



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 23.09.2020

Feinstaubfilter für kleine Holzfeuerungen

FIHOLZ



Quelle: Ökozentrum



Datum: 23.09.2020

Ort: Langenbruck

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

Ökozentrum
Schwengiweg 12, 4438 Langenbruck
www.oekozentrum.ch

Autor/in:

Michael Sattler, Ökozentrum, michael.sattler@oekozentrum.ch
Nils Appenzeller, Ökozentrum, nils.appenzeller@oekozentrum.ch

BFE-Projektbegleitung:

Sandra Hermle, sandra.hermle@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501700-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Im vorliegenden Projekt wurde eine Selektion von Materialien auf ihre Qualitäten als Feinstaubfilter für Feuerungen untersucht. Dabei wurden die Eigenschaften Brennbarkeit, Temperaturbeständigkeit, Anfangsdruckverlust, Abscheidegrad und Regenerierbarkeit untersucht. Als Richtwert für den in einer Filteranlage akzeptablen Energieaufwand wurde der Energiebedarf in der Grössenordnung eines elektrostatischen Abscheiders angenommen. Mit den Ergebnissen erfolgte eine Einschätzung zur Umsetzbarkeit in ein marktaugliches Produkt.

Es wurden die Eigenschaften von mehreren Filtermedien beim Einsatz im Rauchgas einer 9kW Pelletfeuerung charakterisiert. Es wurden einerseits marktverfügbare Materialien untersucht, die bereits als Filter für andere Anwendungen (Luftfilter, Partikelfilter für spezifische Anwendungen) eingesetzt wurden. Andererseits wurden explorative Materialien untersucht, die auf Grund der Beurteilung des Projektteams potenziell als Feinstaubfilter für Rauchgase eingesetzt werden könnten. Die Untersuchten marktverfügbaren Filtermaterialien wiesen alle gute Abscheidewerte, gute Stabilität und eine ausreichende Temperaturbeständigkeit auf. Bei Materialien welche nicht grundsätzlich als Filter gedacht sind, konnten Abscheidegrade festgestellt werden, welche mit denen der marktverfügbaren Filtermaterialien vergleichbar waren. Die explorativen Materialien haben jedoch bei der Betriebssicherheit oder bei der Regenerationsfähigkeit meist das Nachsehen. Dies weil diese Materialien bei mindestens einem Kriterium: Stabilität, Eindringtiefe der Staubpartikel oder Regelmässigkeit der Webung / Faserdichte deutlich schlechter waren. Bei den meisten dieser explorativen Materialien konnten aber Möglichkeiten zur Verbesserung der Mängel definiert werden.

Es konnte gezeigt werden, dass die Filtermedien mit zunehmender Flächenbelastungen bzw. Anströmgeschwindigkeiten nicht mehr die definierten Anforderungen erfüllen. Es ergeben sich Verschlechterungen des Abscheidegrades, Erhöhungen des Druckverlustes und Verminderung der Regenerationsfähigkeit.

Das Staubspeichervermögen beim im Projekt auf Grund des maximal möglichen Strombedarfs definierten Enddrucks von 200-300 Pa fiel bei allen Materialien sehr gering aus. Versuche zur Vergrösserung der Staubmenge auf dem Filter führten zur Erkenntnis, dass der Staubkuchen ein sehr relevanter Faktor für die Dimensionierung des Filters ist. Sobald der Staubkuchen vollständig aufgebaut ist, werden sowohl die Abscheiderate wie auch der Druckverlust durch den Staubkuchen definiert. Der nach Aufbau des Staubkuchens resultierende Druckverlust liegt bei einer Anströmgeschwindigkeit von 1.2 m/min allerdings deutlich über 200-300 Pa. Daher ist aufgrund der erhobenen Daten die Entwicklung eines bezüglichlichen Stromverbrauchs dem elektrostatischen Filter ebenbürtiges Produkt bisher nicht möglich.

Werden die Ansätze zur Reduktion von Druckverlust und Maximierung der Filtergösse konsequent weiterverfolgt ist es denkbar für selten Betriebene Feuerungen ein ökonomisch konkurrenzfähiges Produkt zu entwickeln.



Résumé

Dans le cadre du présent projet, une sélection de matériaux a été examinée pour leurs qualités de filtres à poussières fines pour les fours. Les propriétés d'inflammabilité, de résistance à la température, de chute de pression initiale, d'efficacité de séparation et de régénéralité ont été étudiées. Comme ligne directrice pour la consommation d'énergie acceptable dans un système de filtration, on a supposé un besoin en énergie de l'ordre de grandeur d'un précipitateur électrostatique. Les résultats ont été utilisés pour évaluer la possibilité de les convertir en un produit commercialisable.

Les propriétés de plusieurs médias filtrants ont été caractérisées pour être utilisées dans les gaz de combustion d'une combustion de pellets de 9 kW. D'une part, on a étudié les matériaux disponibles sur le marché qui étaient déjà utilisés comme filtres pour d'autres applications (filtres à air, filtres à particules pour des applications spécifiques). D'autre part, des matériaux exploratoires ont été étudiés qui, selon l'évaluation de l'équipe du projet, pourraient potentiellement être utilisés comme filtres à poussière fine pour les gaz de combustion. Les matériaux filtrants étudiés disponibles sur le marché ont tous montré de bonnes valeurs de séparation, une bonne stabilité et une résistance suffisante à la température. Pour les matériaux qui ne sont pas fondamentalement destinés à être utilisés comme filtres, des efficacités de séparation comparables à celles des matériaux filtrants disponibles dans le commerce ont été trouvées. Cependant, les matériaux exploratoires sont généralement désavantagés en termes de sécurité opérationnelle ou de régénéralité. En effet, ces matériaux étaient nettement moins bons sur au moins un critère : stabilité, profondeur de pénétration des particules de poussière ou régularité du tissage / densité des fibres. Pour la plupart de ces matériaux exploratoires, il a cependant été possible de définir des possibilités d'améliorer les lacunes.

