bestimmung der Effizienz für diesen Bereich durchgeführt. Es ist zu erkennen, dass die Effizienz des mobilen Entstaubers B im Neuzustand für den gesamten Messbereich des Fidas 200 S eine Effizienz von mehr als 99 % hat. Die geringste Effizienz (MPPS, most penetrating particle size) hat der mobile Entstauber bei einer Partikelgröße von etwa $0,3\ \mu\text{m}$. Wird die Effizienzkurve für den Neuzustand mit der Kurve nach der künstlichen Alterung verglichen, ist erkennbar, dass die Effizienz besonders für den Bereich kleiner $0,4\ \mu\text{m}$ stark abgenommen hat. Für die künstlich gealterten Filter des mobilen Entstaubers B liegt die Effizienz bei $0,18\ \mu\text{m}$ bei ca. 93 %. Dies ist ein untypisches Verhalten für gealterte Filter, da diese aufgrund der nicht abreinigbaren Beladung eine verbesserte Filterleistung aufweisen sollten. Die in diesem Falle sinkende Effizienz kann auf zwei Gründe zurückgeführt werden. Zum einen kann es aufgrund der Dauer des Betriebs zu einer Entladung der Filter gekommen sein, wodurch es nicht mehr zu einer elektrostatischen Abscheidung kommt. Zum anderen kann die erhöhte Partikelkonzentration im Reingas eine Folge des Aktivkohlefilters sein, welcher dem Schwebstofffilter nachgeschaltet ist. Dieser könnte während des Betriebs Aktivkohlepartikel abgeben, welche vom Fidas 200 S aufgezeichnet werden. Um diese Optionen zu überprüfen, werden die Versuche ohne Aktivkohlefilter bzw. mit vertauschten Aktivkohle- und Schwebstofffilter wiederholt.

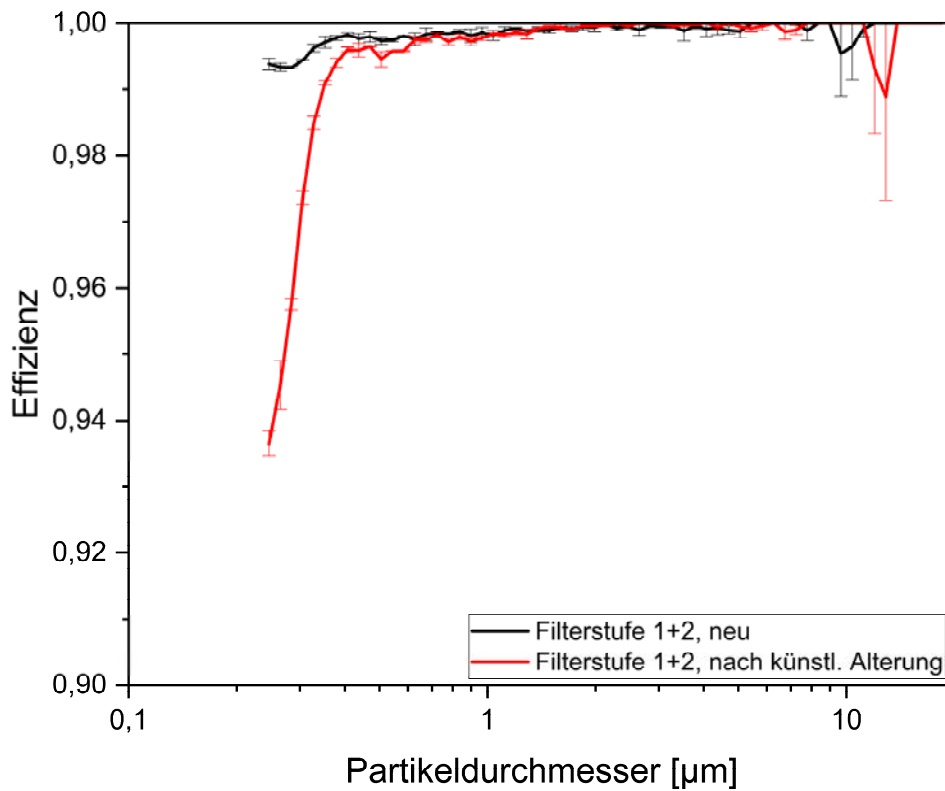


Abbildung 4-20: Effizienz des mobilen Entstaubers B vor und nach der Alterung

Neben den Effizienzmessungen am mobilen Entstauber wurden auch Vergleichsmessungen von den Mitarbeitern der Universität am IUTA an einem Prüfstand nach EN 779 durchgeführt. Der Versuchsaufbau mit eingebauten Filtern ist in Abbildung 4-21 zu sehen.



Abbildung 4-21: Prüfstand nach EN 779 mit eingebauten Filterpatronen

Die Effizienzmessungen an den Filterpatronen wurden hier in Anlehnung an die DIN EN ISO 16890 durchgeführt. Die Filterpatronen wurden nicht mit Dolomitstaub, sondern mit DEHS (Di-Ethyl-Hexyl-Sebacate) getestet. Anstelle des Fidas 200 S wurde das Aerosolspektrometer Promo 3000 der Firma Palas verwendet. Wie auch bei der Effizienzbestimmung des gesamten Entstaubers wurden auch in diesem Fall die Partikelkonzentrationen im Roh- und Reingas gemessen. Die Effizienzkurven für die Filterpatronen im Neuzustand und nach künstlicher Alterung sind in Abbildung 4-22 abgebildet. Wie bei den Effizienzmessungen mit Dolomitstaub am gesamten mobilen Entstauber steigt die Filtereffizienz mit steigendem Partikeldurchmesser Richtung eins an. Bei einer Partikelgröße von $0,15 \mu\text{m}$ zeigt sich die geringste Effizienz für die Filter im Neuzustand. Dieser beträgt ca. 98,3 %. Diese ist geringer als bei der Messung am gesamten mobilen Entstauber. Dies liegt zum einen an dem den Vorfiltern nachgeschalteten Schwebstofffilter und zum anderen wahrscheinlich an dem hier genutzten Aerosol. Da DEHS nur ein sehr niedriges Ladungsniveau aufweist, kommt es bei der Nutzung von DEHS zu keiner elektrophoretischen Abscheidung. Zudem startet der Messbereich des Promo 3000 bei einer kleineren Partikelgröße. Nach der Alterung ist in diesem Fall auch wieder eine niedrigere Effizienz gemessen worden als bei Filtern im Neuzustand. Dass es gerade im Bereich der kleineren Partikeln zu einer Verringerung der Effizienz kam, kann an der mechanischen Belastung der Filter durch die andauernde Jet-Impulsabreinigung liegen. Da diese während der Alterung häufig durchgeführt wurde, kann es bei den Filtern zu größeren Zwischenräumen gekommen sein, wodurch die kleineren Partikel die Filter besser passieren können.

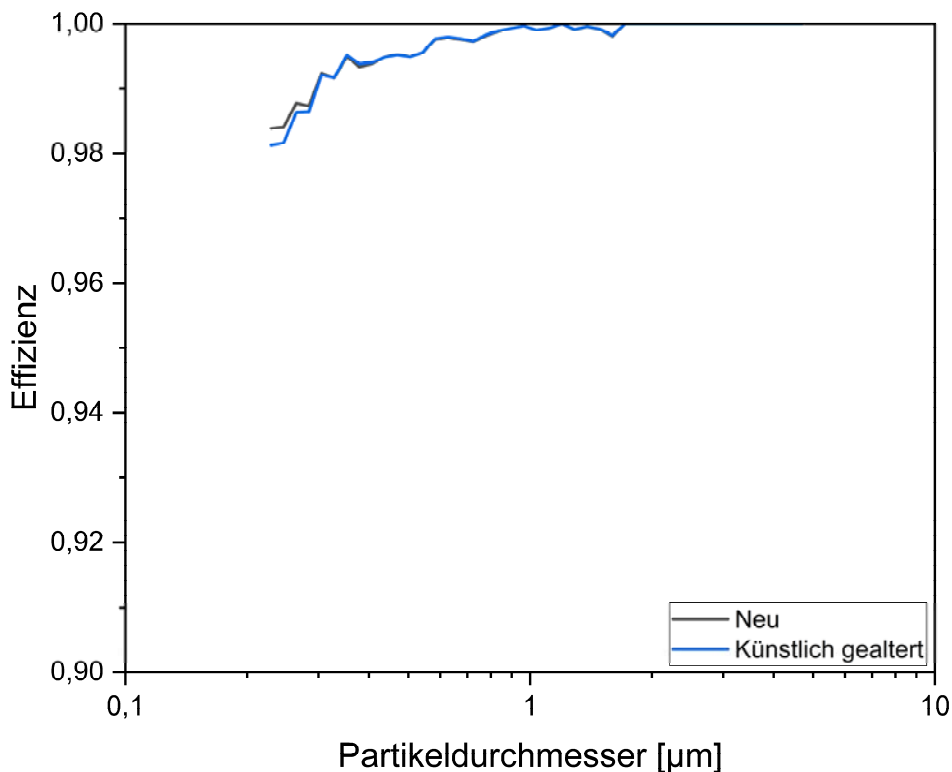


Abbildung 4-22: Filterpatroneneffizienz, gemessen an Filterprüfstand nach EN 779, Aerosol: DEHS

Abbildung 4-23 zeigt die Druckverluste der Filterpatronen vor und nach der künstlichen Alterung. Diese wurden im Entstauber selbst gemessen (rechte Balken) und im Prüfkanal nach EN 779 (linke Balken). Die vier Vorfilter weisen im Prüfkanal vor der Alterung einen Druckverlust von 48 Pa auf und steigt durch die künstliche Alterung auf 105 Pa an. Dieser Druckverlustanstieg lässt sich auf die Partikel zurückführen, welche sich durch die Bestaubung während der ständigen Abreinigungen innerhalb der Zwischenräume des Filtermediums festgesetzt haben. Im Entstauber selbst wird vor und nach der künstlichen Alterung ein höherer Druckverlust gemessen. Dieser beträgt vor der Alterung 86 Pa und nach der Alterung 350 Pa. Somit ist durch die künstliche Alterung in beiden Messaufbauten ein Anstieg des Druckverlustes erkennbar. Ob dieser Druckverlustanstieg mit dem Anstieg aufgrund der realen Alterung vergleichbar ist, wird im nächsten Kapitel betrachtet. Dass im Entstauber selbst ein höherer Druckverlust gemessen wird, kann anhand der Art und Weise der Anströmung der Filter erklärt werden. Im Prüfkanal wurden die Filter direkt angeströmt.

Im Entstauber erfolgt die Anströmung durch einen Schlitz an der Rückwand des Entstaubers, wodurch es eine Verwirbelung bei der Anströmung der Vorfilter gibt.

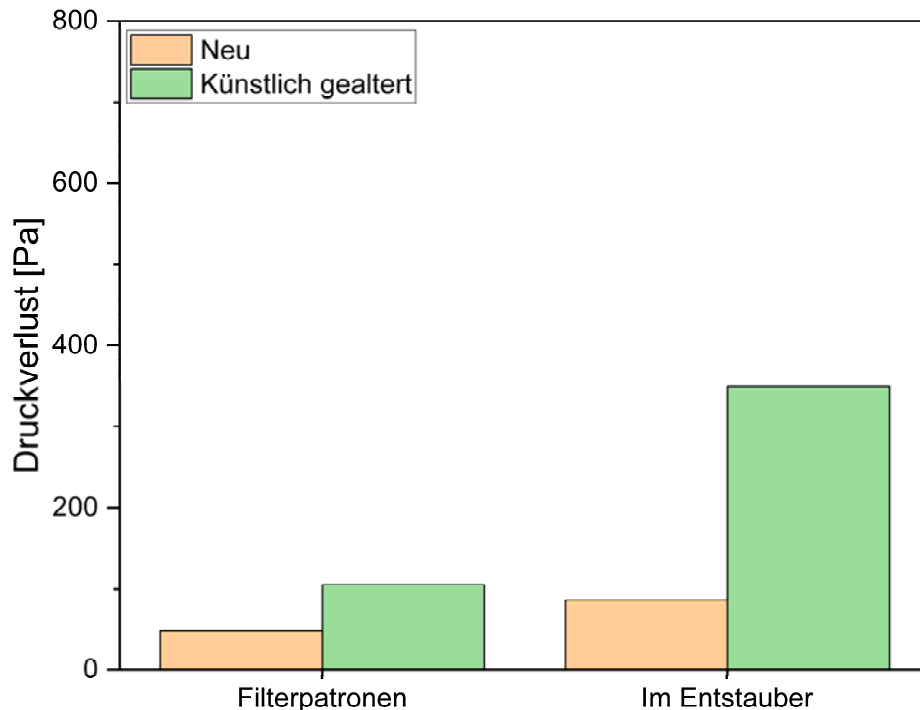


Abbildung 4-23: Druckverlust der Filterpatronen vor und nach künstlicher Alterung im Prüfkanal nach EN 779 (links) und im Entstauber (rechts)

4.5 Beschaffung und Prüfung real gealterter Filter / AP 4 (FE 1)

Um den Erfolg der Alterungsprozedur zu bewerten, wurden Filter beschafft, welche in der Industrie unter den üblichen Betriebsbedingungen verwendet und somit mit einem für diesen Einsatz üblichen Aerosol gealtert wurden. Hierfür wurde die Firma, welche den mobilen Entstauber B verliehen hat, gebeten von Kunden zurückgeschickte Filterpatronen zu Messzwecken zur Verfügung zu stellen. Die Rückmeldungen waren allerdings sehr zurückhaltend und so konnte nur ein Satz (4) Filterpatronen für Vergleichsmessungen untersucht werden. Diese Filterpatronen wurden über 7 Monate im 24/5 Betrieb mit Messingstaub beaufschlagt. Die Filterpatronen wurden in beiden Versuchsständen (in der Universität und am IUTA) mit Dolomitstaub bzw. DEHS

untersucht. In Abbildung 4-24 sind die Massenkonzentrationen unter Alterungsbedingungen zu sehen (Dolomitstaubkonzentration: 5 g/m^3 , Abreinigung nach 10 s). Am deutlichsten fallen hierbei die quasi-konstanten Werte für die verschiedenen Massenfraktionen auf. Zudem sind die Massenkonzentrationen bei den „real“-gealterten Filtern geringer als für die künstlich gealterten. Beide Beobachtungen können anhand des zur Alterung genutzten Messingstaubs begründet werden. Da dieser Messingstaub deutlich kleinere Partikelgrößen aufweist und damit schlechter abzureinigen ist. Somit kommt es auch bei der Abreinigung zu keinem deutlichen Peak und durch die eingelagerten Messingpartikel zu einer besseren Filtereffizienz als bei der Beaufschlagung mit Dolomitstaub.

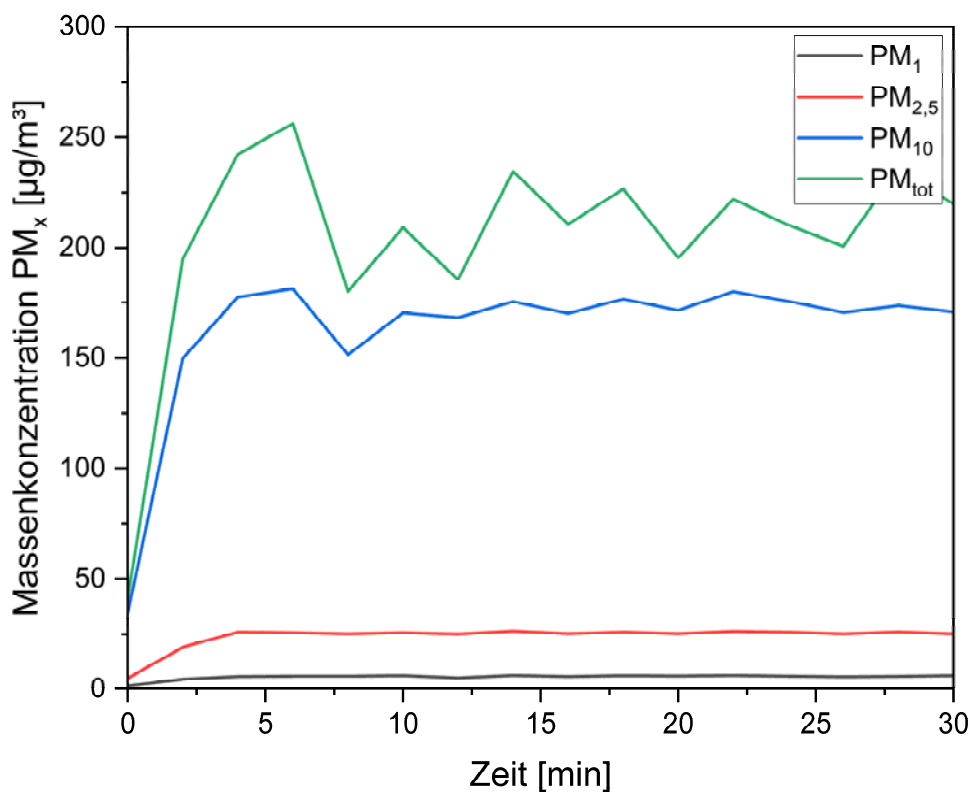


Abbildung 4-24: Massenkonzentration während der Alterung bei real gealterten Filtern

Neben der Aufnahme der Massenkonzentrationen in der Testkammer wurden auch Effizienzmessungen der real gealterten Filterpatronen am Normprüfstand durchgeführt und mit Ergebnissen der künstlich gealterten verglichen. Die Effizienzmessung am gesamten mobilen Entstauber (beinhaltet Filterstufe 1 und Filterstufe 2) ist in

Abbildung 4-25 zu sehen. Da im Kapitel 4.4 bereits auf die Kurven „Filterstufe 1+2, neu“ und „Filterstufe 1+2, nach künstlicher Alterung“ eingegangen wurde, liegt der Fokus nun auf der Kurve „Filterstufe 1+2, nach realer Alterung“. Wie bei den künstlich gealterten Filtern steigt die Effizienz des mobilen Entstaubers von 0,18 μm bis ca. 0,4 μm an und erreicht dort eine Effizienz von über 99 %. Der Bereich unter 0,4 μm weist eine sehr gute Übereinstimmung mit den künstlich gealterten Filtern auf. Der mobile Entstauber B weist mit beiden gealterten Filterpatronensätzen eine Filtereffizienz von mindestens 93 % für Partikeldurchmesser im Bereich ab 0,18 μm auf. Dies könnte bedeuten, dass die künstliche Alterung die Filterpatronen in einen ähnlichen Zustand gebracht hat, wie es die reale Nutzung des Geräts tat. Da eine Reduzierung der Filtereffizienz, wie in Kapitel 4.4 beschrieben, jedoch untypisch für gealterte Filter ist, könnte dies wie bei den künstlich gealterten Filterpatronen begründet werden: Entweder ist es die Entladung oder die Freisetzung von Aktivkohlepartikeln. Dies wird noch im nächsten Unterkapitel diskutiert.

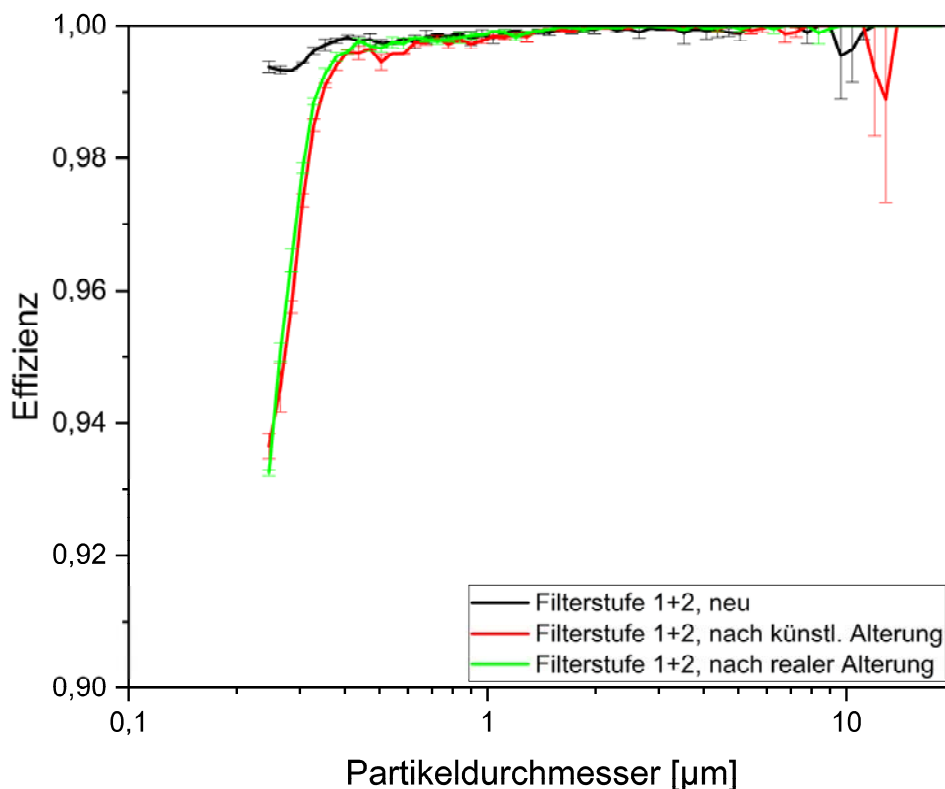


Abbildung 4-25: Effizienzmessung mobiler Entstauber B im Neuzustand, nach künstlicher und realer Alterung

In Abbildung 4-26 sind die Filtereffizienzen der Filterpatronen der verschiedenen Zustände dargestellt, welche am Prüfstand nach EN 779 gemessen wurden. Im Folgenden wird nur auf die Kurve der real gealterten Filter eingegangen, da die Kurven „Neuzustand“ und „künstlich gealtert“ bereits in Kapitel 4-4 diskutiert wurden. Die Kurve der Filtereffizienz der real gealterten Filter weisen einen ähnlichen Verlauf auf, wie die Filterpatronen im Neuzustand und somit eine höhere Effizienz als die künstlich gealterten. Die real gealterten Filterpatronen sollten durch die lange Belastung und die häufige Jet-Impulsabreinigung ebenfalls einer hohen mechanischen Belastung ausgesetzt worden sein und somit ebenfalls größere Zwischenräume innerhalb der Filter aufweisen. Da es sich bei dem Messingstaub jedoch um einen Staub handelt, welcher eine geringere mittlere Partikelgröße aufweist als der Dolomitstaub, kann die höhere Filtereffizienz anhand der im Filtermedium eingelagerten Messingpartikel erklärt werden, welche zusätzlich zur Filtereffizienz beitragen.