Il a pu être démontré que les médias filtrants ne répondent plus aux exigences définies avec l'augmentation des charges de surface ou des vitesses d'entrée. Il en résulte une détérioration de l'efficacité de la séparation, une augmentation de la chute de pression et une réduction de la capacité de régénéralité.

La capacité de stockage de la poussière à la pression finale de 200-300 Pa définie dans le projet en raison de la puissance maximale possible requise était très faible pour tous les matériaux. Les expériences visant à augmenter la quantité de poussière sur le filtre ont permis de conclure que le gâteau de poussière est un facteur très important pour le dimensionnement du filtre. Une fois que le gâteau de poussière est entièrement constitué, le taux de collecte et la perte de charge sont tous deux définis par le gâteau de poussière. Cependant, la chute de pression qui se produit après la formation du gâteau de poussière est considérablement plus élevée que 200-300 Pa à une vitesse d'entrée de 1,2 m/min. Par conséquent, sur la base des données recueillies, le développement d'un produit équivalent au précipitateur électrostatique en termes de consommation d'énergie n'est pas encore possible.

Si les approches visant à réduire la perte de pression et à maximiser la taille des filtres sont systématiquement poursuivies, il est concevable de développer un produit économiquement compétitif pour les systèmes de tir rarement utilisés.



Summary

In the present project a selection of materials was examined for their qualities as fine dust filters for stoves. The properties flammability, temperature resistance, initial pressure drop, separation efficiency and regenerability were investigated. As a guideline value for the acceptable energy consumption in a filter system, the energy requirement of an electrostatic precipitator was assumed. The results were used to assess the feasibility of a marketable product.

The properties of several filter media were characterized when used in the flue gas of a 9kW pellet combustion. On the one hand, market available materials were investigated, which were already used as filters for other applications (air filters, particle filters for specific applications). On the other hand, explorative materials were investigated which, based on the assessment of the project team, could potentially be used as fine dust filters for flue gases. The investigated commercially available filter materials all showed good separation values, good stability and sufficient temperature resistance. For materials that are not basically intended to be used as filters, separation efficiencies were found that were comparable to those of commercially available filter materials. However, the explorative materials are usually at a disadvantage in terms of operational safety or regenerability. This is because these materials were clearly inferior in at least one criterion: stability, penetration depth of the dust particles or regularity of the weave / fiber density. For most of these exploratory materials, however, it was possible to define ways to improve the deficiencies.

It could be shown that the filter media no longer meet the defined requirements with increasing surface loads or inflow velocities. This results in a decrease in separation efficiency, an increase in pressure drop and a reduction in regeneration capability.

The dust storage capacity at the final pressure of 200-300 Pa defined in the project due to the maximum possible power requirement was very low for all materials. Experiments to increase the amount of dust on the filter led to the conclusion that the dust cake is a very relevant factor for the dimensioning of the filter. As soon as the dust cake is completely built up, both the separation rate and the pressure drop are defined by the dust cake. However, the pressure loss resulting after the dust cake has built up is significantly higher than 200-300 Pa at an inflow velocity of 1.2 m/min. Based on the data collected, the development of a product equivalent to the electrostatic filter in terms of power consumption has not yet been possible.

If the approaches to reduce pressure loss and maximize filter size are consistently pursued, it is conceivable to develop an economically competitive product for firing systems that are rarely operated.



Take-home messages

- Um Holz als speicherbaren Energieträger unter Einhaltung der Ziele der Klima- und Luftreinhaltepolitik zukünftig in kleinen Feuerstätten zu nutzen, sind Filteranlagen eine Voraussetzung.
- Untersuchungen an einer Vielzahl von Filtermaterialien zeigen, dass die gravimetrisch gemessene Feinstaubkonzentration im Rauchgas von Holzfeuerungen durch den Einsatz dieser Materialien als Feinstaubfilter oftmals über 80 % reduziert werden können.
- Um Abscheidegrade von über 80 % bei geringem Druckverlust zu erzielen müssen die Filter sehr gross dimensioniert sein und das Filtermaterial muss regelmässig getauscht oder regeneriert werden. Auf Basis der untersuchten Materialien und den bekannten und energetisch vertretbaren Regenerationsverfahren erachtet es die Autoren als nicht möglich, einen Filter zu bauen welcher für die Anwendung an typischen Einzelraumfeuerstätten und kleinen Kesseln bezüglich Druckverlust, Energieverbrauch, Bauvolumen, Anschaffungs- sowie Betriebskosten und Filterwirkung mit einem elektrostatischen Filter vergleichbar ist.
- Sollten die Anforderungen an Emissionsgrenzwerte in Zukunft den Einbau einer Filteranlage erfordern, ist ein Einsatz von Anlagen/Materialien wie sie hier untersucht wurden, in wenig betriebenen Feuerungen (ca. 10 Betriebsstunden/Monat) denkbar. Die aus den wenigen Betriebsstunden resultierenden geringen Staubmengen auf dem Filter würden es ermöglichen, innerhalb der Heizperiode den Filter lediglich 1-2-mal zu ersetzen. Dies würde eine Bauweise ohne automatischen Regenerationsmechanismus erlauben und könnte die Gesamtbetriebskosten unter vorteilhaften Randbedingungen auf ein attraktives Niveau senken.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	4
Summary	5
Take-home messages	6
Inhaltsverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	9
1 Einleitung	10
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	10
1.2 Motivation des Projektes	10
1.3 Projektziele	11
1.4 Grundlagen und Filtertechnik	11
1.4.1 Abscheidemechanismen	11
1.4.2 Partikelgrösse	13
1.4.3 Filtertechnik	13
2 Anlagenbeschrieb	14
3 Vorgehen und Methode	16
3.1 Materialsuche	17
3.2 Versuchsabläufe	17
3.2.1 Anfangsdruckverlust	17
3.2.2 Staubabscheidung	17
3.2.3 Temperaturbeständigkeit.....	18
3.2.4 Brennbarkeit	18
4 Ergebnisse und Diskussion	19
4.1 Materialliste.....	19
4.1.1 Gewebefilter.....	19
4.1.2 Nadelfilze und Vliesstoffe	20
4.1.3 Schüttschichten	21
4.2 Berechnungen und Vergleich zu elektrostatischen Filtern	21
4.2.1 Abschätzung der Abgasmenge	21
4.2.2 Definition Filterquerschnittsfläche für Druckverlustmessungen	21
4.2.3 Definition zulässiger Druckverlust	22
4.3 Kriterienkatalog.....	22
4.3.1 Temperaturstabilität	22
4.3.2 Filterwirkung	23
4.3.3 Brennbarkeit	23
4.3.4 Anfänglicher Druckverlust.....	23



4.3.5	Packungsdichte	24
4.3.6	Mechanische Stabilität.....	24
4.3.7	Einbaugrösse.....	24
4.3.8	Filterstandzeit	24
4.3.9	Regenerierbarkeit	24
4.3.10	Entsorgung	24
4.3.11	Kosten / Wirtschaftlichkeit	24
4.4	Voruntersuchung der Materialien	25
4.5	Druckverlustmessungen	26
4.6	Temperaturbeständigkeit.....	28
4.7	Brennbarkeit	30
4.8	Staubabscheidung	31
4.8.1	Staubabscheidung bei einer Anströmgeschwindigkeit von 1.2 m/min	31
4.8.2	Staubabscheidung bei einer Anströmgeschwindigkeit von 6 m/min	49
4.9	Regeneration	61
4.10	Filterkuchen als Filterndes Medium.....	64
4.11	Wirtschaftlichkeit und Grösse/Entwicklungspfad.....	67
5	Schlussfolgerungen und Fazit	69
5.1	Bewertungsmatrix	69
5.2	Schlussfolgerungen	71
5.3	Fazit	72
6	Ausblick und zukünftige Umsetzung	73
7	Literaturverzeichnis	74



Abkürzungsverzeichnis

ΔP	Druckdifferenz
CO	Kohlenmonoxid
kW	Kilowatt
M	Meter
Min	Minute
O ₂	Sauerstoff
PM	Particulate Matter (Feinstaub)
S	Sekunde
Pa	Pascal



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Wie die Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL in ihrer aktuellen Studie „Biomassenpotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung“ feststellt, existiert selbst beim derzeit schon intensiv genutzten Waldholz ein grosses unerschlossenes Potenzial. Es ist daher anzunehmen, dass die Energienutzung aus Biomasse künftig ansteigen wird. Gleichzeitig ist festzustellen, dass Holzfeuerungsanlagen grundsätzlich zu den grössten Feinstaubemittlern gehören mit einem entsprechend grossen gesundheitsschädigenden Risiko. Dazu tragen die ca. 600'000 Kleinf Feuerungsanlagen der Schweiz zu einem nicht unerheblichen Teil bei. Diese Situation widerspiegelt sich auch in der Mitte 2018 in Kraft getretenen Revision der Luftreinhalteverordnung, die neu auch für Holzfeuerungen unter 70 kW (=kleine Holzfeuerungen) eine Messpflicht mit entsprechenden Grenzwerten für Feinstaubemissionen vorsieht.

Das Potenzial, die Staubemissionen durch korrekte Bedienung der Feuerstätten zu reduzieren, ist grundsätzlich gross, wird aber oft nicht genutzt. Dies auch deshalb, weil verschiedene Feuerstätten unterschiedliche Bedienung erfordern. Im Bericht „Nutzereinflüsse auf die Emissionen aus Kaminöfen“ [1] wird gezeigt, dass selbst die seit Jahren propagierte Massnahmen beim Beschicken der Feuerung, der sog. Oberabbrand, bei modernen Feuerstätten höhere Emissionen als der Durchbrand verursachen kann. Mit dieser Erkenntnis wird es noch schwieriger, durch Informationskampagnen einen feinstaubarmen Betrieb von Feuerstätte zu erreichen.

Da die Feinstaubemissionen von Stückholz-Feuerstätten oft einen grossen Anteil Russ mit einem hohen Treibhauspotenzial enthalten, wird das Argument, Holzfeuerstätten würden das Klima schützen, stark relativiert. Zumindest dann, wenn der Betreiber der Feuerstätte ohne Feinstaubfilter erfolgt.

Aus den genannten Gründen wird in diesem Projekt auf Sekundärmassnahmen fokussiert, die weitgehend unabhängig vom Nutzer und von der Art der Feuerstätte die Feinstaubemissionen reduzieren.

1.2 Motivation des Projektes

Nach intensiven Gesprächen mit verschiedenen Herstellern unterschiedlicher Partikelfiltertechnologien schien es möglich, eine Abgasfilterung mit durchströmten Filtermedien für Kleinf Feuerungsanlagen zu realisieren. Die Verwendung von durchströmten Partikelfiltern würde zur elektrostatischen Abscheidung als zweiter komplementärer Technologiepfad das Einsatzspektrum erweitern. Gerade bei der Nachrüstung oder bei beschränkten Platzverhältnissen, könnte eine in das Rauchrohr integrierte Filtereinheit deutliche Vorteile aufweisen. Stehen zwei unabhängige Technologien zur Feinstaubabscheidung zur Verfügung, ergeben sich auch neue regulative Möglichkeiten. Mit der Entwicklung von Filteranlagen für kleine Holzfeuerungen wird eine wichtige Technologie bereitgestellt, die Feinstaubemissionen massiv zu reduzieren. Von den Ergebnissen der Untersuchung können auch Hersteller von elektrostatischen Abscheidern profitieren. Das Problem der Ausflockung bei elektrostatischen Abscheidern kann mit einem geeigneten Filtermaterial reduziert werden.