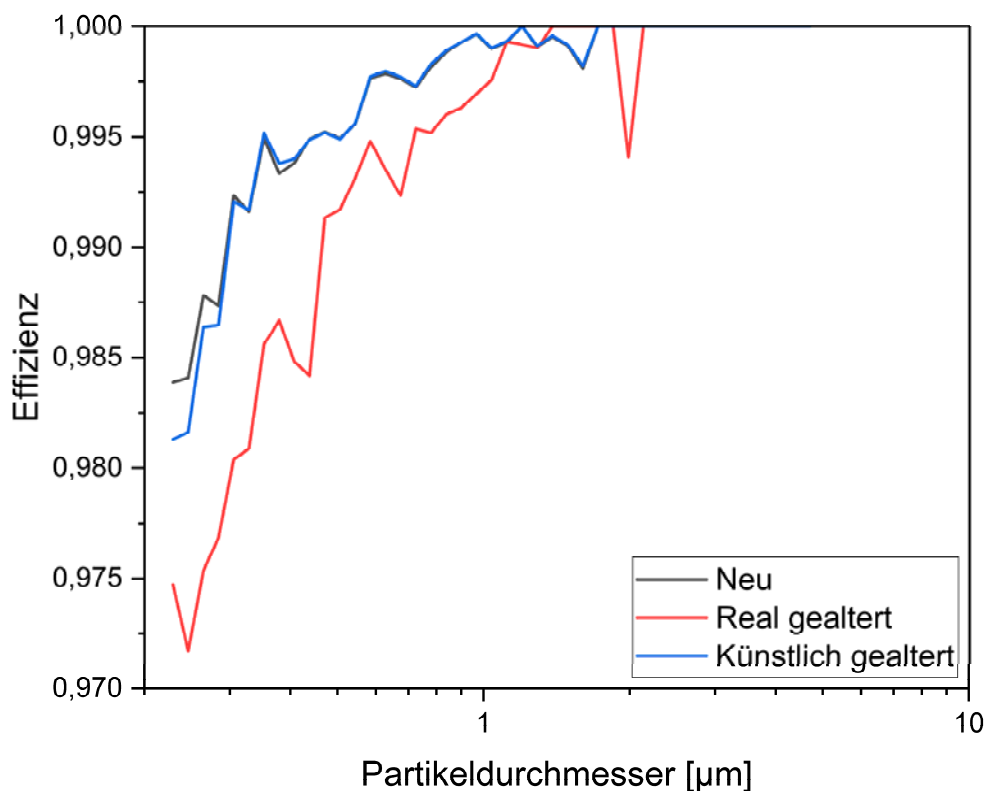


Abbildung 4-26: Effizienzmessung der Filterpatronen am Prüfkanal nach EN 779 mit DEHS im Neuzustand, nach künstlicher und realer Alterung

Neben der Filtereffizienz wurden die Filter wie im vorherigen Kapitel auch auf den Druckverlust untersucht. Hierfür wurden im Diagramm die Druckverluste der real gealterten Filter im Entstauber bzw. im Prüfkanal nach EN 779 hinzugefügt (s. Abbildung 4-27). Anhand dieser Abbildung können Ansätze zum Erfolg der künstlichen Alterung abgeleitet werden. Vergleicht man zunächst die Druckverluste der Filter, welche im Prüfkanal gemessen wurden, ist erkennbar, dass es einen deutlichen Unterschied zwischen dem Druckverlustanstieg durch künstliche und reale Alterung gibt. Durch die künstliche Alterung stieg der Druckverlust der Vorfilter um 57 Pa an. Die Vorfilter, welche im Betrieb durch einen Messingstaub gealtert wurden, weisen jedoch einen Druckverlust von 355 Pa auf, was eine Druckverluststeigerung von 307 Pa ist. Der Unterschied der Druckverlustanstiege kann zwei Ursachen haben. Zum einen könnte es ein Hinweis sein, dass die hier angewandte Methode zur Alterung der Filter die Filter nicht ausreichend belastet bzw. gealtert hat. Zum anderen könnte aber auch der zur Alterung genutzte Dolomitstaub nicht dafür geeignet sein, um im Labor die Alterung von Filtern nachzuvollziehen, die im realen Einsatz mit Messingstaub beaufschlagt werden. Ursache könnte hierbei der Unterschied in der Partikelgröße sein. Der Dolomitstaub mit einem mittleren Partikeldurchmesser von 10 µm, dringt vermutlich nicht tief genug in den Zwischenräumen der Medien ein, und wird durch die Jet-Abreinigung wieder abgetragen.

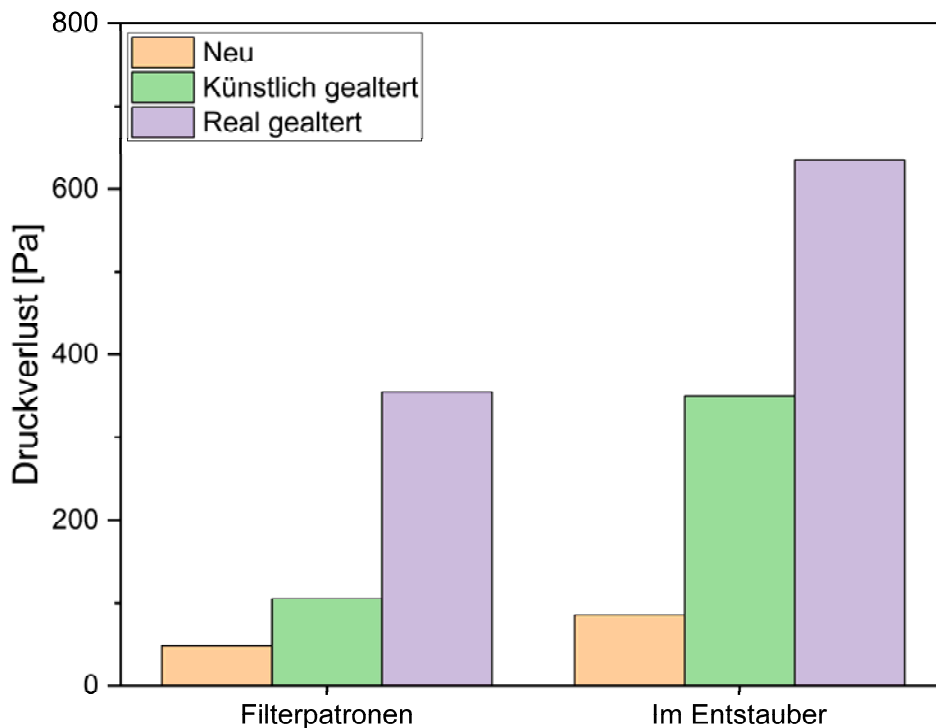


Abbildung 4-27: Druckverlust der Filterpatronen vor und nach künstlicher/realer Alterung im Prüfkanal nach EN 779 (links) und im Entstauber (rechts)

Im Kapitel 4-4 wurde die Verringerung der Filtereffizienz nach der künstlichen bzw. nach der realen Alterung durch das Lösen von Aktivkohlepartikeln aus dem nach dem Schwebstofffilter liegenden Aktivkohlefilter vermutet. Dies soll im nächsten Schritt überprüft werden. Hierfür wurden erneut Effizienzmessungen am Entstauber durchgeführt. Dabei wurden Messungen mit und ohne nachgeschaltetem Aktivkohlefilter ausgeführt. Für diese Messungen wurde erneut der zu Beginn des Projektes genutzte Dispergierer SAG 440 genutzt. Die Effizienzen wurden dabei mehrmals während der Beladung der Filter bestimmt. Das zugeführte Aerosol hatte während der Messungen Konzentrationen von 1,5 – 2 g/m³.

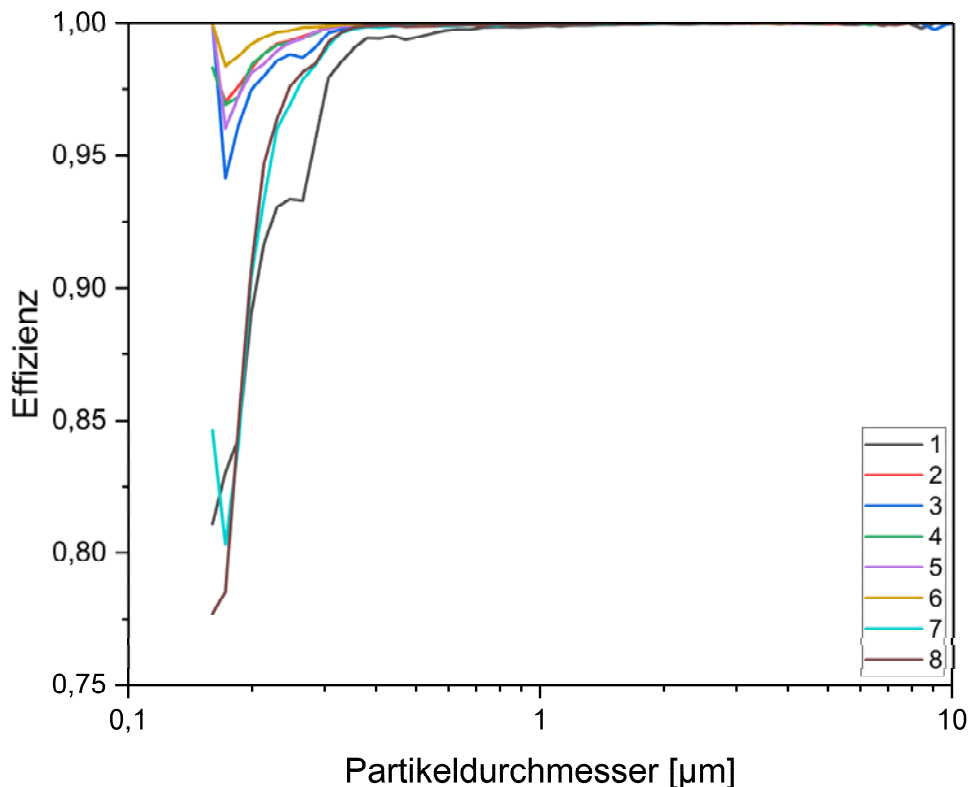


Abbildung 4-28: Effizienzmessung des Entstaubers B mit Aktivkohlefilter

Abbildung 4-28 zeigt 8 aufeinanderfolgende Effizienzmessungen mit verbautem Aktivkohlefilter. Die Kurven sind in der Reihenfolge der Durchführung der Messungen von 1 bis 8 nummeriert. Es ist zu erkennen, dass abgesehen von den Messungen 1, 7 und 8, die Effizienzen des Entstaubers über 95 % liegen. Diese Effizienzen ähneln den Ergebnissen, welche in Abbildung 4-25 abgebildet wurden. Die Schwankungen in der Effizienz, welche besonders die Messungen 1, 7 und 8 aufweisen, können anhand der geringen Partikelkonzentrationen in Roh- und Reinluft erklärt werden. Durch die geringen Konzentrationen fallen geringe Schwankungen in der Reinluft stärker ins Gewicht und resultieren in stärker abweichenden Effizienzen. Zur Verdeutlichung wurden die Partikelkonzentrationen der Roh- und der Reinluft der Messungen 1 und 2 in Abbildung 4-29 aufgetragen. Es ist zu sehen, dass die Rohluft bei einer Partikelgröße von 0,3788 µm die maximale Partikelkonzentration von 393,79 P/cm³ erreicht. Im Bereich, in dem die Effizienzen die größten Schwankungen aufweisen (Partikelgrößen <0,3 µm) liegen diese zwischen 0,21 und 358,34 P/cm³. Betrachtet man nun im Vergleich die Partikelkonzentrationen der Reinluft der Messungen 1 und

2, ist zu erkennen, dass diese deutlich unterhalb der Rohluftkonzentrationen liegen. Messung 1 zeigt ein Maximum der Partikelkonzentration von $18,65 \text{ P/cm}^3$ bei einer Partikelgröße von $0,26 \mu\text{m}$. Die maximale Partikelkonzentration von Messung 2 liegt bei einem Partikeldurchmesser von $0,2 \mu\text{m}$ bei $2,6 \text{ P/cm}^3$. Diese Schwankung in der Reinluft könnte auf das Einsaugen der Umgebungsluft und somit mögliche Erhöhung der Partikelkonzentration zurückzuführen sein.

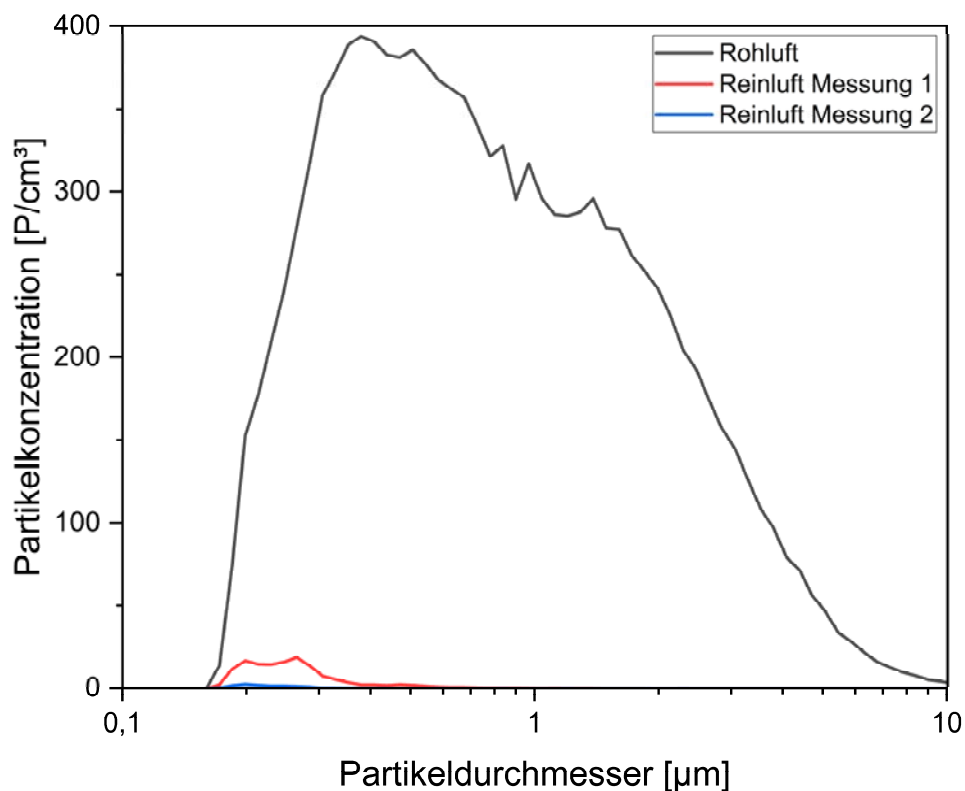


Abbildung 4-29: Partikelkonzentrationen der Rohluft und der Reinluft in den Messungen 1 und 2

Abbildung 4-30 zeigt wie Abbildung 4-28 ebenfalls 8 aufeinanderfolgende Effizienzmessungen des Entstaubers. Für diese Messungen wurde jedoch der Aktivkohlefilter entfernt, um den Einfluss von sich lösenden Aktivkohlepartikeln zu überprüfen. Es ist zu erkennen, dass bei, abgesehen von 2 Messungen, die minimalen Effizienzen des Entstaubers unter 95 % liegen. Somit besitzt der Entstauber ohne Aktivkohlefilter im Schnitt geringere Effizienzen als mit eingebautem Aktivkohlefilter. Dies würde die zuvor aufgestellte Vermutung von sich lösenden Aktivkohlepartikeln

widerrufen. Im Gegenteil kann aus diesen Ergebnissen geschlossen werden, dass der Aktivkohlefilter als zusätzliche Filterstufe zur Erhöhung der Effizienzen beiträgt.

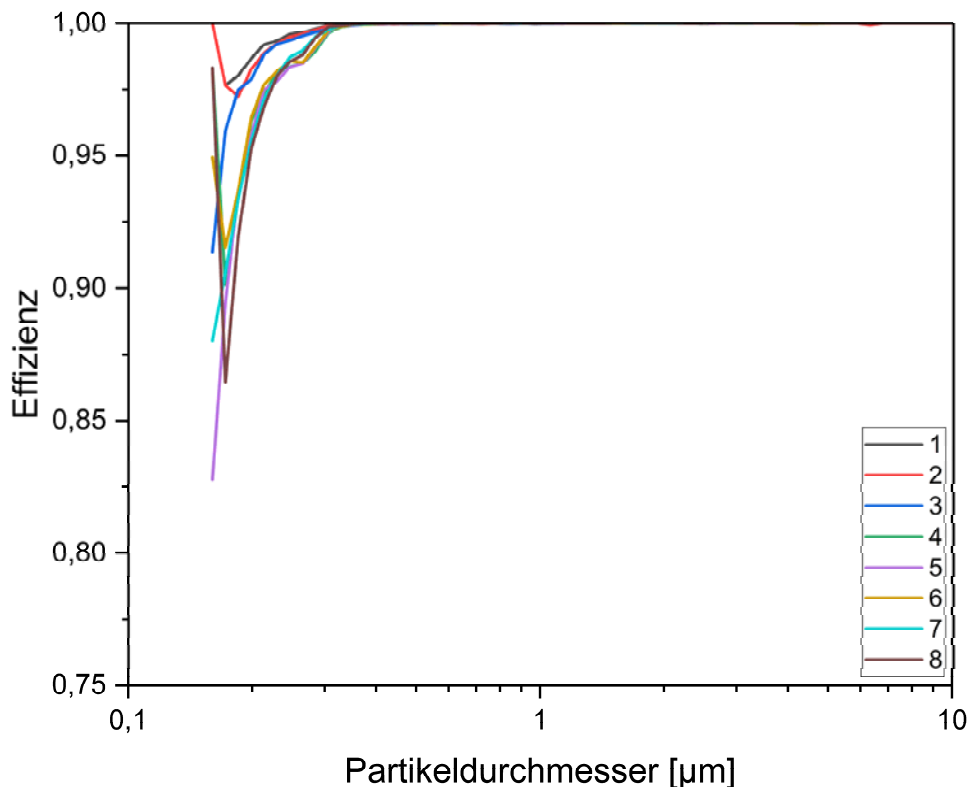


Abbildung 4-30: Effizienzmessungen des Entstaubers B ohne Aktivkohlefilter

4.6 Prüfung von Filtermedien im Neuzustand und nach Schnellalterung / AP 5 (FE 1)

Neben der Untersuchung des gesamten Entstaubers bzw. der Filter in Filterprüfständen, sollte ebenfalls untersucht werden, ob das Realverhalten anhand günstiger Medientests abgebildet werden kann. Verglichen wurden hierbei, wie zuvor auch, Druckverlust und Fraktionsabscheidegrade der Filtermedien. Die Messung des Fraktionsabscheidegrades erfolgte mittels eines SMPS-Aufbaus bestehend aus einem Differenziellen Mobilitätsanalysator (DMA), zwei Neutralisatoren und einem Kondensationspartikelzähler (CPC). Die Probenahme erfolgte ausschließlich hinter der Medienhalterung. Aufgrund dieser Anordnung waren für die Messungen des Fraktionsabscheidegrades immer zwei Konzentrationsmessungen notwendig. Zuerst

eine Messung ohne Medium, um die Partikelkonzentration im Aerosol zu bestimmen. Danach erfolgte die Messung mit eingelegtem Medium. Das bereitgestellte Aerosol bestand aus DEHS. Dieser Prüfstand ist in Abbildung 4-31 dargestellt.

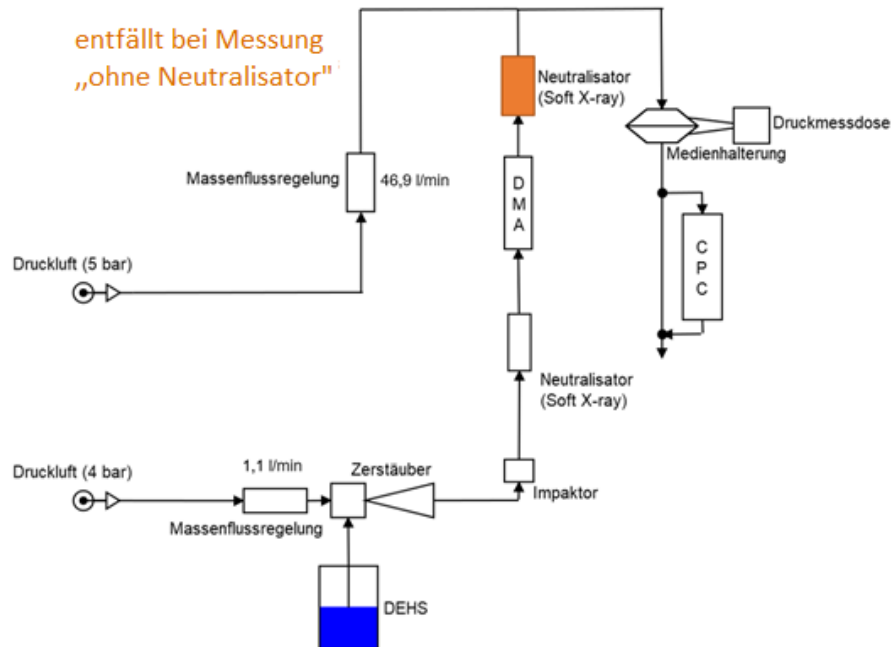


Abbildung 4-31: Schematischer Aufbau des Prüfstandes zur Messung der Fraktionsabscheidegrade von Ronden im Neuzustand und nach der Alterung

Um Messungen am Filtermedienprüfstand nach EN 1822 durchführen zu können, wurden aus den Filterpatronen Teile ausgeschnitten, aus denen Ronden mit einem Durchmesser von 12,5 cm herausgetrennt wurden. Aufgrund der Plissierung der Filterpatronen wurden die herausgeschnittenen Ronden glattgedrückt, um die Dichtheit der Filtermedienhalterung zu gewährleisten. Eine solche glattgedrückte Ronde ist in Abbildung 4-32 zu sehen. Die durchströmte Fläche der Filtermedien betrug 100 cm². Mit variierendem Volumenstrom konnte somit die gewünschte Anströmgeschwindigkeit erreicht werden. Bei diesen Messungen lag die Anströmgeschwindigkeit bei 11 cm/s. Die verwendete Messdose MKS 223B hat im verwendeten Messbereich (bis 1000 Pa) einen Messfehler von 0,3 % vom Endwert. Das würde in diesem Fall zu einem Fehler von 3 Pa führen. Pro Ronde wurden drei Messungen durchgeführt, aus denen die Fraktionsabscheidegrade bestimmt wurden. Die Ergebnisse aus diesen drei Messungen wurden gemittelt.



Abbildung 4-32: Aus der Filterpatrone herausgeschnittene, glattgedrückte Ronde zur Messung am Filtermedienprüfstand

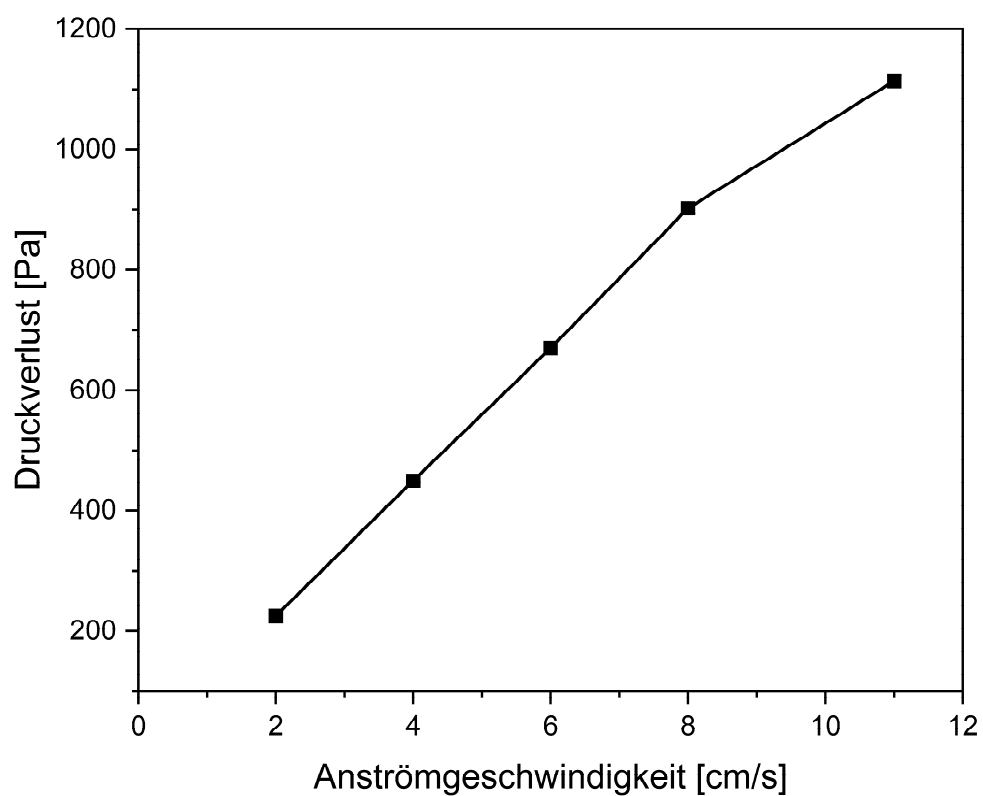


Abbildung 4-33: Druckverlust des Filtermediums im Neuzustand bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten

In Abbildung 4-33 ist der aus drei Messungen gemittelte Druckverlust eines Filtermediums im Neuzustand bei Anströmgeschwindigkeiten von 2 bis 11 cm/s dargestellt. Der Druckverlust steigt, wie erwartet, linear von 225 Pa bei 2 cm/s bis zu einem Druckverlust von 902 Pa bei einer Anströmgeschwindigkeit von 8 cm/s. Bei 11 cm/s ergibt sich eine geringe Abweichung von der Linearität. Es fällt auf, dass die hier gemessenen Druckverluste am Filtermedium deutlich höher sind als die am Entstauber oder im Prüfkanal gemessenen Druckverluste der gesamten Patronenfilter. Bei einer insgesamten Filterfläche von 24 m² (Summe der Filterflächen aller vier Filter) und einem Volumenstrom von 800 m³/h ergibt sich im Entstauber eine Anströmgeschwindigkeit von 0,93 cm/s. Um zu überprüfen, ob die am Entstauber bzw. am Prüfkanal gemessenen Druckverluste zu den am Filtermedienprüfstand gemessenen Druckverlusten passen, wurde eine Trendlinie durch die Messpunkte gelegt und die folgende lineare Gleichung bestimmt

$$\Delta p = 16,741 \frac{Pa * s}{cm} * v + 49,43 Pa$$

Wird dort die im Entstauber vorliegende Anströmgeschwindigkeit von 0,93 cm/s eingesetzt, ergibt sich ein Druckverlust von 65 Pa. Somit liegt der am Filtermedienprüfstand gemessene Druckverlust zwischen den am Prüfkanal gemessenen Druckverlust von 48 Pa und dem im Entstauber gemessenen Druckverlust von 86 Pa.