1.3 Projektziele

Das Ziel des Projektes ist es, die grundsätzliche Verwendbarkeit von Filtern unter den durch kleine Holzfeuerungen für Ein- und Mehrfamilienhäusern gegebenen technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu erforschen. Der Stromverbrauch im Betrieb (u.a. Rauchgasventilator) wird im Verhältnis zu bestehenden elektrostatischen Filtern eingeordnet.

Als Ergebnis werden die prinzipiellen Stärken und Schwächen der verschiedenen Filtermedien und Bauformen dargestellt.

Zudem wird ein Entwicklungspfad zur weiteren Konkretisierung eines serientauglichen Filters für Rauchgas von kleinen Holzfeuerungsanlagen erarbeitet.

1.4 Grundlagen und Filtertechnik

Die folgenden Ausführungen zur Filtertechnik erheben keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit. Sie sollen lediglich die für das Projekt relevanten Grundlagen erläutern. Für ausführlichere Informationen sei auf [1], [2], [3], [4] verwiesen. Weiter haben verschiedene Experten im Bereich Filtertechnik der Firmen B&S Industrieservice GmbH, Lydall Gutsche GmbH & Co. KG, Herding GmbH Filtertechnik und Oekosolve AG intensiv bei der Erarbeitung der Grundlagen unterstützt sowie bei der Auswahl der untersuchten Filtermaterialien und der Interpretation der Resultate mitgewirkt.

1.4.1 Abscheidemechanismen

Es gibt mehrere verschiedene Abscheidemechanismen die im Folgenden kurz erläutert werden. Diese Mechanismen kommen je nach Grösse der Staubpartikel mehr oder weniger zum Tragen. Für die Wahl des Filtermediums und dessen Einsatzart ist es entscheidend zu wissen, welche Art von Abscheidemechanismen zum Tragen kommen und wie diese beeinflusst werden können. Der Zusammenhang von Partikeldurchmesser und Abscheideeffekten kann für ein Beispielmateriale wie folgt dargestellt werden.

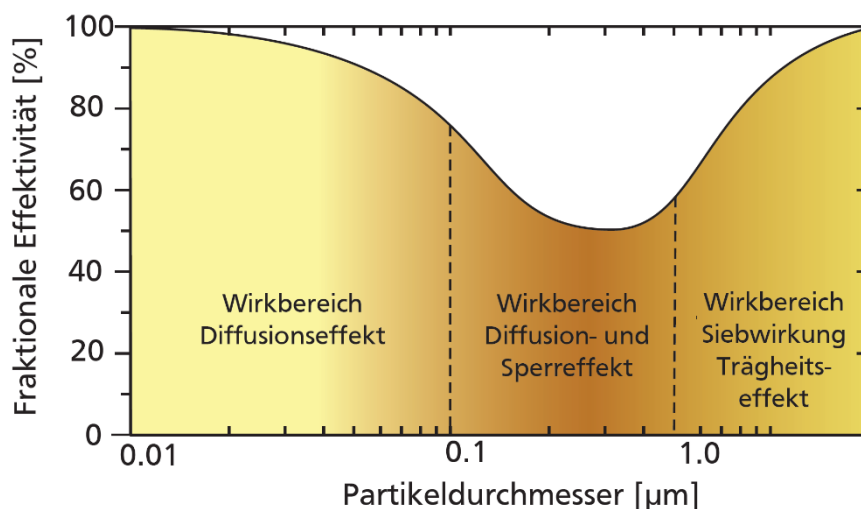
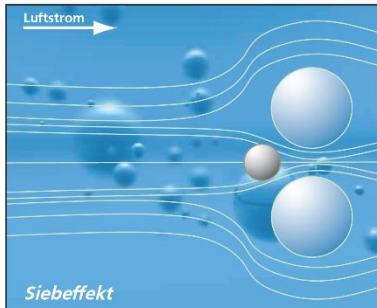


Abbildung 1: Wirkbereiche von Abscheidemechanismen [1]

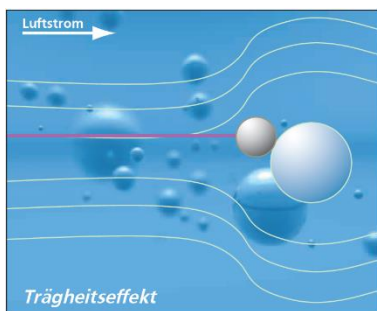


Siebeffekt:



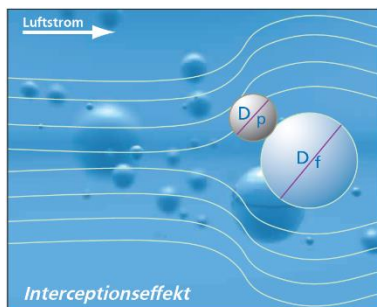
Das Filtermaterial hat eine Siebwirkung, wenn der Abstand zwischen zwei Fasern kleiner ist als der Partikeldurchmesser. [1]

Trägheitseffekt:



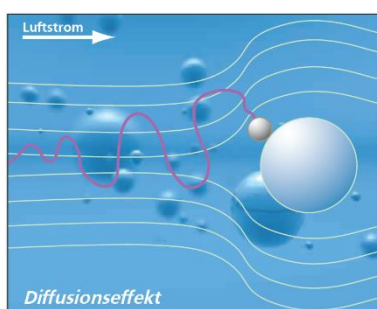
Ist die Grösse des Partikels ausreichen gross, dass dieses Aufgrund seiner Trägheit nicht mehr dem Luftstrom folgt, bleibt es bei einer Umlenkung des Luftstromes durch eine Faser an dieser hängen. Der Trägheitseffekt nimmt mit steigender Luftgeschwindigkeit, größerem Partikeldurchmesser sowie kleinerem Faserdurchmesser zu. [1]