Neben den Druckverlusten sollten auch Fraktionsabscheidegrade mit vorherigen Messungen am gesamten Abscheider bzw. mit den Ergebnissen aus den Messungen am Prüfkanal verglichen werden. Abbildung 4-34 zeigt die Filtereffizienz der Filterrunde im Neuzustand. Der Graph zeigt den Mittelwert und die Standardabweichung aus drei Messungen. Das Filtermedium im Neuzustand weist bei einem Partikeldurchmesser von 0,03 µm die geringste Effizienz von 97 % auf. Bis zu einem Durchmesser von 0,1 µm steigt die Filtereffizienz auf nahezu 100 % an.

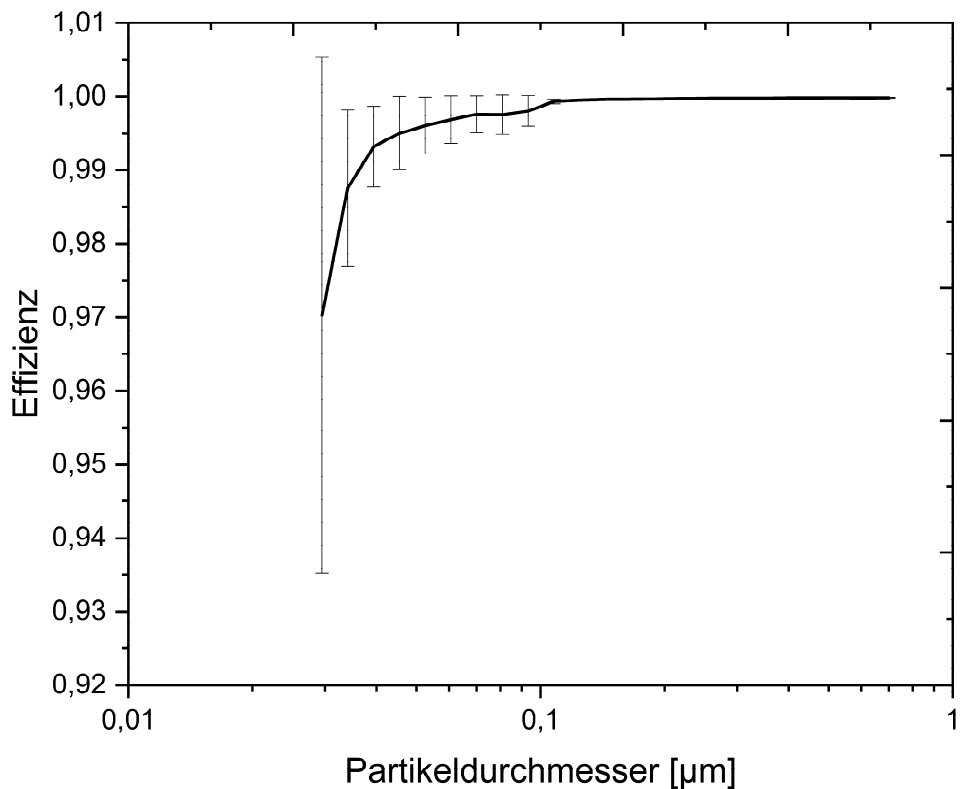


Abbildung 4-34: Effizienzmessung der aus der Filterpatrone herausgeschnittenen Ronde

Im weiteren Verlauf dieses Arbeitspaketes waren Untersuchungen der real und künstlich gealterten Filter geplant. Diese sollten, wie die Filter im Neuzustand, aus den vorhandenen Filterpatronen herausgeschnitten werden, damit diese am Filtermedienprüfstand vermessen werden können. Dies erwies sich jedoch als problematischer als anfänglich gedacht. Das erste Problem zeigte sich nach dem Transport der Filterpatronen. Der durch die Alterung bzw. durch die Nutzung der Filter im realen Betrieb aufgebaute Filterkuchen platzte zum Großteil während des Transports ab und fand sich somit innerhalb der Transporttüte wieder. Wie viel Staub hierbei vom Filter abgetragen wurde, ist in Abbildung 4-35 zu sehen.



Abbildung 4-35: Durch den Transport abgeplatzter Filterkuchen

Zusätzlich war bei der weiteren Verarbeitung der Filterpatronen zu erkennen, dass es bei quasi jeder durchgeführten Tätigkeit sehr schnell zum Abplatzen des beaufschlagten Staubs gekommen ist.



Abbildung 4-36: Durch das Abstellen der Filterpatrone abgelöster Staub (links) und durch das Herausschneiden des Filtermediums aus der Filterpatrone abgelöster Staub (rechts)

Zwei Beispiele sind in Abbildung 4-36 zu sehen. Dort ist in der linken Abbildung zu sehen, dass selbst die kleinsten Tätigkeiten, wie beispielsweise schon das Abstellen der Filterpatrone bereits dafür sorgt, dass es zum Abplatzen des aufgetragenen Filterkuchens kommt. Eine weitaus größere Menge Staub hat sich beim Herausschneiden der Filtermedien aus der Filterpatrone abgelöst. Dies ist im rechten Bild der Abbildung 4-36 erkennbar.

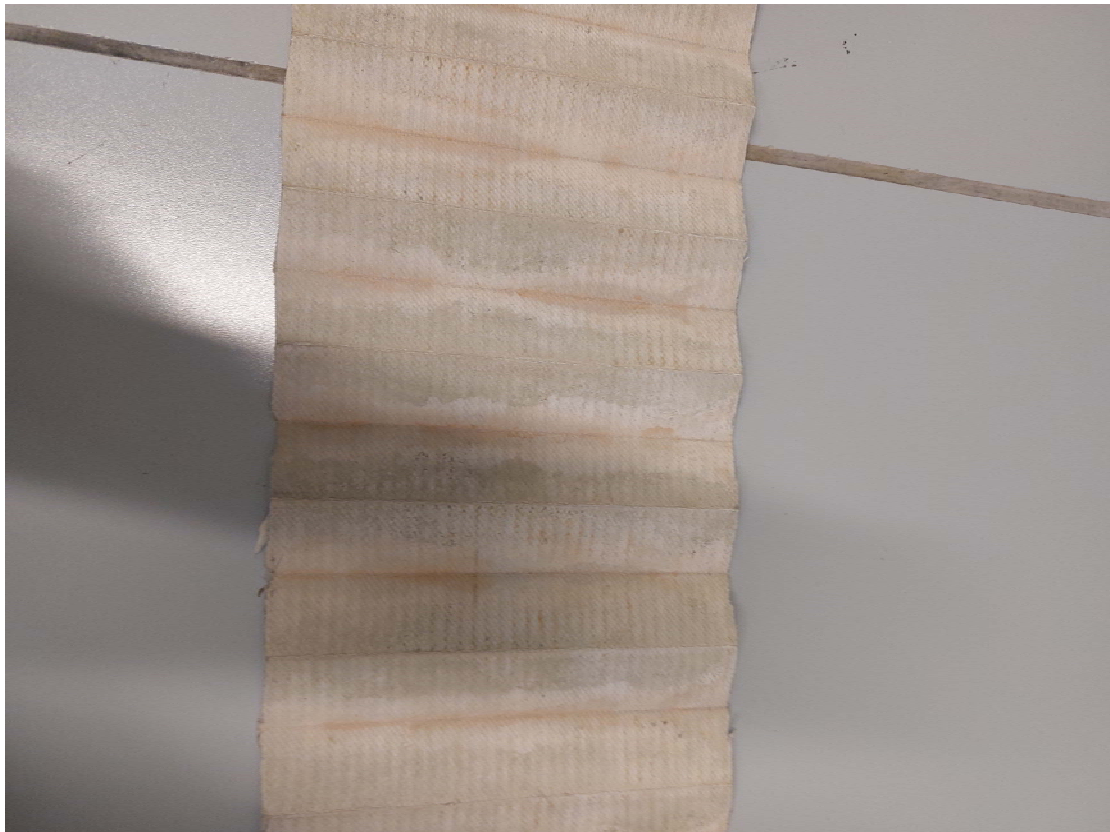


Abbildung 4-37: Aus der real gealterten Filterpatrone herausgeschnittenes Filtermedium

In Abbildung 4-37 ist das aus der Filterpatrone herausgeschnittene Filtermedium zu sehen. Es ist deutlich erkennbar, dass der Filterkuchen nicht mehr gleichmäßig auf dem Filter verteilt ist. Hierbei zeigen die grünen Bereiche den aus Messingstaub bestehenden Filterkuchen. Aufgrund dieser sehr inhomogenen Staubschicht war die weitere Prüfung der Filtermedien aus der Anwendung nicht aussagekräftig umsetzbar. Aus Gründen der Arbeitssicherheit ist die Feinstaubfreisetzung beim Handling problematisch.

4.7 Klassierung der PM₁-, PM_{2,5}- und PM₁₀-Abscheidegrade/ AP 6 (FE 1)

Im Verlauf des Projekts wurden die Entstauber A und B nicht nur auf die Druckverluste und Fraktionsabscheidegrade untersucht. Zusätzlich wurden durch den Fidas 200 S PM_x-Fraktionen auf der Roh- und Reingasseite erfasst. Diese wurden genutzt, um PM_x-Abscheidegrade zu bestimmen. Die Abscheidegrade wurden anhand der folgenden Gleichung bestimmt:

$$PM_x - \text{Abscheidegrad} = 1 - \frac{PM_{x,\text{Reingas}}}{PM_{x,\text{Rohgas}}}$$

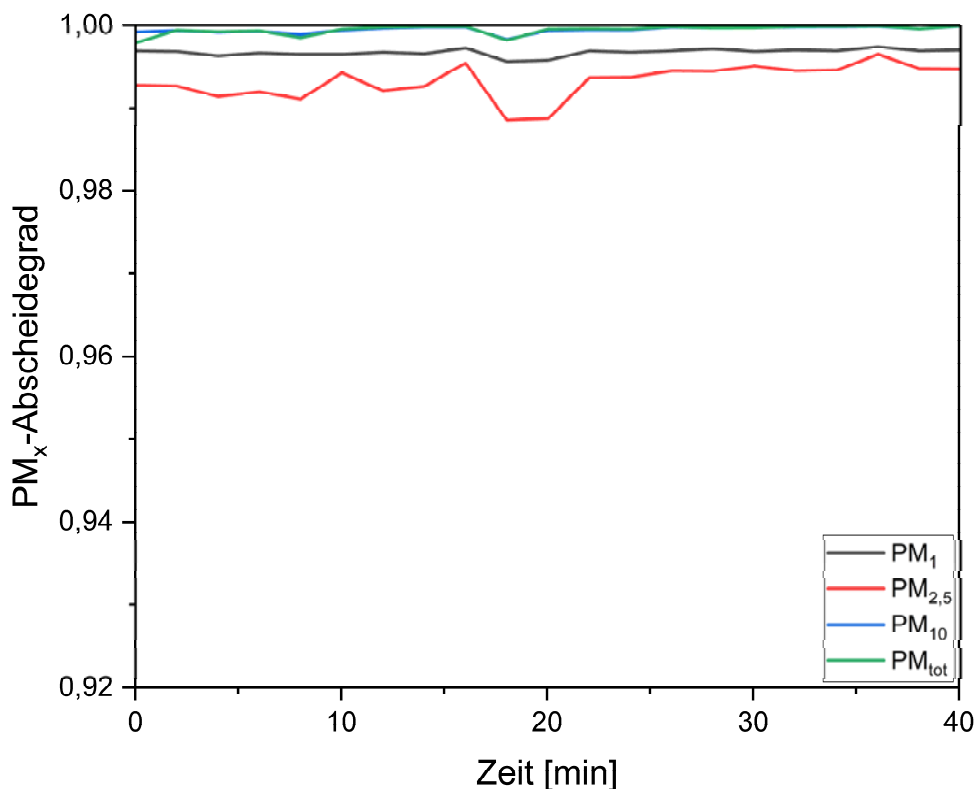


Abbildung 4-38: PM_x-Abscheidegrad Entstauber B im Neuzustand, Filterstufe 1+2, 3 g/m³ Aerosolkonzentration

Abbildung 4-38 zeigt die PM_x-Abscheidegrade des mobilen Entstaubers B im Neuzustand. Während dieses Versuchs waren beide Filterstufen im Entstauber verbaut und die Rohgaskonzentration lag bei 3 g/m³. Die PM_x-Abscheidegrade liegen

für alle gemessenen Fraktionen (PM_1 , $PM_{2,5}$, PM_{10} und PM_{tot}) bei über 99 %. Hierbei weist der mobile Entstauber die geringste Abscheideleistung für die $PM_{2,5}$ -Fraktion auf.

In Abbildung 4-39 sind die PM_x -Abscheidegrade des mobilen Entstaubers B mit real gealterten Filtern abgebildet. Auch während dieses Versuchs waren beide Filterstufen im Entstauber verbaut. Um die real gealterten Filter mit den Filtern im Neuzustand zu vergleichen, wurde auch bei diesem Versuch eine Aerosolkonzentration von 3 g/m^3 eingestellt. Für die Partikelfraktionen PM_{10} und PM_{tot} liegen die Abscheidegrade unverändert bei nahezu 100 %. Ein Unterschied ist jedoch für die Partikelfraktionen PM_1 und $PM_{2,5}$ zu erkennen. Der PM_1 -Abscheidegrad sank auf einen Wert von 99 % ab. Der $PM_{2,5}$ -Abscheidegrad sank zu Beginn des Versuchs sogar auf einen Wert von 98 %, welcher im weiteren Verlauf ebenfalls auf 99 % ansteigt. Die Senkung der PM_1 - und $PM_{2,5}$ -Abscheidegrade können auf die Vergrößerung von Zwischenräumen innerhalb der Filter aufgrund der häufigen Jetpuls-Abreinigung zurückgeführt werden.

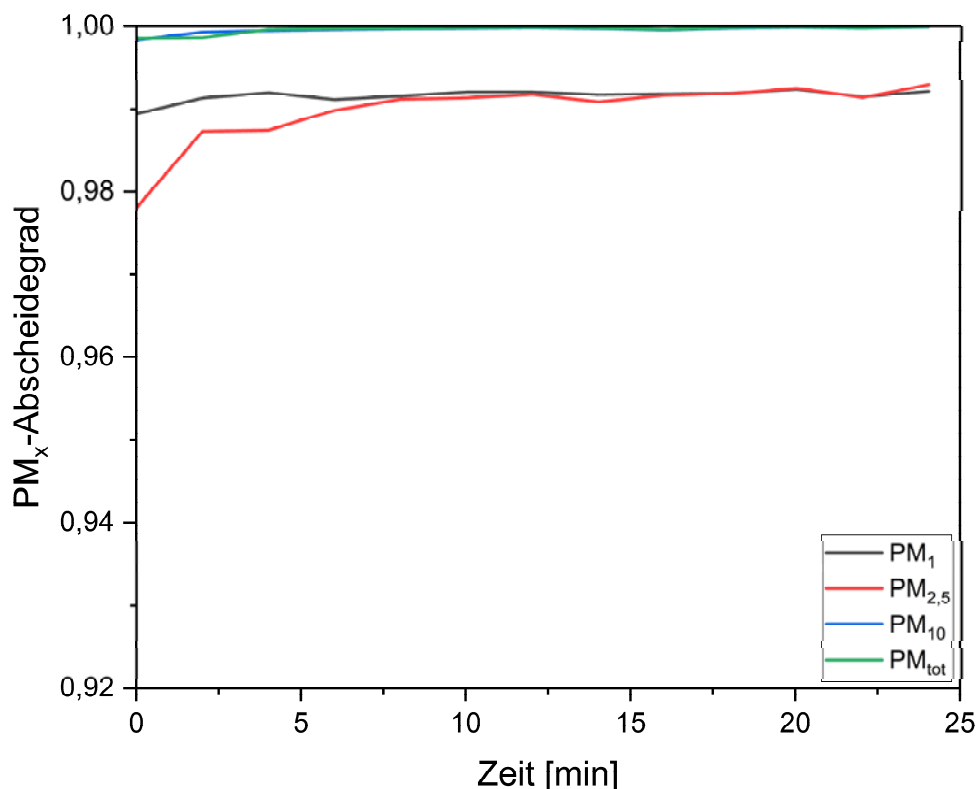


Abbildung 4-39: PM_x -Abscheidegrad Entstauber B mit real gealterten Filtern, Filterstufe 1+2, 3 g/m^3 Aerosolkonzentration

Zusätzlich zu den Untersuchungen der PM_x -Abscheidegrade während des Betriebs des mobilen Entstaubers, wurden auch PM_x -Abscheidegrade während der Alterung bestimmt und grafisch dargestellt. Abbildung 4-40 zeigt die PM_x -Abscheidegrade des Entstaubers B während der Schnellalterung. Während des Versuchs waren erneut beide Filterstufen im Gerät verbaut. Die Aerosolkonzentration lag hierbei jedoch bei 5 g/m^3 . Die Abreinigung fand während der Schnellalterung alle 15 Sekunden statt. In der Grafik ist zu erkennen, dass die PM_{10} - und PM_{tot} -Abscheidegrade erneut bei nahezu 100 % liegen. Die PM_1 - und $PM_{2,5}$ -Abscheidegrade bewegen sich zwischen Werten von 97 und 98 % (PM_1) und zwischen 93 und 98,5 % ($PM_{2,5}$). Während der Alterung kam es erwartungsgemäß zu stärkeren Schwankungen der Abscheidegrade, da durch die Abreinigung der Filter für den Zeitraum zwischen Entfernen des Filterkuchens und Aufbau eines neuen Filterkuchens weniger Partikel durch die Filter abgeschieden werden.

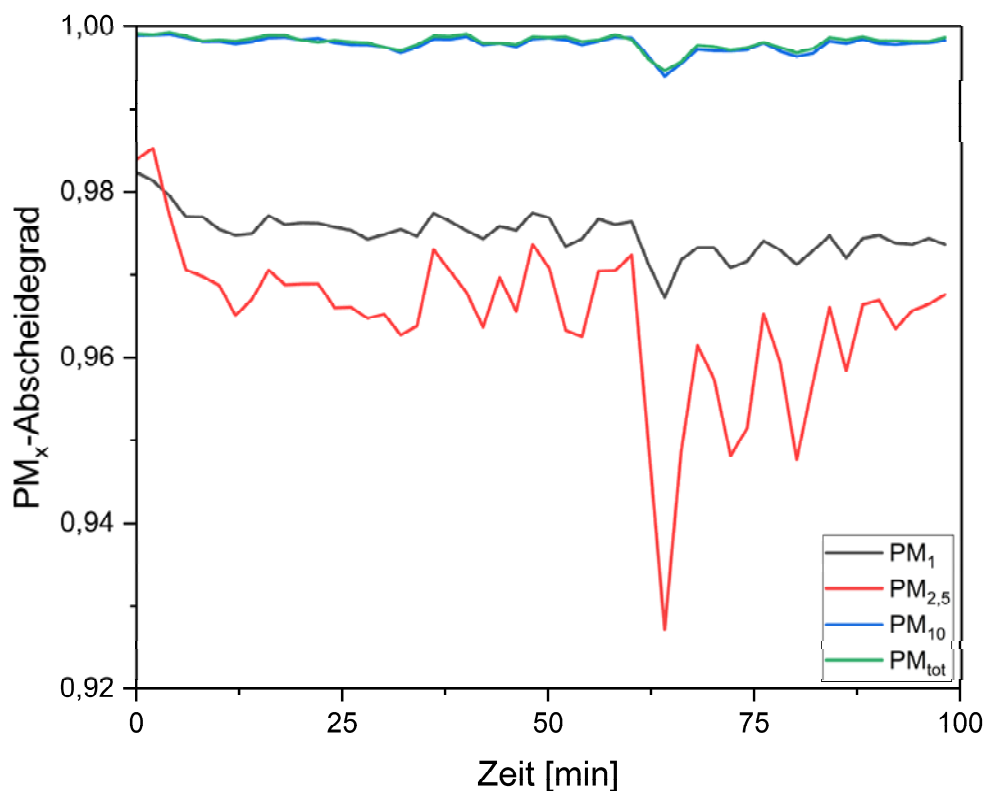


Abbildung 4-40: PM_x -Abscheidegrad Entstauber B während der Alterung, Filterstufe 1+2, 5 g/m^3 Aerosolkonzentration, Abreinigung alle 15 s

Abbildung 4-41 bildet ebenfalls die PM_x -Abscheidegrade während der Alterung ab. Während dieses Versuchs wurde die Aerosolkonzentration im Rohgas jedoch auf 10 g/m^3 erhöht. Obwohl durch die höhere Belastung der Filter mit einer Verringerung der Abscheidegrade zu rechnen war, ist in diesem Fall Gegenteiliges erkennbar. Wie bei den vorherigen Versuchen liegen die PM_{10} - und PM_{tot} -Abscheidegrade erneut bei ca. 100 %. Die PM_1 - und $PM_{2,5}$ -Abscheidegrade sind jedoch auf die Werte 99 % (PM_1) und 98 % ($PM_{2,5}$) angestiegen. Dies könnte sich anhand der Kombination aus Versuchsbedingungen und Messmethodik erklären lassen. Durch die erhöhte Aerosolkonzentration im Rohgas entsteht nach der Abreinigung der Filter der Filterkuchen früher. In Kombination mit der nur alle 2-minütigen Aktualisierung der PM_x -Werte kann der kurze Anstieg der jeweiligen Partikelkonzentrationen nicht durch den Fidas 200 S aufgenommen werden.

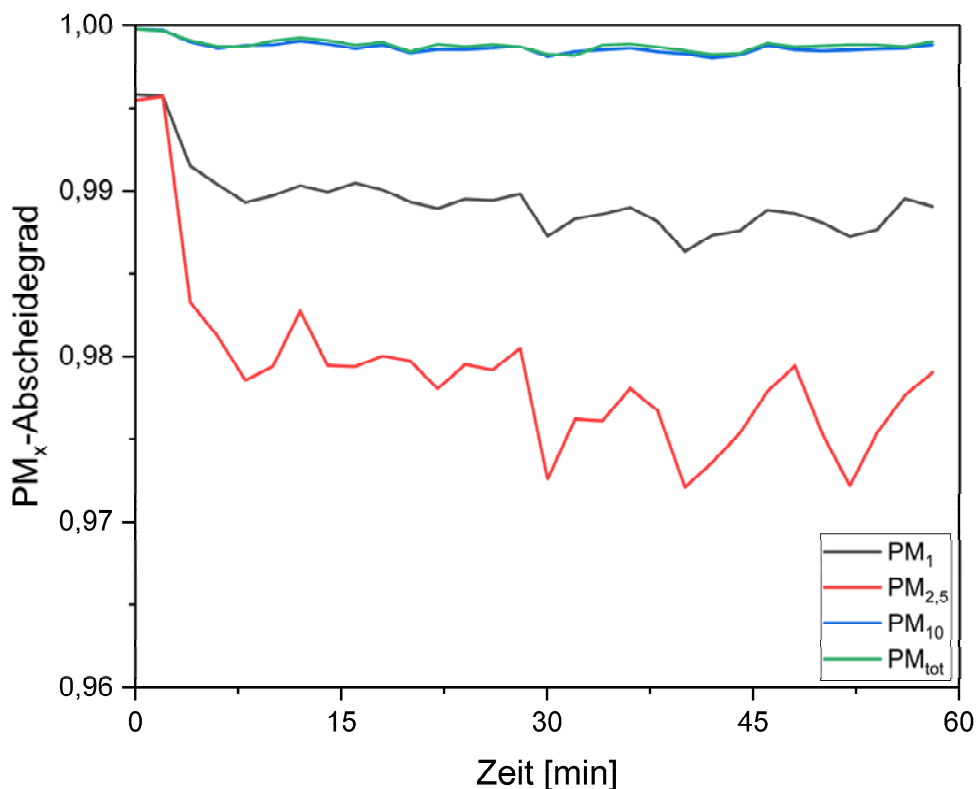


Abbildung 4-41: PM_x -Abscheidegrad Entstauber B während der Alterung, Filterstufe 1+2, 10 g/m^3 Aerosolkonzentration, Abreinigung alle 15 s

Neben der Aerosolkonzentration wurde für eine höhere Beanspruchung der Filter auch die Pausenzeit zwischen den Abreinigungen variiert. In Abbildung 4-42 sind die PM_x -

Abscheidegrade des mobilen Entstaubers B während der Alterung abgebildet. Die Aerosolkonzentration im Rohgas blieb im Vergleich zum Versuch aus Abbildung 4-41 unverändert bei 10 g/m^3 . Für den Versuch aus Abbildung 4-42 wurde jedoch die Pausenzeit zwischen der Abreinigung der Filter von 15 s auf 10 s verringert. Für die Abscheidegrade der Partikelfractionen PM_{10} und PM_{tot} sind erneut Werte nahe der 100 % zu erkennen. Für den PM_1 -Abscheidegrad ist keine Veränderung aufgrund der geänderten Abreinigung zu erkennen. Der $\text{PM}_{2,5}$ -Abscheidegrad zeigt jedoch eine weitere Verringerung von vorher 98 % auf 97 %.

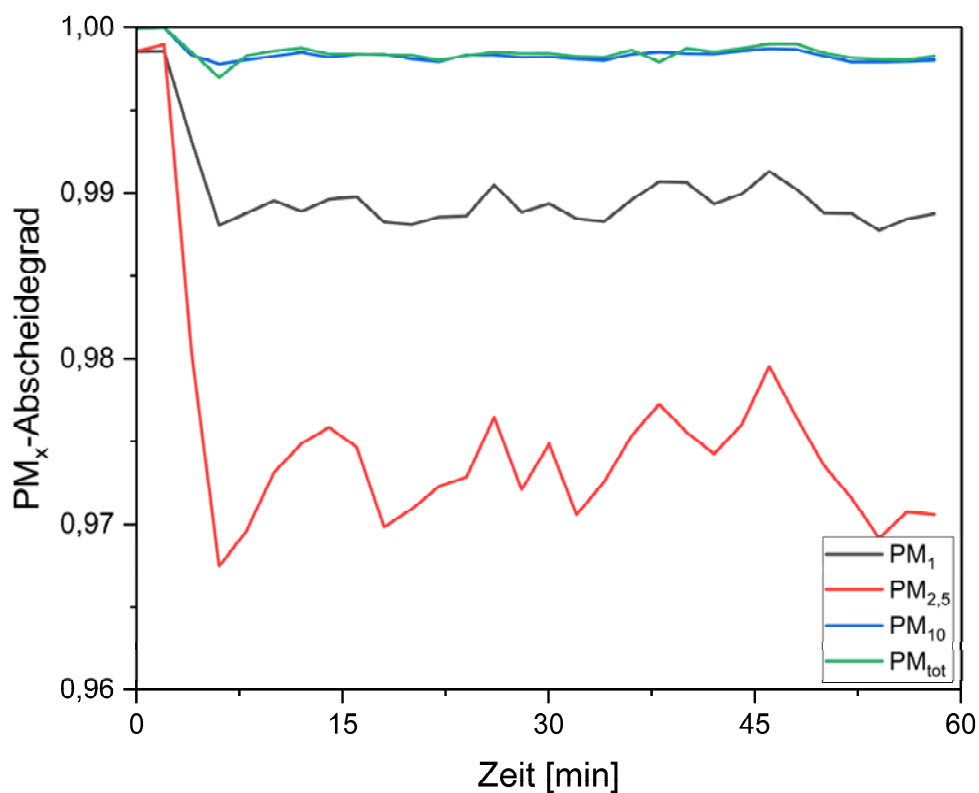


Abbildung 4-42: PM_x -Abscheidegrad Entstauber B während der Alterung, Filterstufe 1+2, 10 g/m^3 Aerosolkonzentration, Abreinigung alle 10 s

Da die Alterungsprozedur mit der dazugehörigen hohen Anzahl an Druckluftstoßabreinigungen nur auf die Filterstufe 1 (4 Vorfilter) angewendet wird, wurden diese im folgenden Versuch einzeln (ohne Filterstufe 2) betrachtet. Die Versuchsbedingungen wurden im Vergleich zum Versuch der Abbildung 4-42 nicht verändert (Aerosolkonzentration im Rohgas: 10 g/m^3 , Abreinigung alle 10 s). Die aus den Messergebnissen des Versuchs bestimmten PM_x -Abscheidegrade sind in

Abbildung 4-43 dargestellt. Die Abscheidegrade bezüglich größerer Partikel (PM_{10} und PM_{tot}) zeigen, wie in den vorherigen Versuchen auch, erneut Abscheidegrade nahe der 100 %. Ein deutlicher Unterschied zu den vorherigen Versuchen ist bei den PM_x -Abscheidegraden der Größenordnung PM_1 und $PM_{2,5}$ zu erkennen. Diese sind beide stark abgesunken (PM_1 -Abscheidegrade: ca. 91 %, $PM_{2,5}$ -Abscheidegrad: ca. 88 %) und weisen ebenfalls größere Schwankungen auf. Die Verringerung der Abscheidegrade lässt sich auf den fehlenden Schwebstofffilter (H14 HEPA) der Filterstufe 2 zurückführen. Durch den fehlenden Filter haben die Schwankungen aufgrund der andauernden Abreinigung ebenfalls einen größeren Einfluss.

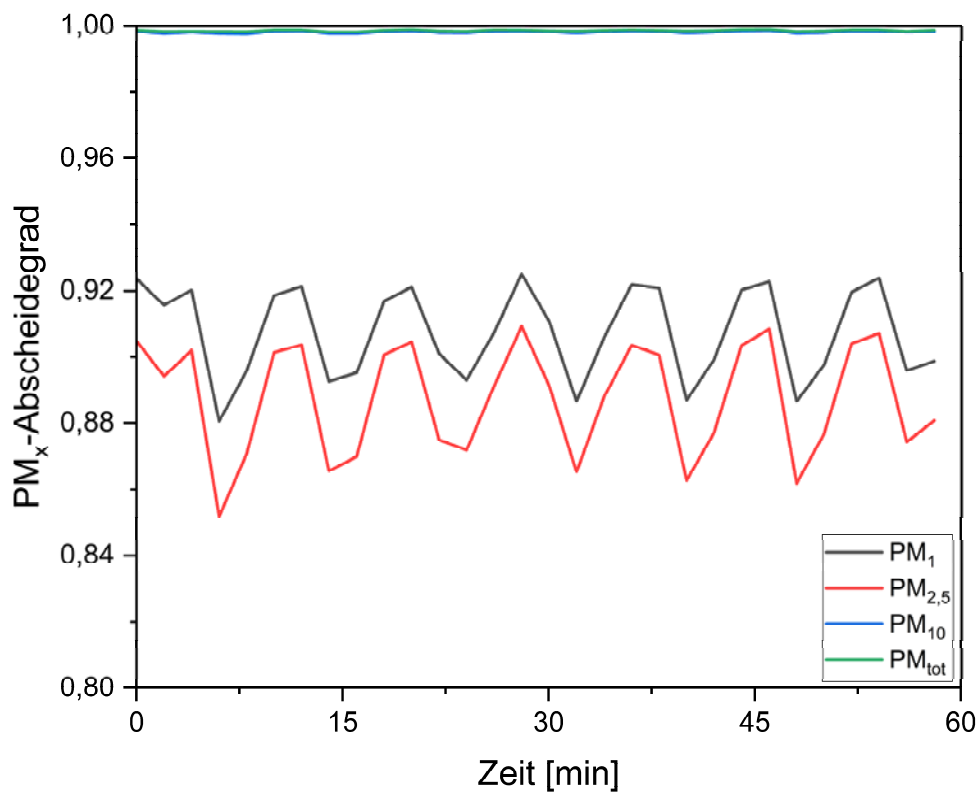


Abbildung 4-43: PM_x -Abscheidegrad Entstauber B während der Alterung, Filterstufe 1, 10 g/m^3 Aerosolkonzentration, Abreinigung alle 10 s

4.8 Modellierung des Abscheideverhaltens und des Abreinigungszyklus / AP 7 (FE 2)

In diesem Arbeitspaket wurde die Strömungssituation innerhalb eines Abscheiders mittels numerischer Strömungssimulation abgebildet. Hierzu wurde auf die kommerzielle Software ANSYS Fluent zur numerischen Berechnung dynamischer Prozesse des Stoff- und Energietransports in strömenden Systemen zurückgegriffen.

Die numerischen Berechnungen sollten Aufschluss darüber geben, welche Bereiche am stärksten mit Partikeln belastet werden und in denen die Filterpatronen als erstes verblocken. Es wurde der Rohgasraum eines der mobilen Entstauber, der in den vorherigen Abschnitten experimentell untersucht wurde, in einem dreidimensionalen Modell abgebildet (Abbildung 4-44).

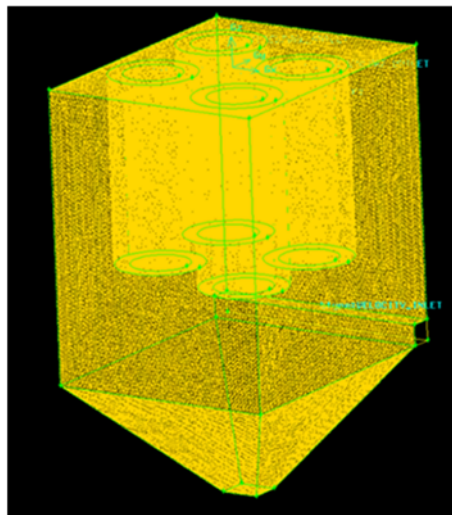


Abbildung 4-44: Rechengitter des verwendeten Modells

Der Rohgasraum mit den vier Filterpatronen hat die Abmessungen in der Breite, Höhe und Tiefe von ca. 545 mm x 700 mm x 690 mm. Die Berechnungen wurden für einen Nennvolumenstrom von 800 m³/h durchgeführt. Abbildung 4-45 zeigt die Anordnung der Filterpatronen im Abscheider und den Rohgaseintritt an der hinteren Wand.

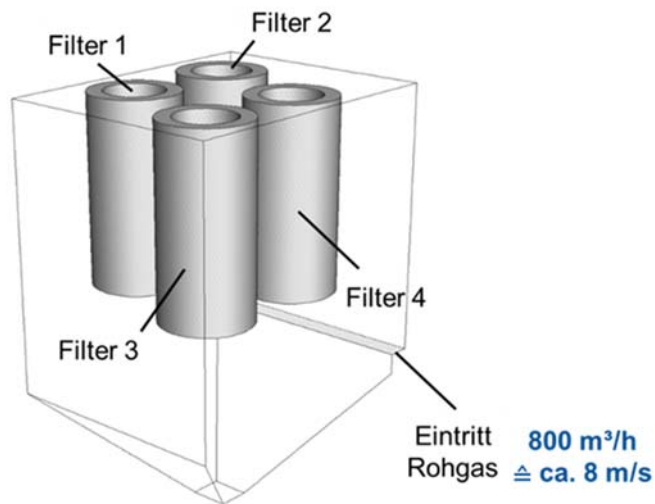


Abbildung 4-45: Anordnung und Bezeichnung der Filterpatronen in der Filterkammer mit Rohgaseintritt

Das Reingas verlässt die Kammer des Abscheiders über die vier Filterpatronen-Auslässe in der Decke. Die Filterpatronen haben einen Außendurchmesser von 210 mm und eine Höhe von 450 mm mit jeweils einer Filterfläche von 4,5 m².

Die Filterpatronen wurden als poröse Medien betrachtet, d. h. die einzelnen Falten wurden geometrisch nicht aufgelöst. Die Permeabilität k lässt sich bei bekannter mittlerer Filteranströmgeschwindigkeit und dem Druckverlust bei dieser Geschwindigkeit nach Darcy wie folgt berechnet:

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

mit:

η [Pa s] = dynamische Viskosität der Luft

s [m] = Dicke des porösen Mediums

v [m/s] = mittlere Filtrationsgeschwindigkeit

Δp [Pa] = Druckverlust des porösen Mediums

Für die Filtration vorteilhaft ist sowohl eine gleichförmige Beladung der Filterpatronen über der Höhe als auch eine gleichartige Beladung der vier Filterpatronen. Um Aussagen über die Beladung zu treffen, wurden ausgehend von dem numerisch bestimmten Strömungsfeld in der Rohgaskammer einzelne Trajektorien für Partikel mit einem Durchmesser von 1 μm und 10 μm berechnet.

Die Startpositionen der Partikeltrajektorien waren äquidistant über dem Eintritt des Rohgases verteilt. Zur Auswertung der Beladung wurden die prozentualen Anteile der auf den Wänden und den Filterpatronen auftreffenden bzw. abgeschiedenen Partikel ermittelt. Für eine detailliertere Beurteilung wurden die Patronen jeweils in drei Zonen „Oben“, „Mitte“, „Unten“ unterteilt.

Ergänzend zu den Berechnungen des Ist-Zustandes wurden Variationen der Rohgaszuführung und der Filterpatronengeometrie betrachtet, die zu einer gleichförmigeren Beaufschlagung führen sollten.

Abbildung 4-46 bis Abbildung 4-48 zeigen die berechneten Geschwindigkeiten als Konturplots in unterschiedlichen Schnittebenen für den Ist-Zustand des betrachteten Abscheiders. Die Berechnungen wurden mit einem Druckverlust der Filterpatronen von 2.000 Pa durchgeführt. In Abbildung 4-46 ist die Geschwindigkeit in einer vertikalen Schnittebene zwischen den Filtern 1, 2 und den Filtern 3, 4 dargestellt. In der linken Abbildung sind die Filterpatronen mit abgebildet und um das Geschwindigkeitsprofil besser zu erkennen sind sie in der rechten Abbildung ausgeblendet. Abbildung 4-47 zeigt die Geschwindigkeitsprofile in vertikalen Schnittebenen, die durch die Filterpatronen gelegt wurden, ohne eingeblendete Filterpatronen. Geschwindigkeitsplots für eine horizontalen Schnittebene im unteren Bereich der Filterpatronen für die Berechnung des Ist-Zustandes zeigt Abbildung 4-48 mit (links) und ohne (rechts) eingeblendete Filterpatronen. Für dieselbe Ebene ist in Abbildung 4-49 die Druckverteilung als Plot dargestellt.

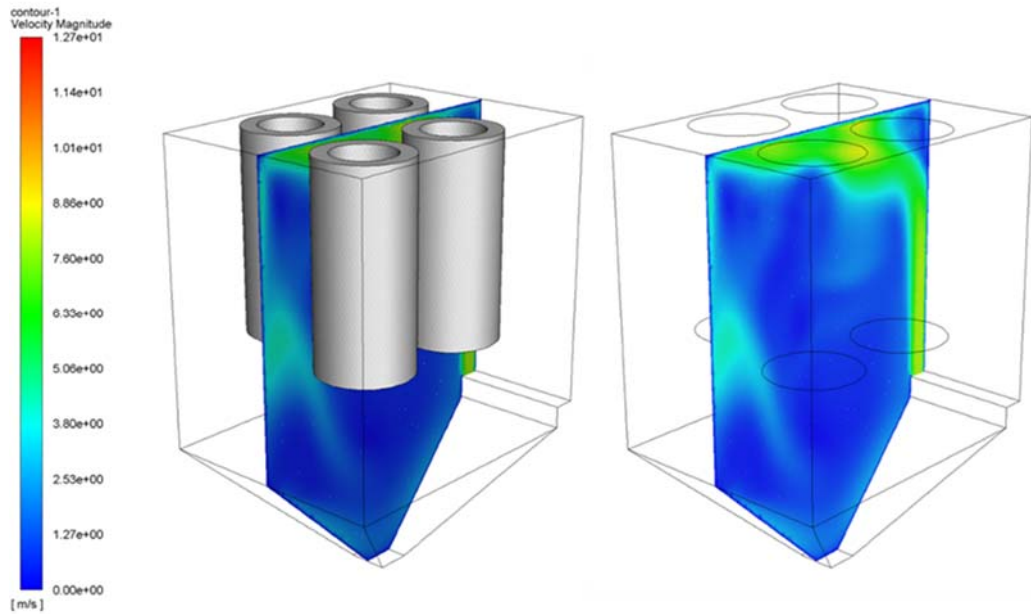


Abbildung 4-46: Geschwindigkeitsplots in einer mittleren vertikalen Ebene zwischen den Filterpatronen für die Berechnung des Ist-Zustandes (links: Darstellung mit eingeblendeten Filterpatronen, rechts: Darstellung ohne eingeblendete Filterpatronen)

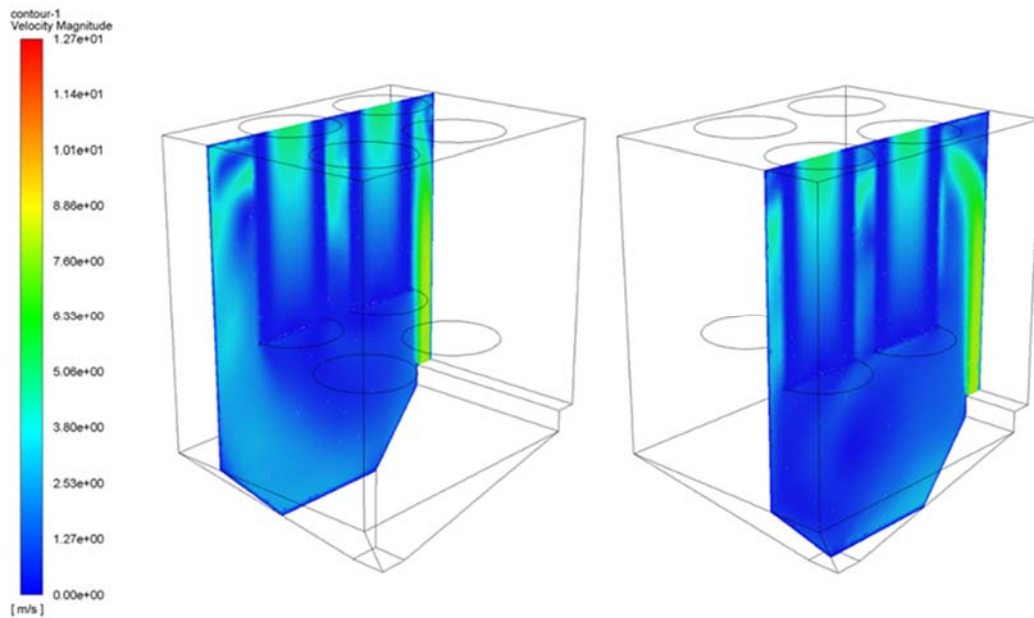


Abbildung 4-47: Geschwindigkeitsplots in der vertikalen Ebene in der Mitte der Filterpatronen 1 und 2 (links) und in der Mitte der Filterpatronen 3 und 4 (rechts) für die Berechnung des Ist-Zustandes (Darstellung ohne eingeblendete Filterpatronen)

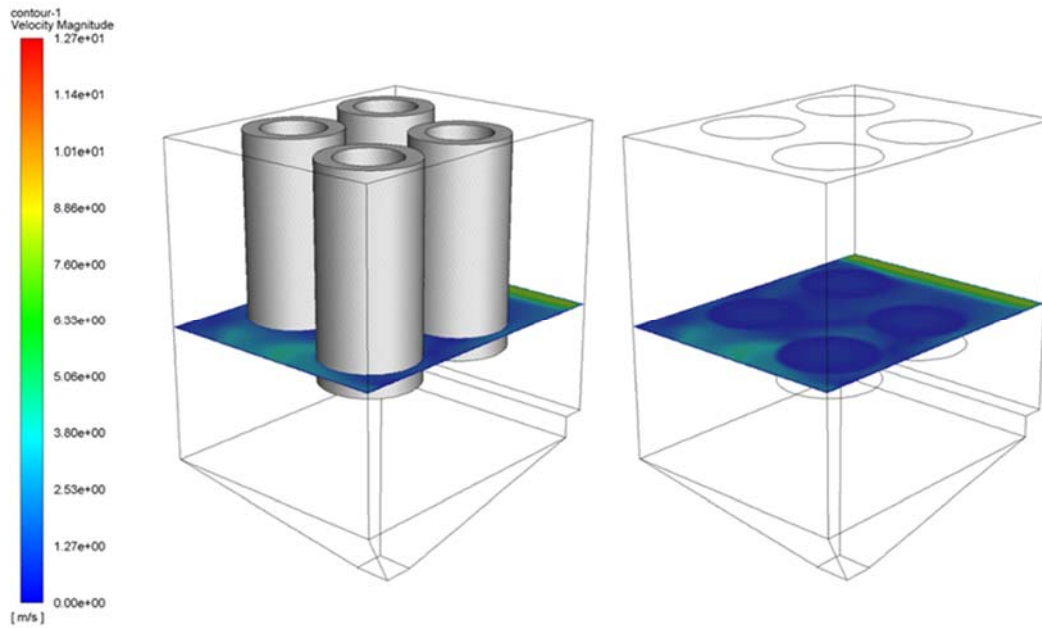


Abbildung 4-48: Geschwindigkeitsplots in einer horizontalen Ebene im unteren Bereich der Filterpatronen für die Berechnung des Ist-Zustandes (links: Darstellung mit eingeblendeten Filterpatronen, rechts: Darstellung ohne eingeblendete Filterpatronen)

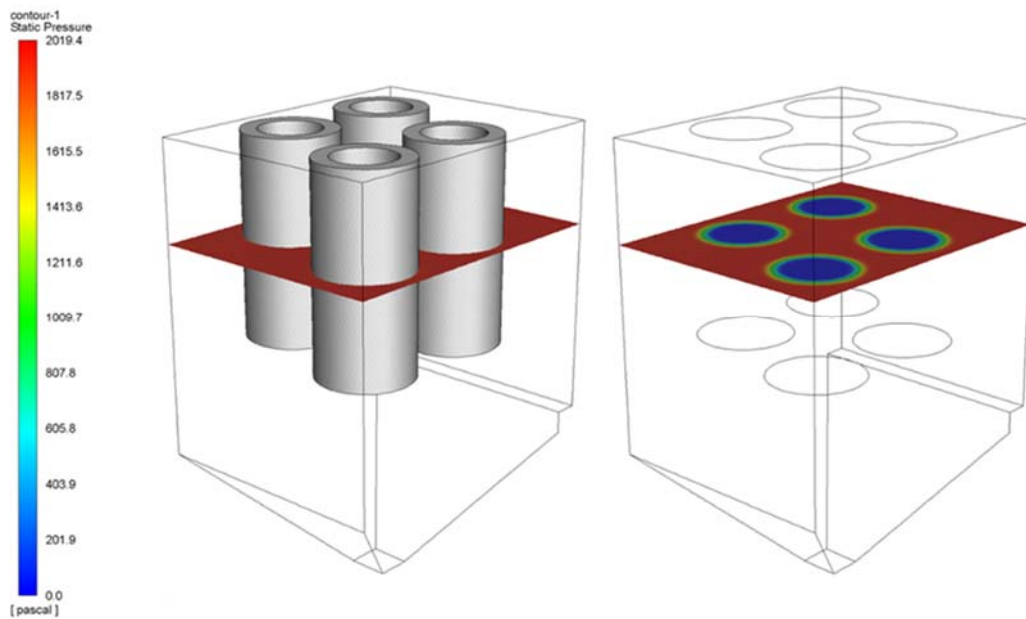


Abbildung 4-49: Druckverteilung in einer horizontalen Ebene im unteren Bereich der Filterpatronen für die Berechnung des Ist-Zustandes (links: Darstellung mit eingeblendeten Filterpatronen, rechts: Darstellung ohne eingeblendete Filterpatronen)

Das Rohgas tritt mit einer Geschwindigkeit von ca. 8 m/s in den Rohgasraum ein. Dies führt zu einer hohen Geschwindigkeit im Deckenbereich zwischen den Filterpatronen (s. Abbildung 4-46, rechts) und zu einer sehr turbulenten Strömung im Rohgasraum. Die ist auch an den berechneten Partikeltrajektorien in Abbildung 4-50 zu erkennen. Für das Partikelmaterial Dolomit mit einer Dichte von 2.650 kg/m³ wurden Trajektorien für Partikel mit einem Durchmesser von 1 µm und 10 µm berechnet.