Sperreffekt



Sind die Partikel ausreichend klein und leicht folgen sie dem Luftstrom. Ein Partikel wird durch den Sperreffekt abgeschieden, wenn der Mittelpunkt des Partikels einer Strömungslinie folgt, welche näher als dessen Radius von der Faser entfernt ist. Mit steigendem Partikeldurchmesser, geringerem Faserdurchmesser und geringerem Abstand zwischen den Fasern nimmt der Sperreffekt zu. [1]

Diffusionseffekt:



Sehr kleine Partikel ($<1 \mu\text{m}$) folgen nicht den Strömungslinien. Sie werden von der Strömung in Schwingung versetzt und bleiben bei Berührung mit einer Faser an dieser hängen. Die Wahrscheinlichkeit, dass Partikel mit den Fasern aufgrund des Diffusionseffektes in Berührung kommen, nimmt im Allgemeinen mit steigender Partikelgröße und zunehmender Faseranströmgeschwindigkeit ab. [1]

Vollständigkeitshalber soll hier auch noch die elektrostatische Anziehung erwähnt sein. Diese spielt für dieses Projekt allerdings nur eine untergeordnete Rolle.



1.4.2 Partikelgrösse

Die Grösse der Partikel ist eine wichtige Grösse bei der Wahl des Filtermaterials. Als Feinstaub werden Partikel mit einem Partikeldurchmesser $\leq 10 \mu\text{m}$ bezeichnet. Dabei ist der Anteil an Partikeln bei Biomassenfeuerungen kleiner PM1 (Partikeldurchmesser $\leq 1 \mu\text{m}$) erheblich. Untersuchungen zeigen, dass es sich bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz, von Spanplatten und Altholz zu mehr als 80% der Masse an festen und flüssigen Teilchen um Partikel $< 1 \mu\text{m}$ handelt. Bei modernen Feuerungen kann es sogar deutlich mehr als 90% sein. [5]

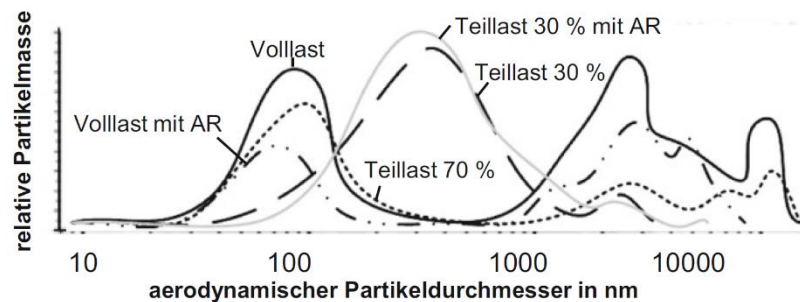


Abbildung 2: Partikelgrößenverteilung einer Pelletfeuerung (30 kW) mit Walzen-Lamellenrost mit Holzpellets [5]

1.4.3 Filtertechnik

Abscheidende Filtermaterialien lassen sich aufgrund ihrer Wirkungsweise in zwei Hauptgruppen unterteilen. Zum einen gibt es die Tiefenfilter und zum anderen die Oberflächenfilter. Bei den Tiefenfiltern findet die Abscheidung hauptsächlich im inneren des Filtermediums statt. Deswegen können sie in der Regel nicht regeneriert werden und kommen deswegen hauptsächlich bei kleinen Staubkonzentrationen zum Einsatz. Aus diesem Grund spielen sie in diesem Projekt nur eine untergeordnete Rolle. Bei Oberflächenfiltern findet die Abscheidung hauptsächlich auf der Anströmseite des Filters statt. Sie ist massgeblich von Filterkuchen abhängig. Das Betriebsverhalten von Oberflächenfiltern hängt von einer Vielzahl von Einflussgrössen ab.

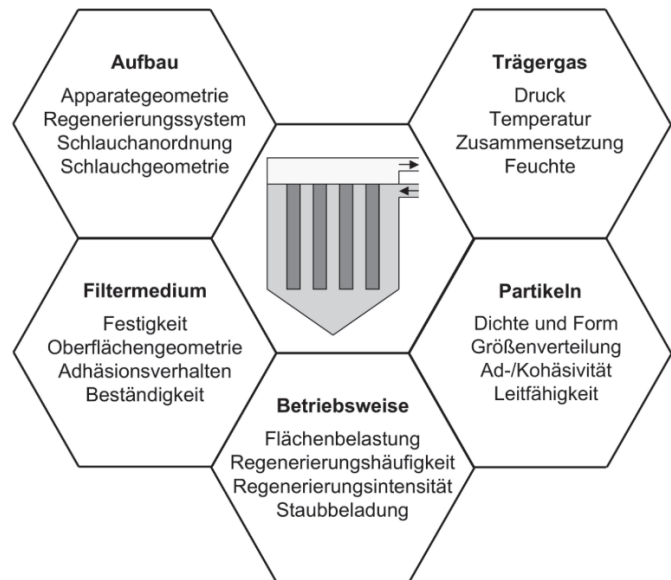


Abbildung 3: Zusammenstellung von Einflussgrössen auf das Betriebsverhalten von Oberflächenfiltern am Beispiel einer Schlauchfilteranlage [2]



2 Anlagenbeschreibung

Die Versuchsanlage wurde im Verlauf des Projektes aufgrund gemachter Erkenntnisse wiederholt umgebaut und angepasst. Im Folgenden wird nur auf die finale Version der Versuchsanlage und ihre Funktionen eingegangen. Resultate welche mit einer älteren Version gemacht wurden sind an entsprechender Stelle als solche ausgewiesen. Die Grundstruktur der Anlage war bei allen Versionen gleich und kann wie folgt beschrieben werden.

Parallel zu einer Abgasanlage wird eine Versuchsstrecke aufgebaut welche es erlaubt einen definierten Anteil des Rauchgases abzusaugen und den Testfilter damit zu belasten. Die Anlage kann wie folgt schematisch dargestellt werden.