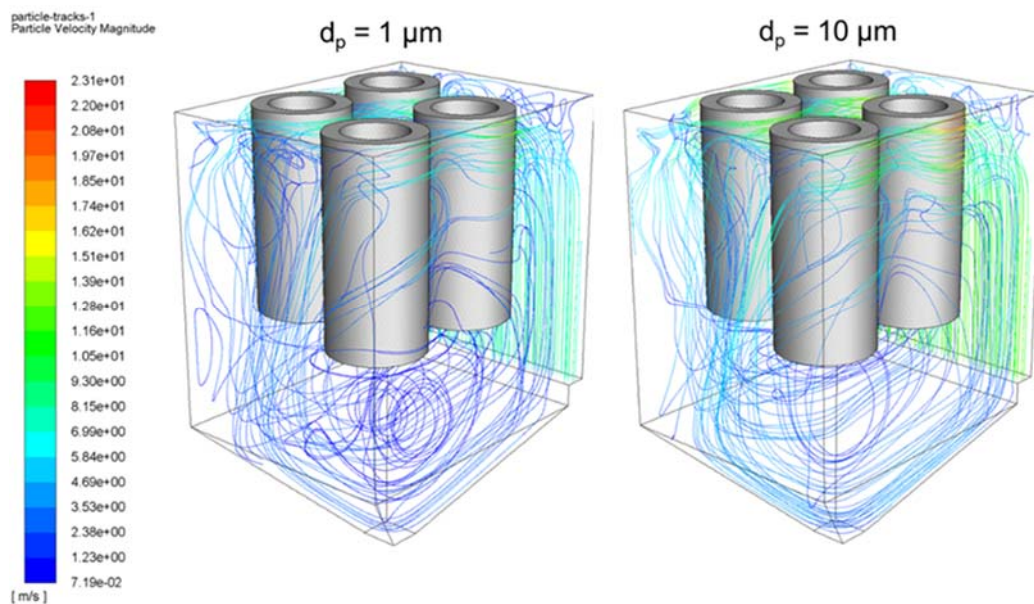


Abbildung 4-50: Partikeltrajektorie für Partikel mit einem Durchmesser von 1 µm und 10 µm

Zur Auswertung der Partikelbeladung wurde die Höhe der Filterpatronen von 450 mm jeweils in drei gleich große Zonen „Oben“, „Mitte“, „Unten“ von 150 mm unterteilt (Abbildung 4-51). Es wurden die prozentualen Anteile der auf den Wänden und den Filterpatronenoberflächen auftreffenden bzw. abgeschiedenen Partikel ermittelt.

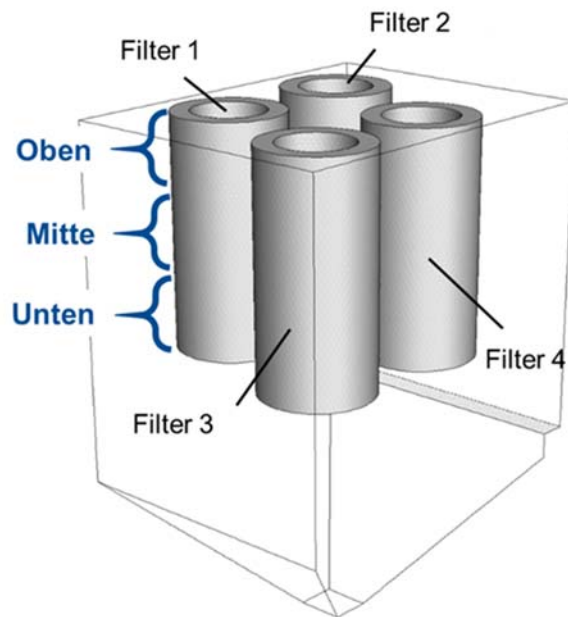


Abbildung 4-51: Nummerierung der Filterpatronen und Zonen der Auswertung

In Abbildung 4-52 ist das Ergebnis für Partikel mit einem Durchmesser von $1\ \mu\text{m}$ dargestellt. Von den mit dem Rohgas aufgegebenen Partikeln werden ca. 35 % den Wänden der Kammer abgeschieden. Die übrigen Partikel treffen auf die Filteroberflächen zu den im Diagramm angegebenen Prozentsätzen auf. Die unterschiedlichen Farben beschreiben die einzelnen Filterpatronen 1 bis 4, die vier Säulen auf der linken Seite des Diagramms stellen die Partikel dar, die im oberen Bereich der Patronen abgeschieden werden, die vier in der Mitte, die die im mittleren Drittel der Patronen abgeschieden werden, und die vier Säulen rechts, die die im unteren Bereich abgeschieden werden.

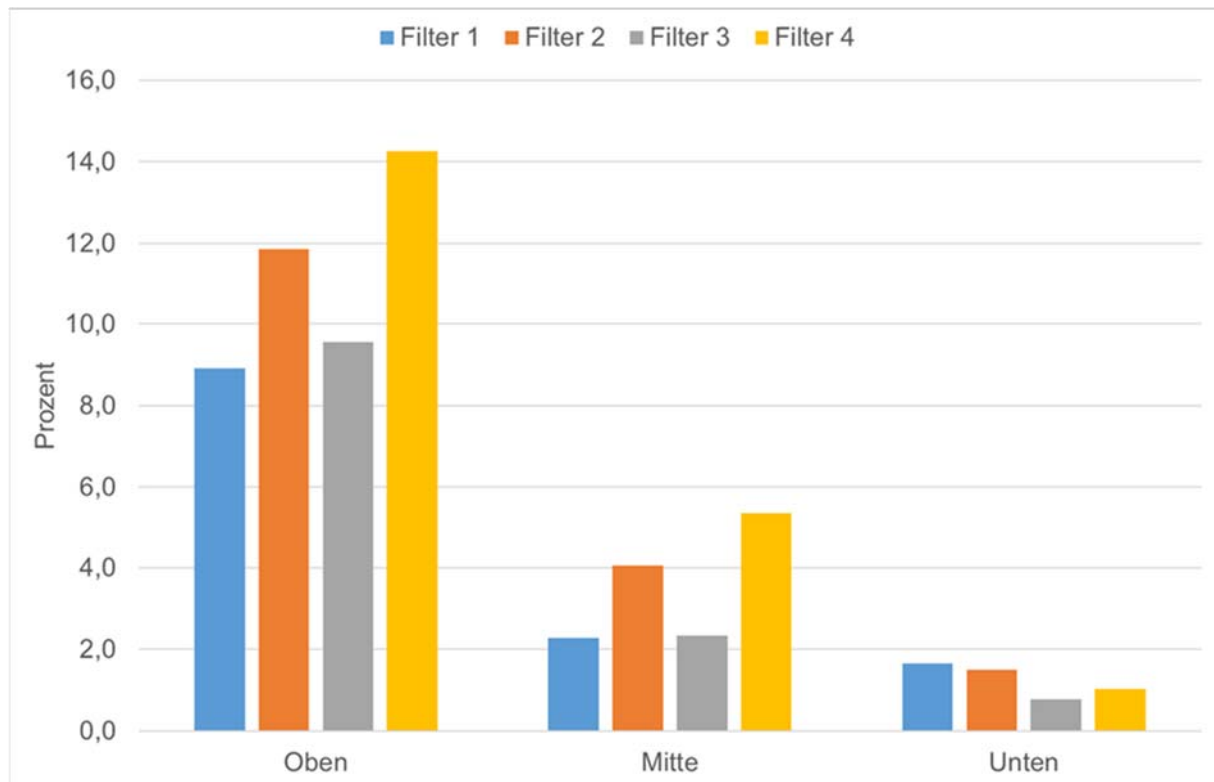


Abbildung 4-52: Prozentuale Verteilung der abgeschiedenen 1 µm-Partikel in den einzelnen Filterpatronenbereichen (Ist-Zustand)

Man erkennt aus der Abbildung 4-52, dass alle Patronen im oberen Bereich am stärksten mit 1 µm großen Partikeln beladen werden. Filter 2 und 4 werden hier stärker belastet als Filter 1 und 3. Es werden ca. 14 % aller aufgegebenen Partikel im oberen Bereich des Filters 4 abgeschieden. Auf die unteren Bereiche der Filterpatronen treffen jeweils im Durchschnitt nur ca. 1 % der Partikel auf.

Die Berechnung der Trajektorien für Partikel mit einem Durchmesser von 10 µm ergab, dass ca. 50 % der aufgegebenen Partikel an den Wänden abgeschieden werden. Die übrigen Partikel treffen auf die Filteroberflächen zu den im Diagramm in Abbildung 4-53 angegebenen Prozentsätzen auf. Die Filterpatronen werden im oberen Bereich am stärksten beladen. Für 10 µm-Partikel werden Filter 1 und 3 stärker belastet als Filter 2 und 4. Die obere Zone des Filters 3 wird mit ca. 10 % aller aufgegebenen 10 µm-Partikeln beladen. Die unteren Bereiche der Filterpatronen werden jeweils im Durchschnitt mit ca. 1 % der Partikel beaufschlagt.

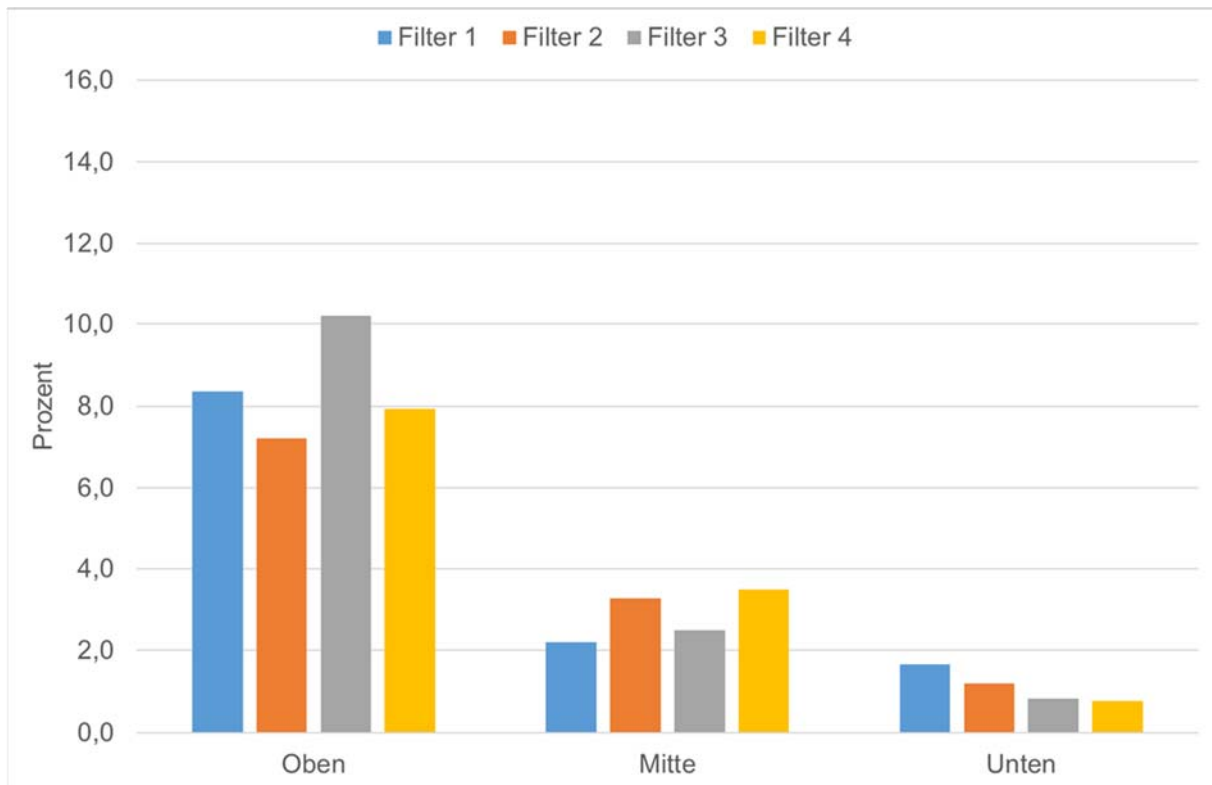
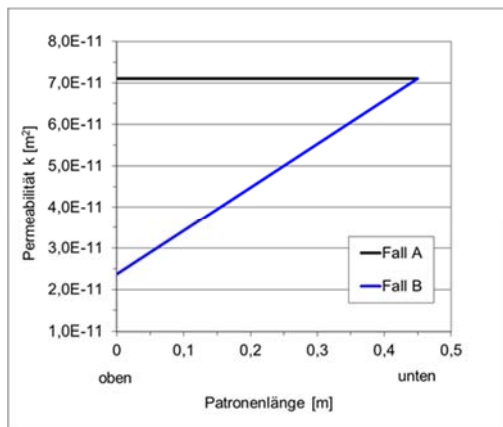


Abbildung 4-53: Prozentuale Verteilung der abgeschiedenen 10 µm-Partikel in den einzelnen Filterpatronenbereichen (Ist-Zustand)

Variationsrechnung: Späteres Beladungsstadium

Die Partikelbeladung führt zu einer Änderung der Permeabilität des Filtermediums aufgrund der eingelagerten Partikel. Bei der inhomogenen Anströmung der Filterpatronen über der Höhe ergibt sich wie zuvor gezeigt eine ungleichförmige Beaufschlagung mit Partikeln, und somit eine ortsabhängige Änderung der Permeabilität über der Filterpatronenlänge.

Für ein späteres Beladungsstadium wurde angenommen, dass sich die Permeabilität linear über der Patronenlänge geändert hat. Der lineare Verlauf der Permeabilität wurde so gewählt, dass sich der Integralwert des Druckabfalls über der Patrone gegenüber dem Anfangszustand verdoppelt. Der so bestimmte Verlauf der Permeabilität (Fall B) ist in Abbildung 4-54 zusammen mit der konstanten Permeabilität im Anfangszustand (Fall A) dargestellt.



Permeabilität k

Fall A (Anfangszustand):

$$k = 7,107 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$$

Fall B (Beladungsstadium):

$$k = 7,107 \cdot 10^{-11} (0,333 + 1,481 \cdot x) \text{ m}^2$$

Abbildung 4-54: Verlauf der Permeabilitäten über der Patronenlänge für den Anfangszustand (Fall A) und ein späteres Beladungsstadium (Fall B)

Abbildung 4-55 zeigt die Auswertung der Partikeltrajektorien für Partikel mit einem Durchmesser von $1 \mu\text{m}$. Von den mit dem Rohgas aufgegebenen $1 \mu\text{m}$ -Partikeln werden ca. 34 % den Wänden der Kammer abgeschieden. Die übrigen Partikel treffen auf die Filteroberflächen zu den im Diagramm angegebenen Prozentsätzen auf. Die Zonen „Oben“, „Mitte“, „Unten“ sind mit den Farben „rot“, „gelb“ und „grün“ gekennzeichnet. Die Farbe „blau“ beschreibt die gesamte Filterpatrone. Der Anfangszustand mit der konstanten Permeabilität (Fall A) und ein späterer Beladungszustand mit der linearen Permeabilität (Fall B) sind jeweils für jeden Filter nebeneinander aufgetragen.

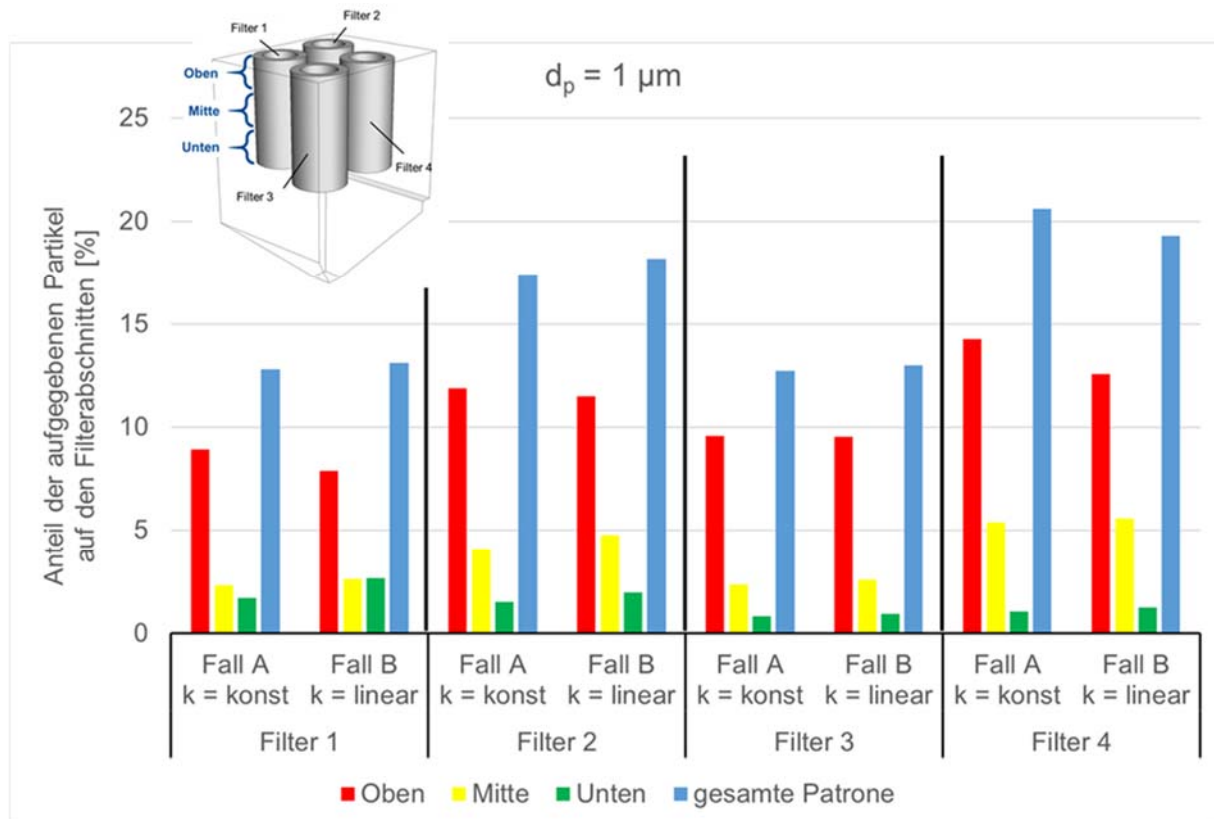


Abbildung 4-55: Prozentuale Verteilung der abgeschiedenen 1 µm-Partikel in den einzelnen Filterpatronenbereichen im Anfangszustand (Fall A) und zu einem späteren Beladungszustand (Fall B)

Es gibt nur sehr geringe Unterschiede bei der prozentualen Verteilung der abgeschiedenen 1 µm-Partikel zwischen Fall A und B. Im oberen Bereich (rote Säule) der Patrone 1 und 4 werden ca. 1 %-Punkt weniger Partikel für Fall B (ca. 8 %) als für Fall A (ca. 9 %) bzw. ca. 13 % und ca. 14 % abgeschieden.

Von den mit dem Rohgas aufgegebenen 10 µm-Partikeln werden ca. 49 % den Wänden der Kammer abgeschieden. Für diese Partikel ergab sich ebenfalls ein maximaler Unterschied von ca. 1 %-Punkt, der bei Filter 3 in der oberen Zone (rote Säule) auftrat (s. Abbildung 4-56). Im späteren Beladungsstadium wurden hier prozentual weniger Partikel abgeschieden als im Anfangszustand.

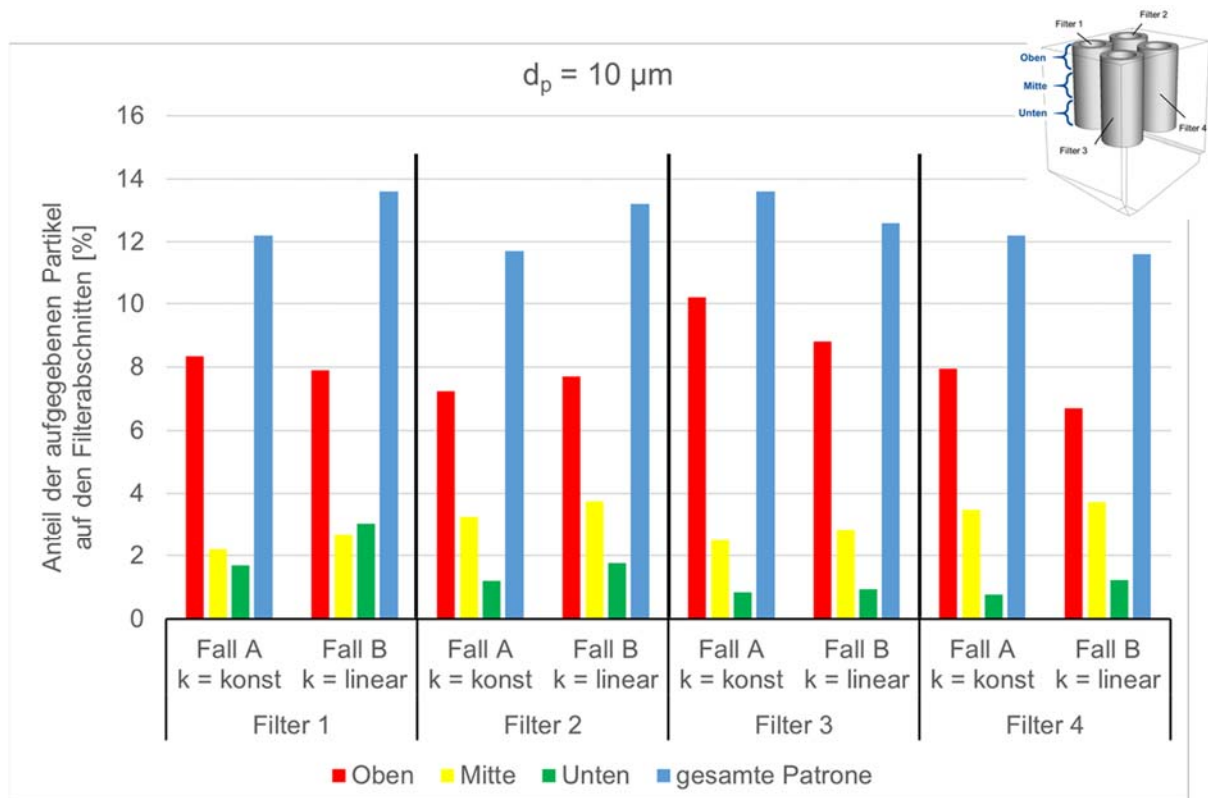


Abbildung 4-56: Prozentuale Verteilung der einzelnen abgeschiedenen $10 \mu\text{m}$ -Partikel in den einzelnen Filterpatronenbereichen im Anfangszustand (Fall A) und zu einem späteren Beladungszustand (Fall B)

Der spätere Beladungszustand führte weder zu einer gleichförmigeren Beladung der Filterpatronen über der Höhe noch zu einer gleichartigen Beladung der vier Filterpatronen.

Variationsrechnung: Änderung der Rohgaszuführung (breiterer Einlass)

Für eine weitere Variationsrechnung wurde die Fläche des Rohgaseintritts an der hinteren Wand verdoppelt. Bei der Berechnung mit dem Nennvolumenstrom von $800 \text{ m}^3/\text{h}$ ergab sich somit eine Eintrittsgeschwindigkeit von ca. 4 m/s . In Abbildung 4-57 ist die Geschwindigkeit in einer vertikalen Schnittebene zwischen den Filtern 1, 2 und den Filtern 3, 4 dargestellt. Die Filterpatronen wurden für diese Darstellung ausgeblendet.

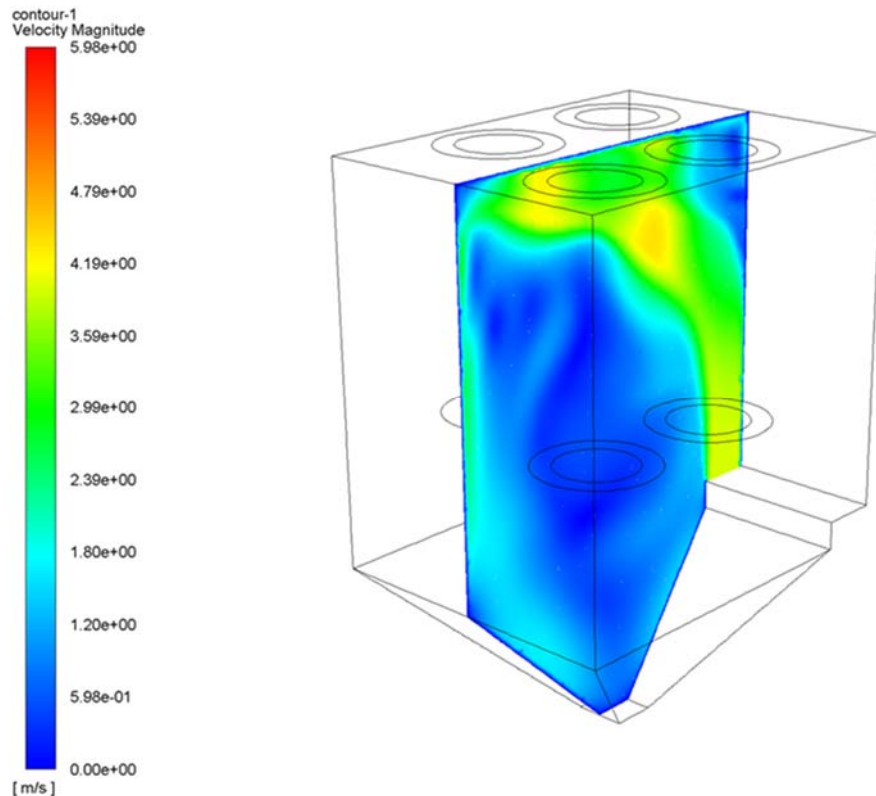


Abbildung 4-57: Geschwindigkeitsplot in einer mittleren vertikalen Ebene zwischen Filterpatronen für die Berechnung mit einem breiteren Einlass (Darstellung ohne eingblendete Filterpatronen)

Abbildung 4-58 stellt die Auswertung der Partikeltrajektorien für Partikel mit einem Durchmesser von 1 μm dar. Von den mit dem Rohgas aufgegebenen 1 μm -Partikeln werden ca. 42 % an den Wänden der Kammer abgeschieden. Die übrigen Partikel treffen auf die Filteroberflächen zu den im Diagramm angegebenen Prozentsätzen auf. Die Zonen „Oben“, „Mitte“, „Unten“ sind mit den Farben „rot“, „gelb“ und „grün“ gekennzeichnet. Die Farbe „blau“ beschreibt die gesamte Filterpatrone. Der Ist-Zustand mit der Eintrittsgeschwindigkeit von ca. 8 m/s und die Ergebnisse für die Berechnung mit breiterem Einlass (4 m/s) sind jeweils für jeden Filter nebeneinander aufgetragen.

Für Filter 2 und 4 ergaben sich die größten prozentualen Veränderungen. In der oberen Zone von Filter 2 werden bei der Eintrittsgeschwindigkeit von 4 m/s ca. 3 %-Punkte mehr Partikel abgeschieden, beim Filter 4 werden hier ca. 6 %-Punkte weniger abgeschieden (rote Säulen).

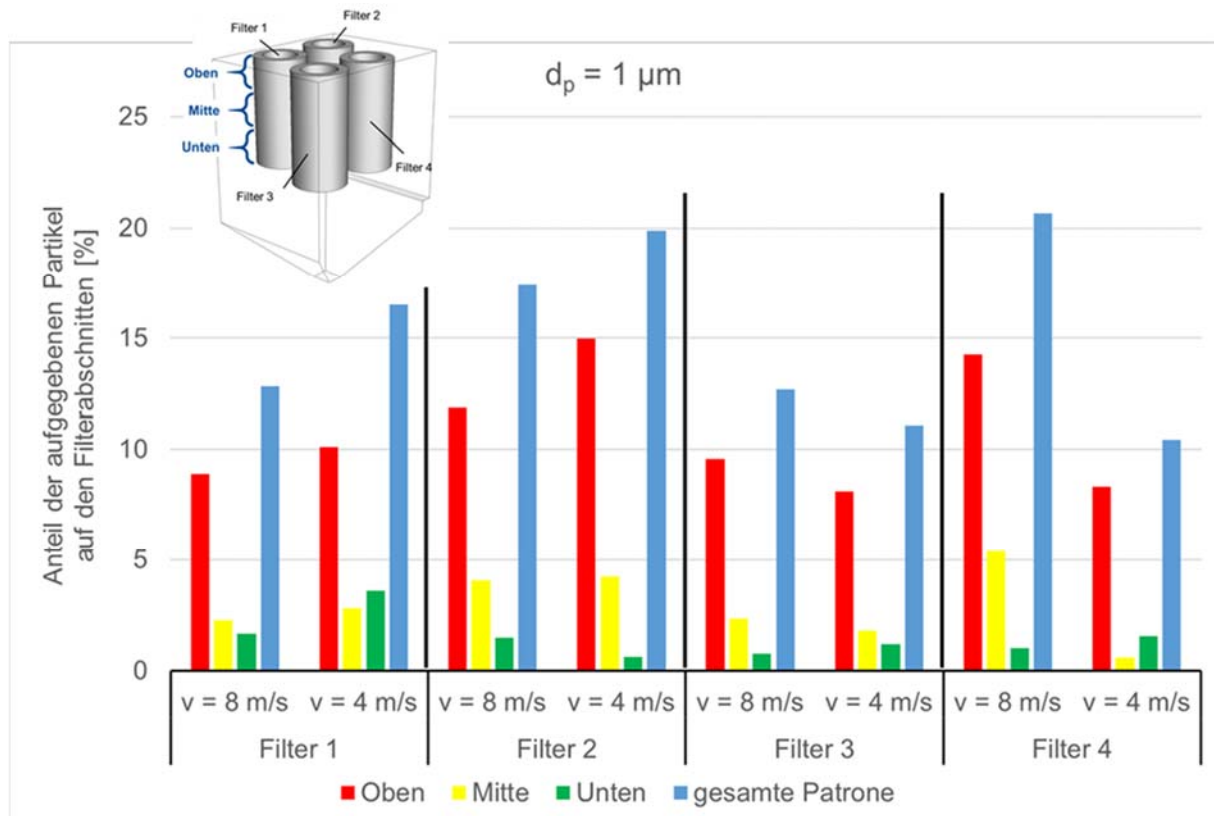


Abbildung 4-58: Prozentuale Verteilung der abgeschiedenen 1 µm-Partikel in den einzelnen Filterpatronenbereichen im Ist-Zustand (8 m/s) und bei der Berechnung mit breiterem Einlass (4 m/s)

Partikel mit einem Durchmesser von 10 µm werden zu ca. 48 % an den Wänden der Kammer abgeschieden. Für den größeren Partikeldurchmesser fallen die Unterschiede für die obere Zone am Filter 2 noch deutlicher aus (s. Abbildung 4-59). Es werden bei der Eintrittsgeschwindigkeit von 4 m/s ca. 7 %-Punkte mehr Partikel als bei 8 m/s abgeschieden. Bei den anderen Zonen und Filtern sind die Unterschiede kleiner als 2 %-Punkte. Der breitere Einlass führte weder zu einer gleichförmigeren Beladung der Filterpatronen über der Höhe noch zu einer gleichartigen Beladung der vier Filterpatronen. Die ungleichförmige Beladung wurde für 10 µm-Partikel am Filter 2 sogar noch größer.

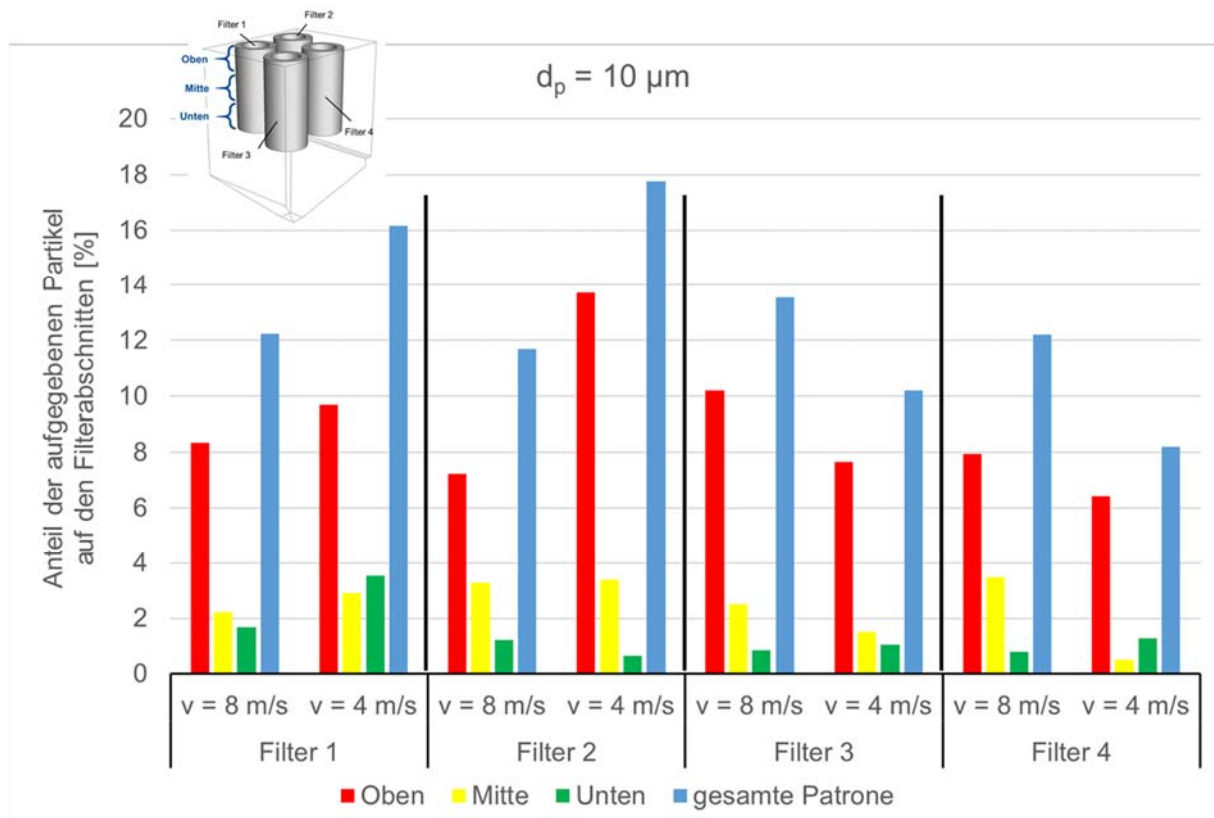


Abbildung 4-59: Prozentuale Verteilung der abgeschiedenen $10 \mu\text{m}$ -Partikel in den einzelnen Filterpatronenbereichen im Ist-Zustand (8 m/s) und bei der Berechnung mit breiterem Einlass (4 m/s)

Variationsrechnung: Konische Filterpatronen

Für die Variationsrechnung mit konischen Filterpatronen wurde der Außendurchmesser der zylindrischen Patronen an einem Ende von 210 mm auf 120 mm reduziert. Die Geometrie ist in Abbildung 4-60 zusammen mit dem Geschwindigkeitsplot in einer vertikalen Schnittebene zwischen den Filtern 1, 2 und den Filtern 3, 4 dargestellt. Die Auswertung der Partikeltrajektorien für Partikel mit einem Durchmesser von $1 \mu\text{m}$ zeigt die Abbildung 4-61. Von den mit dem Rohgas aufgegebenen $1 \mu\text{m}$ -Partikeln werden ca. 41 % an den Wänden der Kammer abgeschieden. Die übrigen Partikel treffen auf die Filteroberflächen zu den im Diagramm angegebenen Prozentsätzen auf. Die Zonen „Oben“, „Mitte“, „Unten“ sind mit den Farben „rot“, „gelb“ und „grün“ gekennzeichnet. Die Farbe „blau“ beschreibt die gesamte Filterpatrone. Die Berechnungsergebnisse des Ist-Zustands mit den zylindrischen Filterpatronen sind mit den Ergebnissen für die Berechnung mit den konischen Patronen jeweils für jeden Filter nebeneinander aufgetragen.

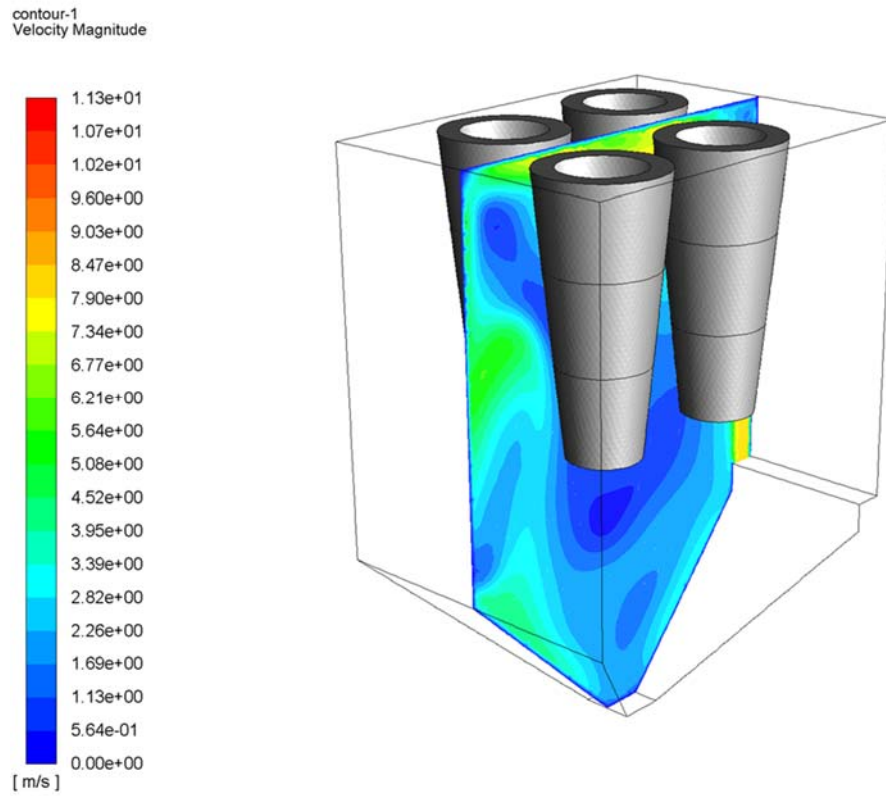


Abbildung 4-60: Geschwindigkeitsplot in einer mittleren vertikalen Ebene zwischen den Filterpatronen für die Berechnung mit konischen Patronen (Darstellung mit eingeblendeten Filterpatronen)

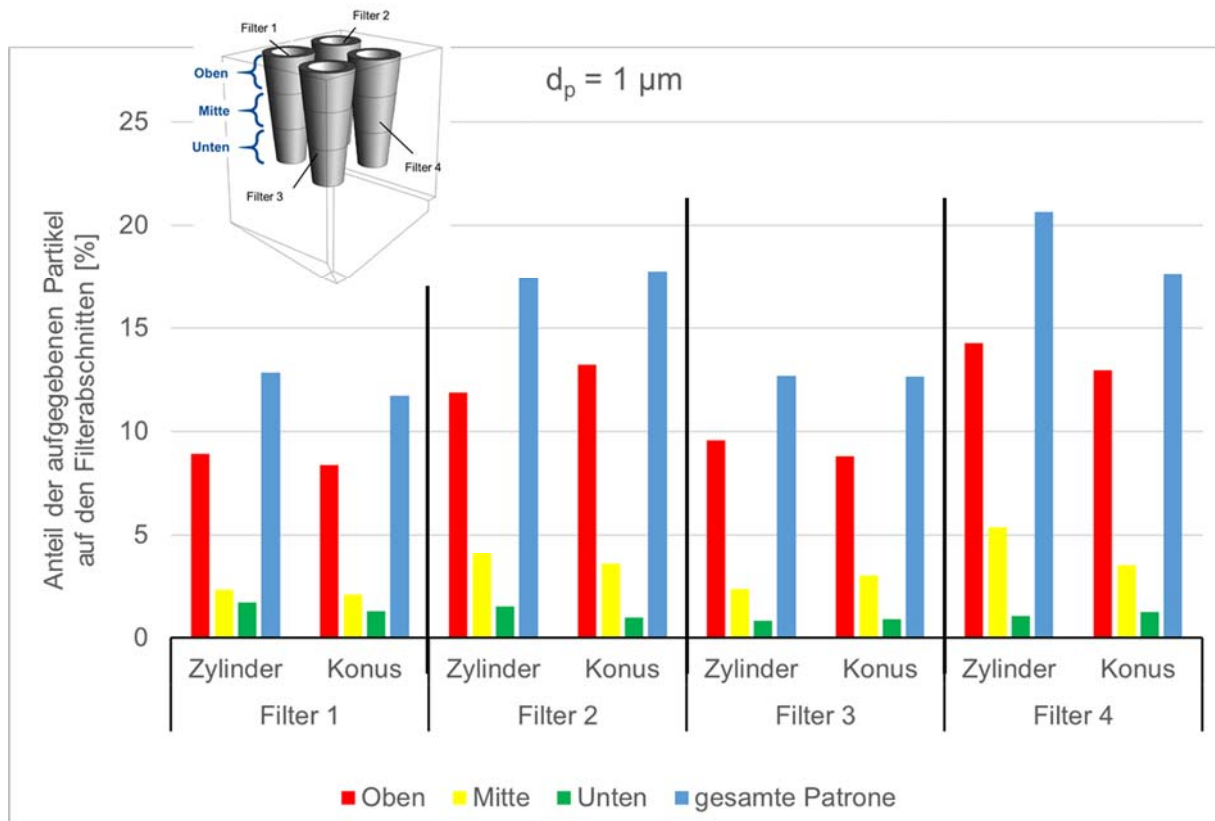


Abbildung 4-61: Prozentuale Verteilung der abgeschiedenen 1 µm-Partikel in den einzelnen Filterpatronenbereichen im Ist-Zustand (Zylinder) und bei der Berechnung mit konischen Filterpatronen (Konus)

Es gibt nur sehr geringe Unterschiede bei der prozentualen Verteilung der abgeschiedenen 1 µm-Partikel zwischen den Berechnungen mit zylindrischen und konischen Patronen. Die maximale prozentuale Abweichung beträgt ca. 1 %-Punkt. Im oberen Bereich (rote Säule) der Patrone 2 werden ca. 1 %-Punkt mehr Partikel im Fall der konischen Filter abgeschieden und für Filter 4 im oberen Bereich ca. 1 %-Punkt weniger.

Von den mit dem Rohgas aufgegebenen 10 µm-Partikeln werden ca. 55 % den Wänden der Kammer abgeschieden. Für diese Partikel ergab sich ein maximaler Unterschied von ca. 2 %-Punkten, der bei Filter 2 und 3 in der oberen Zone (rote Säule) auftrat (s. Abbildung 4-62). Am Filter 2 wurden für die konische Form mehr Partikel abgeschieden, für Filter 3 ca. 2 %-Punkte weniger Partikel.

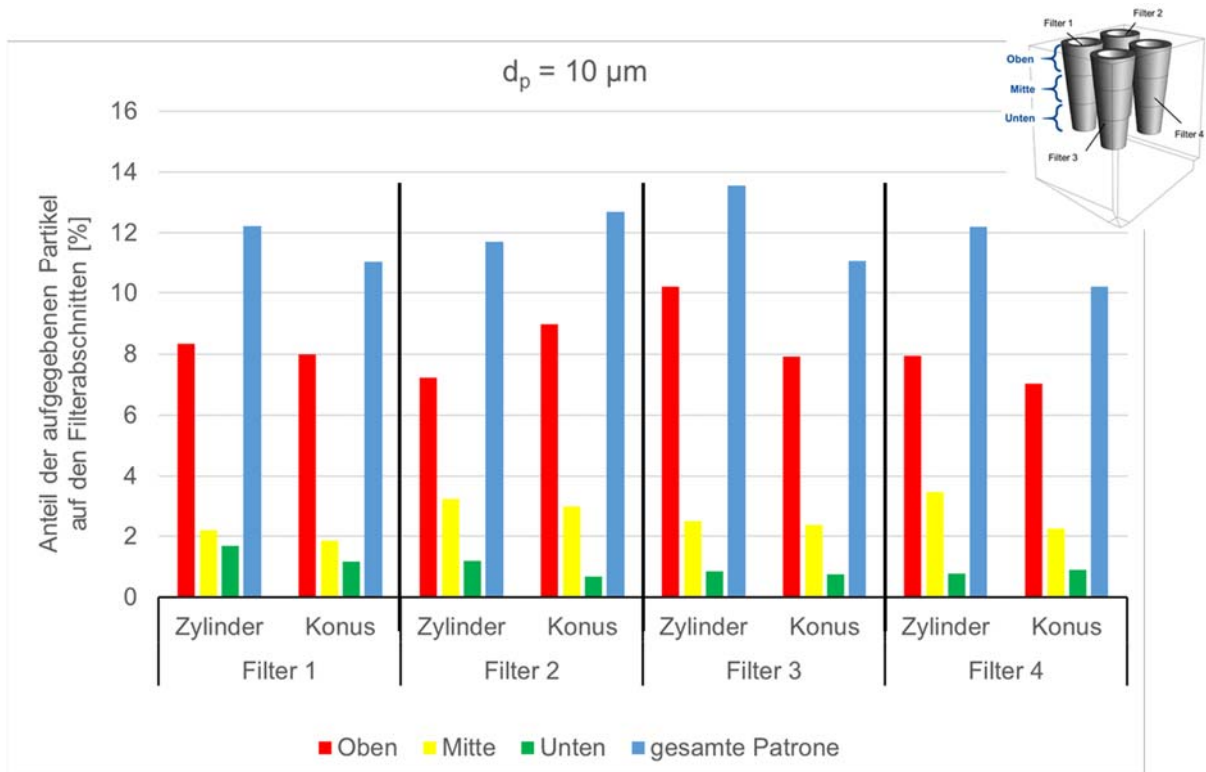


Abbildung 4-62: Prozentuale Verteilung der abgeschiedenen 10 µm-Partikel in den einzelnen Filterpatronenbereichen im Ist-Zustand (Zylinder) und bei der Berechnung mit konischen Filterpatronen (Konus)

Die Form der Filterpatronen führte weder zu einer gleichförmigeren Beladung der Filterpatronen über der Höhe noch zu einer gleichartigen Beladung der vier Filterpatronen.

Variationsrechnung: Zwei Einlässe

Für folgende Variationsrechnung wurde der Nennvolumenstrom von 800 m³/h auf zwei Einlässen an den Seiten aufgeteilt. Die Eintrittsgeschwindigkeit betrug wie im Ist-Zustand ca. 8 m/s. Die Anordnung der Filterpatronen im Abscheider und die Rohgaseintritte an den beiden Seitenwänden zeigt Abbildung 4-63.