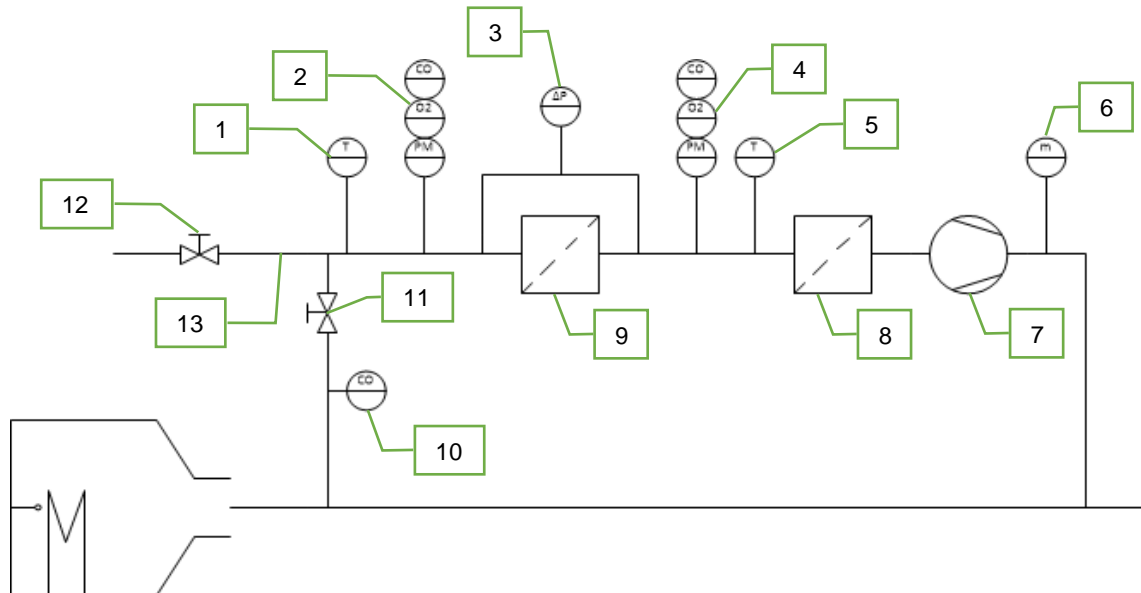


Abbildung 4: Funktionsschema der Versuchsanlage

Nr.	Bezeichnung / Funktion	Messgerät	Beschreibung
1	Temperaturmessung vor dem Testfilter	Typ K Element	Typ K Element
2	Messtelle für CO, O ₂ , Feinstaubkonzentration vor dem Testfilter	Testo 380	CO, und O ₂ Messtelle dauerhaft besetzt Feinstaubmessgerät fliegend
3	Druckdifferenz über den Testfilter		
4	Messtelle für CO, O ₂ , Feinstaubkonzentration nach dem Testfilter	Testo 380	Bei Feinstaubversuchen über die ganze Versuchszeit mit Test 380 ausgerüstet. Dieses Gerät zeichnet sämtliche Messgrößen dieser Messtelle auf.



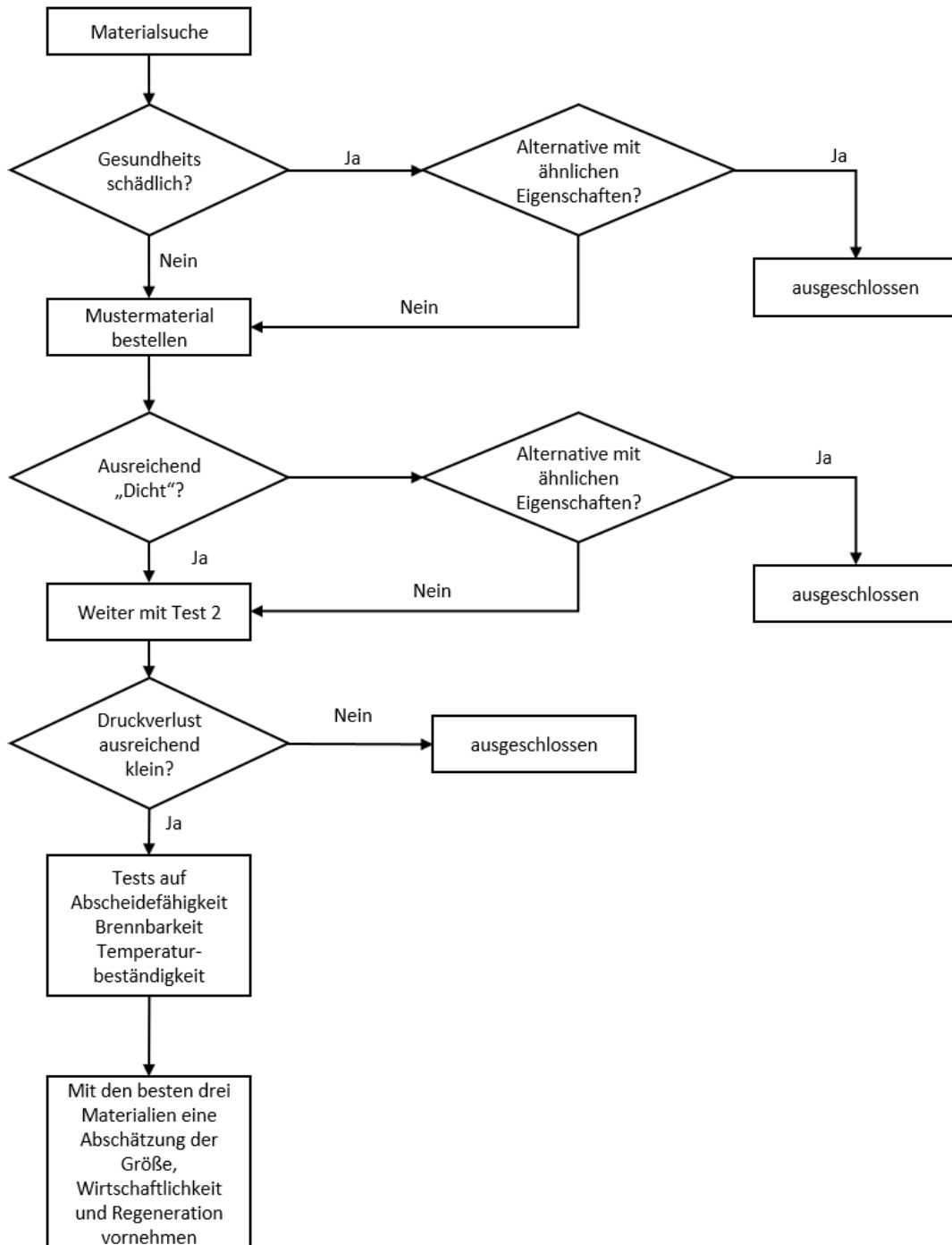
5	Temperaturmessung nach dem Testfilter	Typ K Element	
6	Massenstrommessung	Endress Hauser	
7	Luftgebläse		Zur Erzeugung des notwendigen Unterdrucks in der Teststrecke
8	Feinstaubfilter		Zum Schutz des Luftgebläses und der Massenstrommessung
9	Position der Testfilter		Aufnahme für Filterrondellen von Ø230 mm
10	Messstelle für CO Messung		Nur für Inbetriebnahme. Bei Versuchen nicht in Verwendung
11	Abgas Ventil		Zum Trennen der Anlage von der Abgasanlage, wenn eine Filterbelastung nicht gewünscht ist. (Anfangsdruckverlust Messung)
12	Luft Ventil		Zum Zuschalten von Frischluft oder für den Betrieb der Anlage ohne Abgas
13	Edelstahlrohr Ø230mm beheizt		