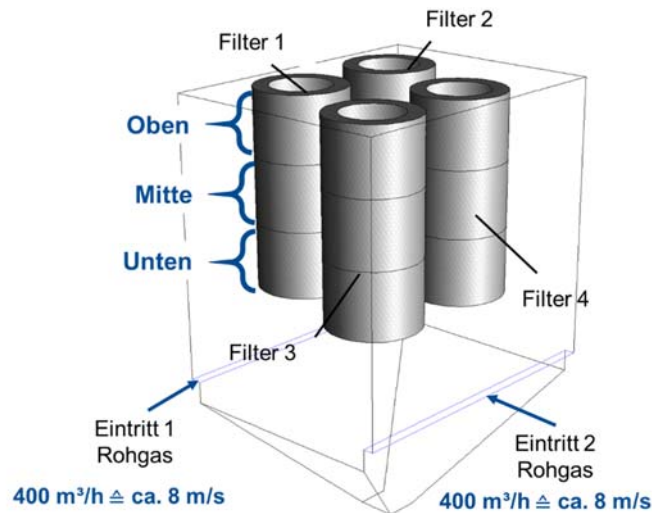


Abbildung 4-63: Anordnung und Bezeichnung der Filterpatronen in der Filterkammer mit den zwei Rohgas-Eintrittsöffnungen

In Abbildung 4-64 ist die Geschwindigkeit in einer vertikalen Schnittebene zwischen den Filtern 1, 2 und den Filtern 3, 4 mit eingeblendeten Filterpatronen dargestellt.

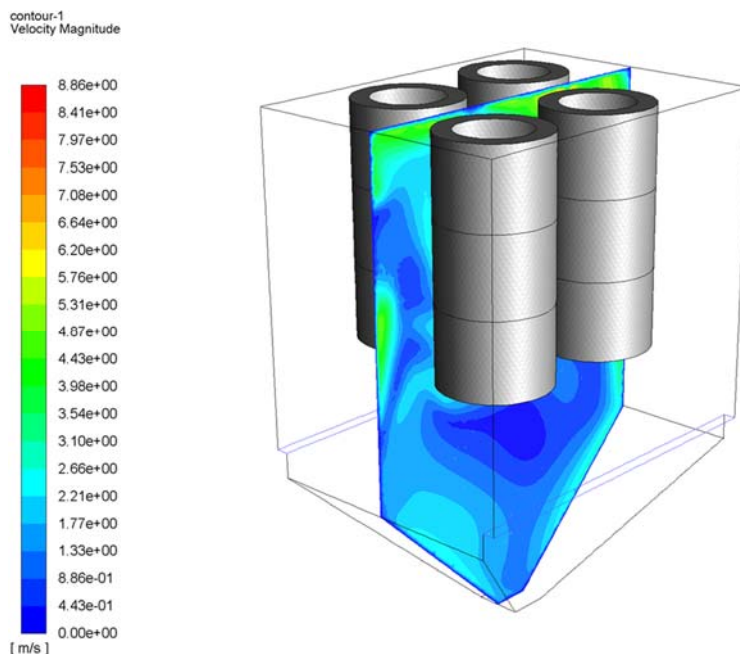


Abbildung 4-64: Geschwindigkeitsplot in einer mittleren vertikalen Ebene zwischen den Filterpatronen für die Berechnung mit zwei Einlässen (Darstellung mit eingeblendeten Filterpatronen)

Die Auswertung der Partikeltrajektorien für Partikel mit einem Durchmesser von $1\ \mu\text{m}$ zeigt die Abbildung 4-65.

Von den mit dem Rohgas aufgegebenen $1\ \mu\text{m}$ -Partikeln werden ca. 42 % an den Wänden der Kammer abgeschieden. Die übrigen Partikel treffen auf die Filteroberflächen zu den im Diagramm angegebenen Prozentsätzen auf. Die Zonen „Oben“, „Mitte“, „Unten“ sind mit den Farben „rot“, „gelb“ und „grün“ gekennzeichnet. Die Farbe „blau“ beschreibt die gesamte Filterpatrone. Der Ist-Zustand mit einem Einlass und die Ergebnisse für die Berechnung mit zwei Einlässen sind jeweils für jeden Filter nebeneinander dargestellt.

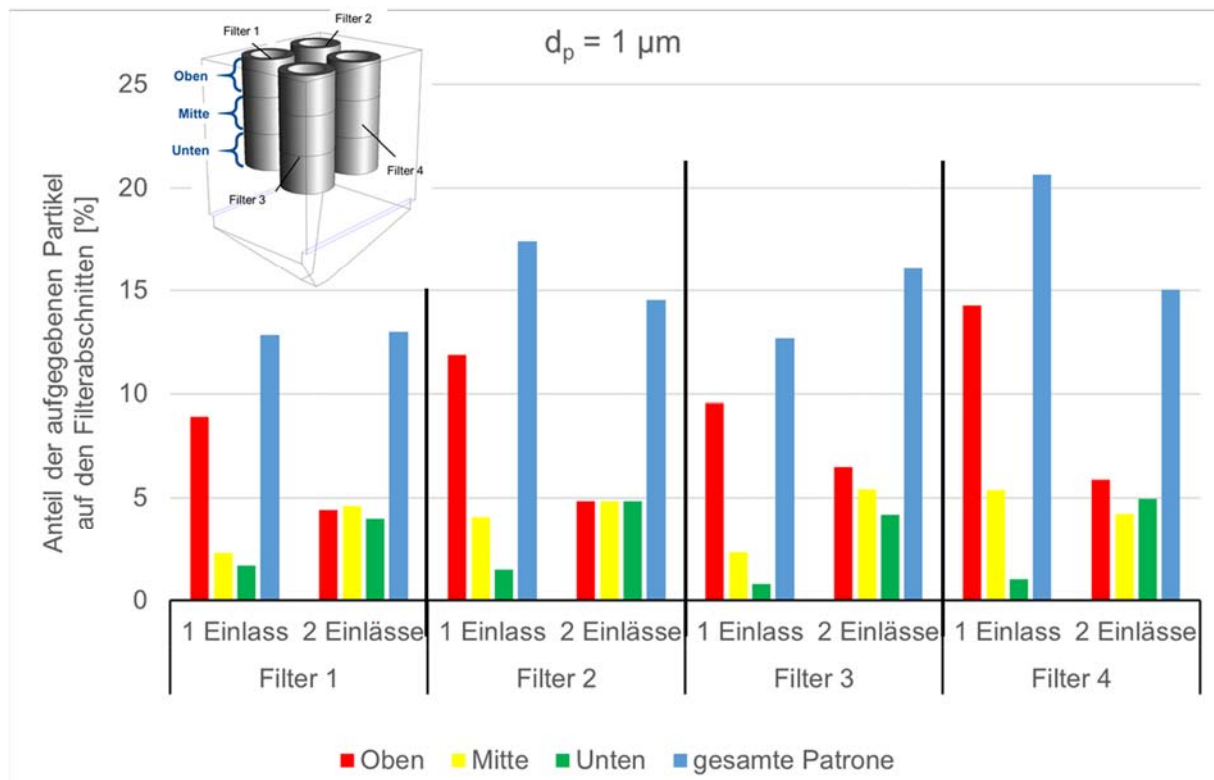


Abbildung 4-65: Prozentuale Verteilung der abgeschiedenen $1\ \mu\text{m}$ -Partikel in den einzelnen Filterpatronenbereichen im Ist-Zustand (1 Einlass) und bei der Berechnung mit zwei Einlässen (2 Einlässe)

Die Variation mit zwei Einlässen ergibt eine deutlich gleichförmigere Beladung der Filterpatronen über der Höhe (rote, gelbe, grüne Säulen) und eine gleichartige Beladung der vier Filterpatronen (blaue Säule). So werden z. B. alle drei Zonen der Patrone 2 mit ca. 5 % der $1\ \mu\text{m}$ -Partikel beaufschlagt.

Von den mit dem Rohgas aufgegebenen $10\ \mu\text{m}$ -Partikeln werden ca. 47 % an den Wänden der Kammer abgeschieden. Auch für diese Partikel ergab sich mit zwei Einlässen eine bessere gleichförmigere Beladung der Filterpatronen über der Höhe (s. Abbildung 4-66). Für die Filter 1 und 2 ist diese ausgeprägter als für Filter 3 und 4.

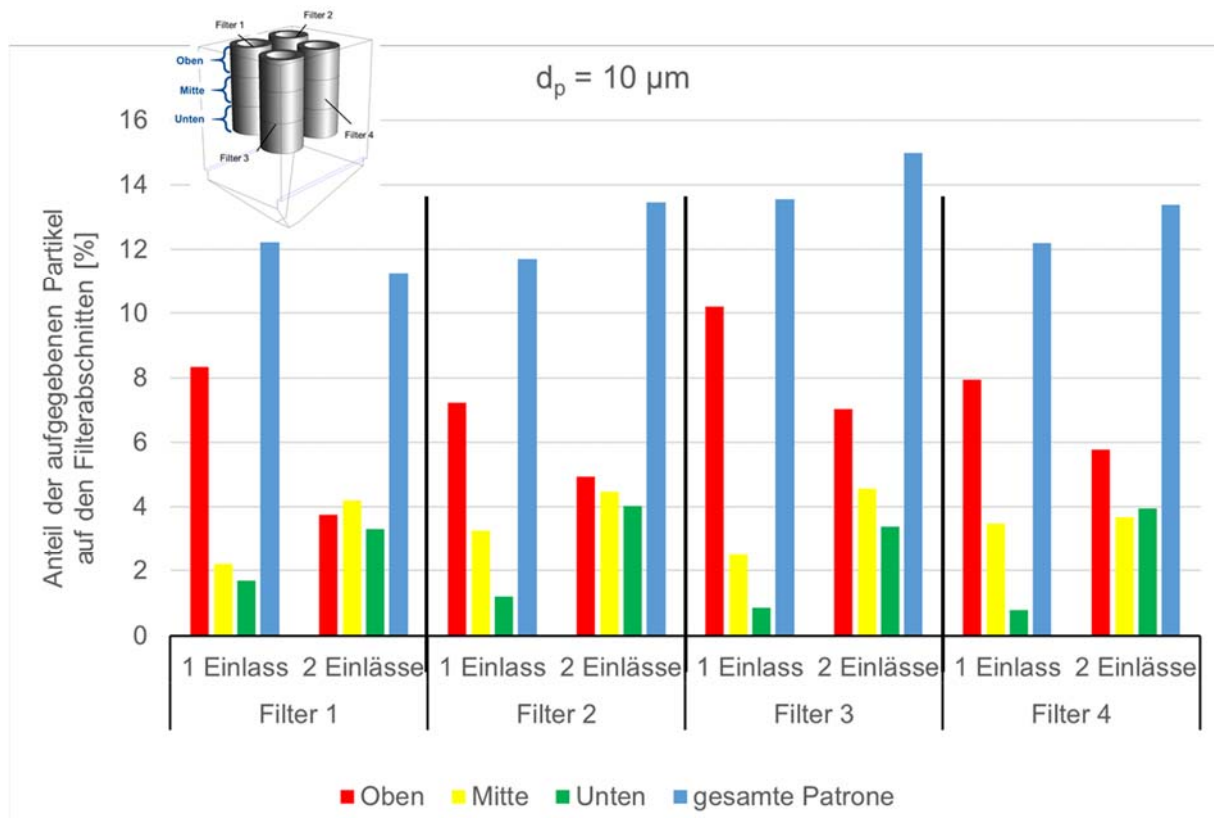


Abbildung 4-66: Prozentuale Verteilung der abgeschiedenen $10 \mu\text{m}$ -Partikel in den einzelnen Filterpatronenbereichen im Ist-Zustand (1 Einlass) und bei der Berechnung mit zwei Einlässen (2 Einlässe)

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass nur die Variation der Geometrie mit zwei Einlässen zu einer gleichförmigeren Beladung der Filterpatronen über der Höhe als auch zu einer gleichartigeren Beladung der vier Filterpatronen führt.

4.9 Herleitung einer Prüfmethode zur Abbildung des Realverhaltens / AP 8 (FE 1)

Ziel dieses Arbeitspaketes war es die Erkenntnisse aus allen experimentellen und theoretischen Ergebnissen als Basis für eine Prüfmethode zur Abbildung des Realverhaltens der mobilen Entstaubungssysteme zu nutzen. Da nach ersten Versuchen mit dem mobilen Entstauber A das softwareseitige Problem auftrat, dass keine kontinuierliche Abreinigung während des Betriebs möglich war, musste die mögliche Herleitung einer Prüfprozedur alleinig anhand der Versuchsergebnisse des mobilen Entstaubers B durchgeführt werden. Startpunkt der Prüfprozedur war der Ansatz über die ISO/CD 16313-2. Der Prüfablauf und -bedingungen sind in der folgenden Tabelle erneut dargestellt.

Tabelle 4-5: Prüfprozedur nach ISO/CD 16313-2

Schritt	Bezeichnung	Beschreibung
1	Break-In	N Beladungszyklen (max. 1 h, nach Herstellerangaben)
2	Alterung	500N Beladungszyklen (max. 5 h) bei Reinigungspausen $\Delta t = 10 - 20$ s
3	Stabilisierung	10N Beladungszyklen (max. 4 h)
4	Leistungsmessung	5N Beladungszyklen (max. 30 min)
5	Optional	Bestimmung PM_x -Wirkungsgrade

Diese Alterungsprozedur sollte bei einer Rohgaskonzentration von 2-2,5 g/m³ durchgeführt werden. Auf Basis anderer experimenteller Arbeiten ([23]) wurde diese Alterungsprozedur für eine schnellere Durchführung angepasst. Hierbei wurden die Maximalzeiten der Schritte 2 und 3 geändert. Die geänderte Alterungsprozedur ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 4-6: Angepasste Alterungsprozedur

Schritt	Bezeichnung	Beschreibung
1	Break-In	N Beladungszyklen (max. 1 h, nach Herstellerangaben)
2	Alterung	500N Beladungszyklen (max. 4 h) bei Reinigungspausen $\Delta t = 10 - 20$ s
3	Stabilisierung	10N Beladungszyklen (max. 2 h)
4	Leistungsmessung	5N Beladungszyklen (max. 30 min)
5	Optional	Bestimmung PM_x -Wirkungsgrade

Um die Filter bei einer Reduzierung der Alterungszeit ähnlich stark zu belasten, wurde die Aerosolkonzentration auf 5 g/m³ bzw. 10 g/m³ erhöht. Durch diese Anpassung

konnte die Zeit für die Alterung von 10 auf insgesamt 7 Stunden verringert werden. Das Ergebnis der Alterungsprozedur wurde in Abbildung 4-16 dargestellt. Hierbei wurde Entstauber B gemäß Tabelle 4-6 mit einer Aerosolkonzentration von 5 g/m^3 für 4 Stunden beladen. Die Abreinigungspausen betragen bei diesem Versuch 10 s. Für die Grafik wurden die Druckverluste vor und nach der Abreinigung notiert. Diese bewegten sich zu Beginn zwischen 320 Pa und 350 Pa (mittlerer Druckverlust von 335 Pa). Über den gesamten Zeitraum kam es bei der 1-minütigen Bestäubung im Schnitt zu einem Anstieg des Druckverlusts von 30 Pa. Über die 4-stündige Alterung, bei der über 150 Abreinigungszyklen durchgeführt worden sind, ist ein Anstieg des Druckverlusts erkennbar. Dies lässt auf eine Alterung der Filter (unvollständige Abreinigung bzw. Festsetzen von Partikeln innerhalb des Filters) schließen. Da der Druckverlust zum Ende der Alterungsprozedur weiter ansteigt, kann ausgeschlossen werden, dass die Filter den stabilen Zustand (vgl. Abbildung 4-10) erreicht haben.

Daher wurde diese Alterungsprozedur mit einer erhöhten Aerosolkonzentration wiederholt, um die Belastung der Filter zu erhöhen. Diese wurde von 5 g/m^3 auf 10 g/m^3 erhöht. Wie beim vorherigen Versuch wurden auch diesmal die Druckverluste vor und nach der Abreinigung notiert und in einer Grafik über der Anzahl an Abreinigungen dargestellt (siehe Abbildung 4-17). Der Druckverlust der Filter liegt zu Beginn der Alterung zwischen ca. 320 Pa und 355 Pa (mittlerer Druckverlust 337,5 Pa). Während der Alterung stieg der Druckverlust nach der 1-minütigen Bestäubung im Schnitt um 35 Pa an. Insgesamt stieg der Druckverlust während der Alterung von 320 Pa nach der Abreinigung auf 345 Pa und von 355 Pa vor der Abreinigung auf 375 Pa an. Da der Druckverlust nach 1,5-stündiger Alterung nicht weiter angestiegen ist und somit anscheinend der stabile Zustand erreicht worden ist, wurde der Versuch an dieser Stelle beendet.

Ein Vergleich mit Filterpatronen, die im Betrieb genutzt und somit real gealtert wurden, zeigte jedoch einen deutlichen Unterschied im Druckverlust (vgl. Abbildung 4-23). Im Vergleich zu dem aus der künstlichen Alterung hervorgegangenen Druckverlust von ca. 350 Pa liegt der Druckverlust der real gealterten Filter bei 635 Pa. Trotz dieses Unterschieds sollte die Alterungsprozedur nicht als Fehlschlag angesehen werden, da die Filter bei der Nutzung des Dolomitstaubes dennoch einen stabilen Zustand erreicht haben. Eine Erklärung für diesen Unterschied können die gefilterten Stäube sein, welche sich besonders in der Partikelgröße unterscheiden. Der Dolomitstaub ist bei

einem mittleren Partikeldurchmesser von 10 µm größer als der bei der realen Alterung genutzte Messingstaub. Somit können die Ergebnisse der Alterung durch den Dolomitstaub passende Ergebnisse für Entstauber liefern, die mit ähnlichen Stäuben arbeiten.

5 Fazit

Ziel des Vorhabens war es, die beschleunigte Alterung von mobilen Entstaubungsanlagen im Labor in Form von 8 Arbeitspaketen zu untersuchen und somit eine Grundlage für kommende Normtests zu schaffen. Das erste Arbeitspaket diente der Auswahl und Beschaffung der zu testenden mobilen Entstaubungsanlagen für die Schnellalterung. Die beiden zur Verfügung gestellten mobilen Entstauber (im Abschlussbericht als Entstauber A und Entstauber B anonymisiert) bildeten mit Volumenströmen von 800 m³/h und 3200 m³/h den Querschnitt der am Markt vertretenen Geräte gut ab.

Teil des zweiten Arbeitspakets war es, die Prüfvorrichtung aufzubauen und zu optimieren. Hierfür wurde die DIN EN ISO 21904-2, die den Aufbau zum Erfassen und Abscheiden von Schweißrauch beschreibt, als Vorlage genutzt. Dieser Aufbau wurde während des Projekts bezüglich der Probenahme optimiert.

Zum dritten und vierten Arbeitspaket gehörten die Prüfung der mobilen Entstaubungsanlagen im Neuzustand sowie die Beschaffung und Prüfung real gealterter Filter. Da Entstauber A nicht in der Lage war eine Online-Abreinigung durchzuführen, wurde dieser nur im Neuzustand untersucht. Entstauber B wurde im Neuzustand und nach der künstlichen Alterung hinsichtlich des Druckverlustes und Fraktionsabscheidegrades untersucht und mit Filtern verglichen, welche im Betrieb genutzt und somit real gealtert wurden. Die künstlich gealterten Filter wiesen Unterschiede im Vergleich den Filtern im Neuzustand auf. So wurde ein Anstieg im Druckverlust und ein niedrigerer Fraktionsabscheidegrad verzeichnet, was auf eine erfolgreiche Alterung schließen lässt. Der künstlich erzeugte Druckverlustanstieg der Filter unterschied sich jedoch deutlich vom Druckverlust der real gealterten Filter. Diese Abweichung kann jedoch auf den Unterschied der zur Alterung genutzten Stäube zurückgeführt werden (Dolomitstaub für die künstliche Alterung und Messingstaub für die reale Alterung).

Die Prüfung der Filtermedien in Neuzustand und nach der Schnellalterung waren Teil des fünften Arbeitspakets. Dieses Arbeitspaket hat sich jedoch durch die mit Schwierigkeiten verbundene Handhabung der gealterten Filtermedien als problematischer als erwartet herausgestellt. Da keine Untersuchung/Messung der

Filtermedien ohne versehentliches Entfernen des Filterkuchens möglich war, wurde dieser Arbeitspunkt nicht weiter verfolgt.

Im Arbeitspaket 6 sollten die PM_{1-} , $PM_{2,5-}$ und PM_{10} -Abscheidegrade bestimmt werden. Diese lagen für den untersuchten Entstauber B vor und während der Alterung durchgehend über 90 %. Ausschließlich nach dem Ausbau der zweiten Filterstufe (Schwebstofffilter) hat die Partikelkonzentration im Reingas zugenommen und somit die PM_x -Abscheidegrade auf ca. 90 % (PM_1 : 91 %, $PM_{2,5}$: 88 %) gesenkt.

Es wurden Druck, Geschwindigkeit und Partikelabscheidung im Rohgasraum eines mobilen Abscheiders numerisch berechnet. Es zeigte sich, dass die Filterpatronen sehr ungleichmäßig über der Höhe beladen werden und die einzelnen Patronen unterschiedlich stark beaufschlagt werden.

Ausgehend von der Simulationsrechnung für den Ist-Zustand des Abscheiders wurden verschiedene Variationsrechnungen durchgeführt, um eine gleichförmigere Beaufschlagung zu erreichen. Hierzu wurde u. a. die Eintrittsgeschwindigkeit des Rohgases reduziert, indem der Eintrittsquerschnitt vergrößert wurde, die Filterpatronengeometrie verändert und eine symmetrischere Strömungszuführung durch Einbringen eines zweiten Einlasses vorgegeben. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass nur die Variation der Geometrie mit zwei Einlässen zu einer gleichförmigeren Beladung der Filterpatronen über der Höhe als auch zu einer gleichartigeren Beladung der vier Filterpatronen führt.

Zum Schluss sollten die aus den vorangegangenen Arbeitspaketen gewonnenen Erkenntnisse genutzt werden, um im achten Arbeitspaket eine Prüfprozedur zur beschleunigten Alterung von mobilen Entstaubern herzuleiten. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigten einen Erfolg in der Alterung der Filter, auch wenn diese sich von den real gealterten Filtern unterschieden. Jedoch spricht dies nicht gegen die Prüfprozedur, da diese Abweichung auf dem Unterschied zwischen den genutzten Stäuben beruht. Somit kann die Prüfprozedur genutzt werden, um das reale Verhalten der Filter darzustellen. Jedoch müssen dafür die Stäube für die Alterung dem Einsatzgebiet der mobilen Entstauber angepasst werden.

6 Verwendung der Zuwendung

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

Übersicht in Personenmonaten (PM):

Forschungseinrichtung	Ansätze	bewilligte PM	geleistete PM	Differenz PM
FE 1 (UDE)	A.1	24	25,13	+ 1,13
FE 2 (IUTA)	A.1	3,5	3,57	+0,07

Forschungseinrichtung 1

Die Durchführung der beschriebenen Untersuchungen erfolgte im Berichtszeitraum durch wissenschaftlich-technisches Personal (HPA A) (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplanes) im Umfang von insgesamt 17,83 PM sowie durch Personal mit dem Ansatz HPA B im Umfang von insgesamt 7,3 PM. Eine kostenneutrale Verlängerung war aufgrund zeitlicher Verzögerungen bei der Neueinstellung des Personals notwendig geworden und ist seitens des BMWK genehmigt worden. Auch die geringfügige Überschreitung des geplanten Personaleinsatzes war rechtzeitig angezeigt worden.

Forschungseinrichtung 2

Die Durchführung der beschriebenen Untersuchungen erfolgte im Berichtszeitraum durch wissenschaftlich-technisches Personal (HPA A) (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplanes) im Umfang von insgesamt 3,57 PM.

Der geplante und bewilligte Personaleinsatz wurde um etwa einen Arbeitstag minimal überschritten. Wir bitten dies zu entschuldigen.

- **Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans):**

Von keiner FE beantragt.

- **Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans):**

Von keiner FE beantragt.

7 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten lassen sich den Arbeitspaketen des bewilligten Antrags zuordnen. Der Personaleinsatz war zur Erreichung des Projektzieles angemessen und notwendig. Die eingesetzten Projektmitarbeiter der FE 1 haben insbesondere den Versuchsaufbau konzipiert und die Messungen durchgeführt und ausgewertet. Die relevanten geometrischen Abmessungen wurden der FE 2 übergeben, wo die Strömungssimulationen erfolgt sind.