Tabelle 1: Komponenten der Versuchsanlage



3 Vorgehen und Methode

Das grundsätzliche Vorgehen verlief gemäss dem im Forschungsvertrag SI/501700-01 dargestellten Arbeitspaketen. Das Vorgehen wurde gemäss den Zwischenergebnissen leicht angepasst. Das Vorgehen im Projekt kann wie folgt schematisch dargestellt werden.





3.1 Materialsuche

Bei der Suche nach geeigneten Filtermaterialien wurde auf Materialien fokussiert, die potenziell Kostengünstig, flexibel und mechanisch möglichst belastbar sind. Bekannte Materialien wie Metallgewebefilter und Filterkerzen aus keramischem Material wurden auf Grund der hohen Kosten und fehlenden Flexibilität nicht berücksichtigt.

Auch Materialien mit bekanntlich guter Brennbarkeit oder geringer Temperaturstabilität ($< 100\text{ °C}$) wurden in der Regel nicht berücksichtigt.

Die Auswahl der Materialien erfolgte auf Grund der erarbeiteten Grundlagen aus Kapitel 1.4 und auf Grund von Empfehlungen von Experten der Firmen B&S Industrieservice GmbH, Lydall Gutsche GmbH & Co. KG, Herding GmbH Filtertechnik und Oekosolve AG. Einige Firmen stellten verschiedene grössere und kleinere Materialmuster zu Verfügung.

3.2 Versuchsabläufe

3.2.1 Anfangsdruckverlust

Um den Anfangsdruckverlust ermitteln zu können wurde die Prüfstrecke von der Abgasanlage getrennt. Dafür wird das Ventil Nr. 11 geschlossen und Nr. 12 geöffnet. Die Anlage wird somit nur mit Luft betrieben. Der Versuchsablauf kann wie folgt beschrieben werden:

1. Es wird eine Filterrondelle in der Filteraufnahme montiert
2. Die Anlage wird hochgefahren und in einen stationären Betrieb überführt.
3. Anschliessend wird für ca. 5 min gemessen.
4. Geschwindigkeit verstellen und warten bis erneut stationär
5. Wieder ca. 5 min Messen

3.2.2 Staubabscheidung

Für die Bestimmung des Abscheidegrades wurde vor den Versuchen für die untersuchten Geschwindigkeiten und die dazugehörigen Ofeneinstellung ein Referenzversuch gefahren. Bei diesem wurde die Staubkonzentration vor dem Testfilter gemessen. Der Versuchsablauf für die Staubabscheidung kann wie folgt beschrieben werden:

1. Kontrolle Abgas Ventil (11) geschlossen und Luft Ventil (12) offen
2. Einschalten des Pelletofens und der Rohrbeheizung der Teststrecke
3. Einschalten aller Messgeräte und auf Betriebstemperatur bringen
4. Prüfung des Test-Messgerätes und Säuberung falls notwendig anschliessend ebenfalls hochfahren
5. Einlegen eines Testfilters
6. Abwarten von stationären Bedingungen
7. Sobald stationäre Bedingungen aller Messgeräte und der Teststrecke erreicht sind umschalten auf Abgasbetrieb (Ventil 11 offen, Ventil 12 geschlossen).
8. Messung der Feinstaubkonzentration nach dem Testfilter bis Abschaltkriterien erreicht sind. Diese sind für die untersuchten Anströmgeschwindigkeiten:



- a. Für 1.2 m/min: Differenzdruck über den Filter >200 Pa
 - b. Für 6.0 m/min: Differenzdruck über den Filter >500 Pa
9. Umschalten auf Luftbetrieb / oder Anlage herunterfahren

3.2.3 Temperaturbeständigkeit

Für die Bestimmung der Temperaturbeständigkeit wurde ein Hochtemperaturofen mit Temperaturüberwachung/Regulierung verwendet. Die Prüflinge wurden in der Grösse 10x10 cm erstellt. Der Versuchsablauf kann wie folgt beschrieben werden

1. Prüfling wird auf Biegung und Knickung getestet vor der Erwärmung. Ergebnisse werden schriftlich wie auch fotografisch festgehalten.
2. Der Prüfling wird im Ofen für 6h bei Prüftemperatur getestet.
3. Prüfling wird nach dem Abkühlen wieder auf Biegung und Knickung. Ergebnisse werden schriftlich wie auch fotografisch festgehalten.