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

8 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Ziel des Forschungsvorhabens war es, basierend auf experimentellen Untersuchungen sowie ergänzenden Strömungssimulationen und Berechnung der Partikeltrajektorien unterschiedliche Fragenstellung zur beschleunigten Beladung bzw. Alterung von mobilen Entstaubungsanlagen zu beantworten:

Die Effizienz von mobilen Entstaubungsanlagen konnte an zwei Mustergeräten in Abhängigkeit von der zugeführten Staubmassenkonzentration im Labor ermittelt werden. Dazu wurde die im Normentwurf dargestellte Testkammer zunächst aufgebaut und dann optimiert, so dass im Laborbetrieb jeweils ein stabiler Zustand des Abscheiders erreicht wurde. Die Erhöhung der Pausenzeit zwischen den Abreinigungen der einzelnen Patronenfilter führte schneller zu einem stabilen Zustand des Abscheiders. Es wurden ferner die PM_{1-} , $PM_{2,5-}$ und PM_{10-} Abscheidegrade der Entstauber ermittelt. Dabei zeigten sich -wie erwartet- hohe Massenkonzentrationsspitzen unmittelbar nach der Abreinigung.

Der Vergleich mit der Effizienz der Entstaubungssysteme im realen Betrieb erwies sich als schwieriger als zunächst erwartet. Das lag u.a. an einer geringen Bereitschaft der Betreiber (nicht der Hersteller) solcher Anlagen, gebrauchte Filter zur Verfügung zu stellen. Gleichzeitig war die Testung von real gealterten Filtern im Labor nur

eingeschränkt möglich, da einige Stäube zweifelsfrei als Sondermüll einzustufen waren oder die genaue Staubzusammensetzung unbekannt war. Aus diesem Grund waren auch Medientest von real gealterten Filtern problematisch. Neben der genannten möglichen Gefährdung durch die Stäube selbst, kam es beim Transport der Filterpatronen zu erheblichen Staubabplatzungen. Die Medien waren nach dem Herauslösen aus dem Filter nur noch teilweise vom Staubkuchen bedeckt, womit keine repräsentativen Messungen mehr möglich waren.

Durch die numerische Berechnung von Druck, Geschwindigkeit und Partikelabscheidung im Rohgasraum konnte gezeigt werden, dass die Filterpatronen über der Höhe ungleichmäßig beladen werden. Verschiedene Variationsrechnungen wurden durchgeführt, wobei die Variation der Geometrie mit zwei Einlässen als einzige zu einer gleichförmigeren Beladung der Filterpatronen führte.

Es konnte gezeigt werden, dass eine Alterung der Filter anhand der hier getesteten Prüfprozedur stattgefunden hat. Es zeigten sich zwar Unterschiede zu real gealterten Filtern, jedoch ließen diese sich auf die verschiedenen Stäube, welche zur Alterung genutzt wurden, zurückführen.

Die erarbeiteten Projektergebnisse können in wissenschaftlich-technischer Hinsicht genutzt werden, um eine Grundlage für kommende Normtests zu schaffen.

Die Projektergebnisse werden die Wettbewerbsfähigkeit insbesondere kleiner und mittlerer Filterhersteller steigern, da sie ihre Produkte schneller und gezielter auslegen und weiterentwickeln können. Auch Anwender der abreinigbaren Filter profitieren durch besser vergleichbare Daten bei der Auswahl eines mobilen Entstaubungssystems.

Durch die numerische Berechnung von Druck, Geschwindigkeit und Partikelabscheidung im Rohgasraum konnte gezeigt werden, dass die Filterpatronen über der Höhe ungleichmäßig beladen werden. Verschiedene Variationsrechnungen wurden durchgeführt, wobei die Variation der Geometrie mit zwei Einlässen als einzige zu einer gleichförmigeren Beladung der Filterpatronen führte.

Hersteller von mobilen Entstaubungssystemen können diese Ergebnisse nutzen, um ihre Geräte hinsichtlich der Abscheideleistung zu optimieren.

9 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

9.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum / Zeit
Projekt-begleitender Ausschuss (PA)	Kontinuierliche Diskussion von Ausrichtung, Stand der Arbeiten und Detailergebnissen durch die Mitglieder des PA	Vorstellung der bisher erzielten Ergebnisse, Diskussion der geplanten Arbeiten, Festlegung des weiteren Vorgehens	Durchgeführt am: 06.10.2021 13.12.2022 21.03.2023
Vorstellung der Ergebnisse durch Vorträge bei relevanten Tagungen	Information eines breiten Fachpublikums zu Zielen und Ergebnissen des Projektes	FilTech 2023 16. Symposium „Textile Filter“	15.02.2023 14.03.2023
Information und Beratung interessierter Unternehmen	Direkter Know-How Transfer zu Unternehmen, vornehmlich kmU; Informationen zu Zielen und Ergebnissen des Projektes	Gezieltes Ansprechen und Information von interessierten Unternehmen außerhalb und innerhalb des PA	erfolgt
Übernahme der Ergebnisse in die akademische/uni-versitäre Lehre	Information von Studierenden zur Filtration und Textiltechnik vor ihrem Eintritt ins Berufsleben	Vorlesungen an der Universität Duisburg-Essen: „Aerosolprozesstechnik“ Prof. Dr.-Ing. F. Schmidt „Air pollution control“ Dr.-Ing. Haep	Ab SS 2022 Ab WS 2022/2023
Veröffentlichung der Zwischenberichte auf der Webseite der Mitgliedsvereinigung	Wissenstransfer	Einstellung von Projektinformationen auf den Seiten der Mitgliedsvereinigung IUTA	
Einstellung von Projektinformationen in die öffentlich zugängliche IUTA Webseite, Bereich Industrielle Gemeinschaftsforschung, Internet-Projekt-Datenbank		Projektdatenbank IUTA	erfolgt

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum / Zeit
Veröffentlichung der Projektpräsentationen auf den Internetseiten der Mitgliedsvereinigung	Wissenstransfer	Internetseiten / Projektdatenbank	erfolgt
Übernahme der Ergebnisse in technische Regelwerke und Normen durch bestehende Mitarbeit in entsprechenden Arbeitsgruppen		Durch Prof. Dr. F. Schmidt als Mitglied folgender Norm- u. Richtlinienausschüsse: Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, Fachbereich: Allgemeine Lufttechnik (NA 060) Normausschuss Kraftfahrzeuge (FAKRA) des Verbandes der Automobilindustrie (VDA) Arbeitskreis „Kabinenluftfilter“	fortlaufend
Tätigkeitsbericht des IUTA		Tätigkeitsbericht	Für 2023 erfolgt
Veröffentlichung der aktuellen Aktivitäten und Ergebnisse auf der Webseite der FE	Wissenstransfer	Internetseiten	Fortlaufend während der Projektlaufzeit
Veröffentlichung:		Im Rahmen von Konferenzen: F&S Filtrieren und Separieren, Internationale Ausgabe 20 (2020) F&S Filtrieren und Separieren, Ausgabe 4 (2022)	erfolgt

9.2 Geplante Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Zeitraum
Veröffentlichung des Schlussberichtes auf der Webseite der Mitgliedsvereinigung	Wissenstransfer zu interessierten Personen	nach Abschluss des Vorhabens
IUTA- Workshop mit geladenen Vertretern aus Industrie und Lehre	Information interessierter Personen aus Wissenschaft und Forschung, Diskussion der Ergebnisse	Innerhalb 12 Monate nach Abschluss des Vorhabens
Beratung interessierter Unternehmen vor Ort und in der Forschungseinrichtungen	Wissenstransfer in die Wirtschaft	nach Anfrage ohne Zeitbegrenzung
Teilnahme der Projektmitarbeiter an Fachausstellungen der Industrie	Unterstützung der Firmen bei der Umsetzung der Ergebnisse	nach Anfrage ohne Zeitbegrenzung

9.3 Einschätzung der Realisierbarkeit des Transferkonzeptes

Über die durchgeführten und geplanten Transfermaßnahmen, wie PA-Sitzungen, Konferenzbeiträge, Veröffentlichungen usw., wurden die Unternehmen, die im Bereich der Filtration tätig sind, gezielt angesprochen. Unternehmen, die Produkte für den Bereich der Filterprüfung anbieten, profitieren von den Ergebnissen des IGF-Projektes.

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

Die Realisierbarkeit der weiteren geplanten Transfermaßnahmen wird als hoch eingeschätzt.

10 Anhang

10.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Unterschiedliche Ausführung mobiler Entstaubungssysteme ([14], [15])	8
Abbildung 3-2: Geschwindigkeitsprofil in einer Schlauchfilteranlage vor und nach Optimierung [18]	10
Abbildung 4-1: Grafische Darstellung der Arbeitspakete	13
Abbildung 4-2: Schemabild Prüfkammer in Anlehnung an Prüfkabine aus DIN EN ISO 21904-2 [22]	15
Abbildung 4-3: Geänderte Prüfkammer	16
Abbildung 4-4: Partikelanzahl- bzw. Massenkonzentration nach Beladung der Prüfkammer mit 5 g A2 Staub	17
Abbildung 4-5: Normierte Massenkonzentrationsverläufe	18
Abbildung 4-6: Normierte Partikelanzahlkonzentrationsverläufe verschiedener Modi des Raumlufreinigers (Philips AC2887)	19
Abbildung 4-7: Massenkonzentrationsverläufe bei Beladung des Entstaubers A mit 260 g Dolomitstaub	21
Abbildung 4-8: Massenkonzentrationsverläufe bei Beladung des Entstaubers A mit 500 g Dolomitstaub durch SAG 420	22
Abbildung 4-9: Druckverlust des Entstaubers A nach Staubzufuhr und Offline-Abreinigung	24
Abbildung 4-10: Schematischer Druckverlustverlauf während der Alterung für instabile und stabile Filter, nach Löffler	24
Abbildung 4-11: Massenkonzentrationsverläufe nach Beladung des Entstaubers A mit 500 g Dolomitstaub durch SAG 420 (Versuch II)	26
Abbildung 4-12: Massenkonzentrationsverläufe nach Beladung des Entstaubers A mit 500 g Dolomitstaub durch SAG 420 (Versuch V)	27
Abbildung 4-13: Massenkonzentrationsverläufe nach Beladung des Entstaubers A mit 1 kg Dolomitstaub durch SAG 420 (Versuch VII)	28
Abbildung 4-14: Massenkonzentrationsverläufe nach Beladung des Entstaubers A mit 1 kg Dolomitstaub durch SAG 420 (Versuch VIII)	29
Abbildung 4-15: Druckverlustanstieg Entstauber A bezüglich der zugeführten Masse	31
Abbildung 4-16: Druckverlust Entstauber B während der Alterung nach Tabelle 4-4	33
Abbildung 4-17: Druckverlust Entstauber B bei 1,5-stündiger Alterung bei 10 g/m ³	34
Abbildung 4-18: Massenkonzentrationsverläufe während der Alterung des mobilen Entstaubers B bei 5 g/m ³ Aerosolkonzentration	35
Abbildung 4-19: Massenkonzentrationen während der Alterung des mobilen Entstaubers B bei 10 g/m ³ Aerosolkonzentration	36
Abbildung 4-20: Effizienz des mobilen Entstaubers B vor und nach der Alterung	38
Abbildung 4-21: Prüfstand nach EN 779 mit eingebauten Filterpatronen	38

Abbildung 4-22: Filterpatroneneffizienz, gemessen an Filterprüfstand nach EN 779, Aerosol: DEHS	40
Abbildung 4-23: Druckverlust der Filterpatronen vor und nach künstlicher Alterung im Prüfkanal nach EN 779 (links) und im Entstauber (rechts)	41
Abbildung 4-24: Massenkonzentration während der Alterung bei real gealterten Filtern	42
Abbildung 4-25: Effizienzmessung mobiler Entstauber B im Neuzustand, nach künstlicher und realer Alterung	43
Abbildung 4-26: Effizienzmessung der Filterpatronen am Prüfkanal nach EN 779 mit DEHS im Neuzustand, nach künstlicher und realer Alterung	44
Abbildung 4-27: Druckverlust der Filterpatronen vor und nach künstlicher/realer Alterung im Prüfkanal nach EN 779 (links) und im Entstauber (rechts)	46
Abbildung 4-28: Effizienzmessung des Entstaubers B mit Aktivkohlefilter	47
Abbildung 4-29: Partikelkonzentrationen der Rohluft und der Reinluft in den Messungen 1 und 2	48
Abbildung 4-30: Effizienzmessungen des Entstaubers B ohne Aktivkohlefilter	49
Abbildung 4-31: Schematischer Aufbau des Prüfstandes zur Messung der Fraktionsabscheidegrade von Ronden im Neuzustand und nach der Alterung	50
Abbildung 4-32: Aus der Filterpatrone herausgeschnittene, glattgedrückte Ronde zur Messung am Filtermedienprüfstand	51
Abbildung 4-33: Druckverlust des Filtermediums im Neuzustand bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten	51
Abbildung 4-34: Effizienzmessung der aus der Filterpatrone herausgeschnittenen Ronde	53
Abbildung 4-35: Durch den Transport abgeplatzter Filterkuchen	54
Abbildung 4-36: Durch das Abstellen der Filterpatrone abgelöster Staub (links) und durch das Herausschneiden des Filtermediums aus der Filterpatrone abgelöster Staub (rechts)	54
Abbildung 4-37: Aus der real gealterten Filterpatrone herausgeschnittenes Filtermedium	55
Abbildung 4-38: PM _x -Abscheidegrad Entstauber B im Neuzustand, Filterstufe 1+2, 3 g/m ³ Aerosolkonzentration	56
Abbildung 4-39: PM _x -Abscheidegrad Entstauber B mit real gealterten Filtern, Filterstufe 1+2, 3 g/m ³ Aerosolkonzentration	57
Abbildung 4-40: PM _x -Abscheidegrad Entstauber B während der Alterung, Filterstufe 1+2, 5 g/m ³ Aerosolkonzentration, Abreinigung alle 15 s	58
Abbildung 4-41: PM _x -Abscheidegrad Entstauber B während der Alterung, Filterstufe 1+2, 10 g/m ³ Aerosolkonzentration, Abreinigung alle 15 s	59
Abbildung 4-42: PM _x -Abscheidegrad Entstauber B während der Alterung, Filterstufe 1+2, 10 g/m ³ Aerosolkonzentration, Abreinigung alle 10 s	60

Abbildung 4-43: PM _x -Abscheidegrad Entstauber B während der Alterung, Filterstufe 1, 10 g/m ³ Aerosolkonzentration, Abreinigung alle 10 s	61
Abbildung 4-44: Rechengitter des verwendeten Modells	62
Abbildung 4-45: Anordnung und Bezeichnung der Filterpatronen in der Filterkammer mit Rohgaseintritt	63
Abbildung 4-46: Geschwindigkeitsplots in einer mittleren vertikalen Ebene zwischen den Filterpatronen für die Berechnung des Ist-Zustandes (links: Darstellung mit eingeblendeten Filterpatronen, rechts: Darstellung ohne eingeblendete Filterpatronen)	65
Abbildung 4-47: Geschwindigkeitsplots in der vertikalen Ebene in der Mitte der Filterpatronen 1 und 2 (links) und in der Mitte der Filterpatronen 3 und 4 (rechts) für die Berechnung des Ist-Zustandes (Darstellung ohne eingeblendete Filterpatronen)	65
Abbildung 4-48: Geschwindigkeitsplots in einer horizontalen Ebene im unteren Bereich der Filterpatronen für die Berechnung des Ist-Zustandes (links: Darstellung mit eingeblendeten Filterpatronen, rechts: Darstellung ohne eingeblendete Filterpatronen)	66
Abbildung 4-49: Druckverteilung in einer horizontalen Ebene im unteren Bereich der Filterpatronen für die Berechnung des Ist-Zustandes (links: Darstellung mit eingeblendeten Filterpatronen, rechts: Darstellung ohne eingeblendete Filterpatronen)	66
Abbildung 4-50: Partikeltrajektorie für Partikel mit einem Durchmesser von 1 µm und 10 µm	67
Abbildung 4-51: Nummerierung der Filterpatronen und Zonen der Auswertung	68
Abbildung 4-52: Prozentuale Verteilung der abgeschiedenen 1 µm-Partikel in den einzelnen Filterpatronenbereichen (Ist-Zustand)	69
Abbildung 4-53: Prozentuale Verteilung der abgeschiedenen 10 µm-Partikel in den einzelnen Filterpatronenbereichen (Ist-Zustand)	70
Abbildung 4-54: Verlauf der Permeabilitäten über der Patronenlänge für den Anfangszustand (Fall A) und ein späteres Beladungsstadium (Fall B)	71
Abbildung 4-55: Prozentuale Verteilung der abgeschiedenen 1 µm-Partikel in den einzelnen Filterpatronenbereichen im Anfangszustand (Fall A) und zu einem späteren Beladungszustand (Fall B)	72
Abbildung 4-56: Prozentuale Verteilung der einzelnen abgeschiedenen 10 µm-Partikel in den einzelnen Filterpatronenbereichen im Anfangszustand (Fall A) und zu einem späteren Beladungszustand (Fall B)	73
Abbildung 4-57: Geschwindigkeitsplot in einer mittleren vertikalen Ebene zwischen Filterpatronen für die Berechnung mit einem breiteren Einlass (Darstellung ohne eingeblendete Filterpatronen)	74
Abbildung 4-58: Prozentuale Verteilung der abgeschiedenen 1 µm-Partikel in den einzelnen Filterpatronenbereichen im Ist-Zustand (8 m/s) und bei der Berechnung mit breiterem Einlass (4 m/s)	75

Abbildung 4-59: Prozentuale Verteilung der abgeschiedenen 10 µm-Partikel in den einzelnen Filterpatronenbereichen im Ist-Zustand (8 m/s) und bei der Berechnung mit breiterem Einlass (4 m/s)	76
Abbildung 4-60: Geschwindigkeitsplot in einer mittleren vertikalen Ebene zwischen den Filterpatronen für die Berechnung mit konischen Patronen (Darstellung mit eingeblendeten Filterpatronen)	77
Abbildung 4-61: Prozentuale Verteilung der abgeschiedenen 1 µm-Partikel in den einzelnen Filterpatronenbereichen im Ist-Zustand (Zylinder) und bei der Berechnung mit konischen Filterpatronen (Konus)	78
Abbildung 4-62: Prozentuale Verteilung der abgeschiedenen 10 µm-Partikel in den einzelnen Filterpatronenbereichen im Ist-Zustand (Zylinder) und bei der Berechnung mit konischen Filterpatronen (Konus)	79
Abbildung 4-63: Anordnung und Bezeichnung der Filterpatronen in der Filterkammer mit den zwei Rohgas-Eintrittsöffnungen	80
Abbildung 4-64: Geschwindigkeitsplot in einer mittleren vertikalen Ebene zwischen den Filterpatronen für die Berechnung mit zwei Einlässen (Darstellung mit eingeblendeten Filterpatronen)	80
Abbildung 4-65: Prozentuale Verteilung der abgeschiedenen 1 µm-Partikel in den einzelnen Filterpatronenbereichen im Ist-Zustand (1 Einlass) und bei der Berechnung mit zwei Einlässen (2 Einlässe)	81
Abbildung 4-66: Prozentuale Verteilung der abgeschiedenen 10 µm-Partikel in den einzelnen Filterpatronenbereichen im Ist-Zustand (1 Einlass) und bei der Berechnung mit zwei Einlässen (2 Einlässe)	82

10.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Einteilung der industriellen Staubsauger und mobilen Entstauber nach DIN EN 60335-2-69	8
Tabelle 4-1: Versuchsübersicht Entstauber A	23
Tabelle 4-2: Versuchsübersicht Entstauber A für massebezogene Druckverlustmessungen	30
Tabelle 4-3: Alterungsprozedur	31
Tabelle 4-4: Optimierte Alterungsprozedur	32
Tabelle 4-5: Prüfprozedur nach ISO/CD 16313-2	83
Tabelle 4-6: Angepasste Alterungsprozedur	83

10.3 Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] DIN EN ISO 15012, „Arbeits- und Gesundheitsschutz beim Schweißen und bei verwandten Prozessen - Einrichtung zum Erfassen und Abscheiden von Schweißrauch,“ 2013.
- [2] ISO/PWI 16313-1, „Laboratory test of dust collection systems utilizing porous filter media online cleaned using pulses of compressed gas - Part 1: Systems not utilizing integrated fans,“ 2018.
- [3] ISO/PWI 16313-2, „Laboratory test of dust collection systems utilizing porous filter media online cleaned using pulses of compressed gas - Part 2: Systems utilizing integrated fans,“ 2018.
- [4] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V., „Industriestaubsauger und Entstauber,“ *DGUV Information*, 2017.
- [5] Technische Regeln für Gefahrstoffe, TRGS 900, „Arbeitsplatzgrenzwerte,“ *Gemeinsames Ministerialblatt*, pp. 41-55, 2019.
- [6] Technische Regeln für Gefahrstoffe, TRGS 527, „Bekanntmachung zu Gefahrenstoffen,“ 2016.
- [7] T. Kuhlbusch, S. Wijnhoven und A. Haase, „Nanomaterial exposures for worker, consumer and the general public,“ *NanoImpact*, pp. 10(2018):11-25, 2018.
- [8] T. Kuhlbusch, S. Neumann und H. Fissan, „Number size distribution, mass concentration and particle composition of PM1, PM2,5, PM10 in bag filling areas of carbon black production,“ *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, pp. 1(10):660-671, 2004.
- [9] A. Maynard, B. P.A., M. Foley, A. Shvedova, E. R. Kisin und V. Castranova, „Exposure to carbon nanotube material: aerosol release during handling of unrefined single-walled carbon nanotube material,“ *Journal of Toxicology Environmental Health*, pp. 67(1):87-107, 2004.

- [10] Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, „Messung der Staubkonzentration,“ [Online]. Available: https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/das_hlug/hessentag/2005/staubkonzentration_2005_web.pdf. [Zugriff am 4 Juli 2019].
- [11] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, „Schweißrauche - geeignete Lüftungsmaßnahmen,“ *DGUV Information*, 2018.
- [12] Technische Regeln für Gefahrstoffe, TRGS 559, „Mineralischer Staub,“ *Gemeinsames Ministerialblatt*, 2010.
- [13] BG-Information, „Arbeitsplatzlüftung - Entscheidungshilfen für die betriebliche Praxis,“ *Berufsgenossenschaftliche Information für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit*, 2007.
- [14] ILT GmbH, „ILT Industrie-Luftfiltertechnik GmbH,“ [Online]. Available: www.ilt.eu. [Zugriff am 7 Januar 2020].
- [15] ULT AG, „ULT Umwelt-Lufttechnik AG,“ [Online]. Available: www.ult.de. [Zugriff am 7 Januar 2020].
- [16] DIN EN 60335-2-69, „Sicherheit elektrischer Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke - Teil 2-69: Besondere Anforderungen für Staub- und Wasserauger für den gewerblichen Gebrauch,“ 2015.
- [17] U. Dr.-Ing. Heisel, „Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 12311 "Auslegung von Absaughauben bezüglich der Späneerfassung durch Simulationsrechnung",“ 2001.
- [18] T. Schrooten, R. Esser, K. Knop, A. Kögel und G.-M. Klein, „Optimising plant components using flow simulations,“ *ZKG International*, 2009.
- [19] Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz, „Untersuchungsbericht "Lötrauchemissionen beim Einsatz von Absauggeräten - Weichlöten",“ 2004.
- [20] Universität Stuttgart, Institut für Werkzeugmaschinen; Fraunhofer Gesellschaft e.V., Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, „AiF

Projekt 19163 N "Effizienzsteigerung der Späneerfassung bei der spanenden Bearbeitung von Verbund- und Holzwerkstoffen sowie Kunststoffen," 2019.

- [21] RWTH Aachen, Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF); Uniklinik RWTH Aachen, Institut für Arbeits- Sozial- und Umweltmedizin, „AiF-Projekt 20047 N "Ermittlung von Schweißrauchexpositionen beim MSG-Schweißen unter definierten realitätsorientierten Umgebungsbedingungen," 2020.
- [22] DIN EN ISO 21904-2, „Arbeits- und Gesundheitsschutz beim Schweißen und bei verwandten Verfahren – Einrichtungen zum Erfassen und Abscheiden von Schweißrauch – Teil 2: Anforderungen an Prüfungen und Kennzeichnung des Abscheidegrades," 2020.
- [23] J. Schuberth, „Untersuchungen des Alterungsvorganges von abreinigbaren Staubfiltern bei zeitgesteuerter Abreinigung“, 2020.