3.2.4 Brennbarkeit

Für die Überprüfung der Brennbarkeit der Filtermaterialien wurden ca. 10cm Lange und 1cm Breite Stücke senkrecht eingespannt. Es wurde versucht den Prüfling am unteren schmalen Ende zu entzünden. Die Veränderungen am Prüfling wurden schriftlich und fotografisch festgehalten.



4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Materialliste

Filtermaterialien lassen sich grundsätzlich in starre Filtermaterialien, flexible Filtermaterialien und Schüttschichten unterteilen. Eine etwas aussagekräftigere Unterteilung kann aufgrund des Herstellverfahrens gemacht werden. Dieses kann die Abscheidefähigkeit eines Materials massgebend beeinflussen. Die geprüften Materialien sind im Folgenden unter den entsprechenden Filterkategorien aufgeführt und spezifiziert.

4.1.1 Gewebefilter

Zu den Gewebefiltern gehören alle Materialien welche aus rechtwinklig verwobenen Fadensystemen bestehen. Sie finden heutzutage in der Praxis immer weniger Verwendung da sie die gewünschten Abscheidewirkung nicht zuverlässig erreichen. [2]

- Aramidgewebe
 - Aramidgewebe: Körpergebundenes Gewebe aus Aramid mit einem Flächengewicht von 170 g/m²
- Glasfasergewebe
 - Rovinggewebe: Leinwandgebundene Roving Gewebe aus Glas. Es wurden ein Material mit dem Flächengewicht von 570 g/m² untersucht.
 - Glasfilamentgewebe Silane: Gewebe mit Körper- oder Leinwandbindung aus Glasfilament welche mit Silane imprägniert sind. Es wurden Materialien mit den Flächengewichten 48 g/m², 80 g/m², 110 g/m², 160 g/m², 200 g/m² und 390 g/m² untersucht.
 - isoGLAS®-Gewebe: Glasgewebe Isolationsmaterial aus E-Glasfilamentgarn und mit einer Dicke von 1.5mm.
- Carbonegewebe aus streckgerissem Garn Typ SPC8506 der Firma SLG Carbon
- Keramikgewebe
 - Viele Glasfasermaterialien sind auch in keramischen Ausführungen erhältlich. Diese wurden aber nicht untersucht, weil Keramik als Krebszerregend eingestuft ist.
- Metallgewebefilter
 - Dieser Filter besteht aus drei Lagen Metallgewebe mit einer Porengrösse von 21 µm. Dieses Filter wird von der Fa. Spörl unter der Bezeichnung Topmesh 3-lagig, TM3-KT 10 vertrieben.
- Organische Filter
 - Handelsüblicher Stoff aus Baumwolle in Weiss.



Abbildung 5: Aramidgewebe

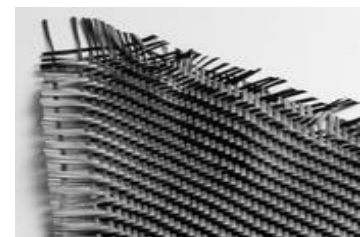


Abbildung 6: Carbonfasergewebe

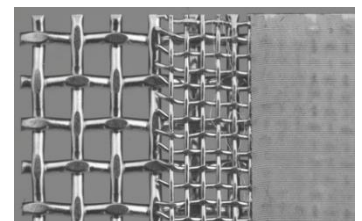


Abbildung 7: Metallgewebe Topmesh 3-Lagig



4.1.2 Nadelfilze und Vliesstoffe

Diese Materialien sind alle aus einer Art Fasern hergestellt. Sie unterscheiden sich sowohl durch das Herstellungsverfahren wie auch durch spezifische Additive welche die Filtereigenschaften verändern. Diese Materialien sind heutzutage bei der Feinstaubfiltrierung am weitesten verbreitet.

- Glasfasermaterialien

- Glasfasermatte von der Firma Herding. Sie hat eine Dicke von 20 mm und ein Flächengewicht von 3000 g/m².
- isoGLAS® Nadelvlies aus E-Glas Typ AY von der Firma Frenzelit. Das Nadelvlies hat eine Dicke von 4mm und einem Flächengewicht von 500 g/m².
- isoGLAS® Nadelvlies 6µm von der Firma Frenzelit. Das Nadelvlies hat eine Dicke von 6.5mm und einem Flächengewicht von 1000 g/m².
- Insulfrax LTX 25mm Dicke eine Wärmedämmmatte für Öfen mit einer Temperaturbeständigkeit bis 1260°C und einer Dichte von 96 kg/m³

- Steinwolle

- Brandschutzplatte FPI 700 aus Steinwolle von der Firma Flumroc. Dicke des Testmaterials war ca.10mm die Dichte des Materials liegt bei 120 kg/m³.



Abbildung 8: Flumroc Brandschutzplatte

- Carbon Material

- Cabonfaserfilz, Typ Sigracell KFD 2,5 EA von der Firma SLG Carbon.

- Kunststofffilze

- microvel® TF, optivel®, antafin®, mebratex® ein Nadelvlies der Firma Lydall Gutsche. Nachfolgend als microvel® TF bezeichnet
- microvel® PL, antafin®, ein Nadelvlies der Firma Lydall Gutsche. Nachfolgend als microvel® PL bezeichnet
- needlona® ein Vlies aus PTFE von der Firma BWF mit einem Flächengewicht von 700g/m² und einer Dicke von 1.3mm.

- Luftfiltervlies

- Diese Filter haben eine Dicke von ca. 0.4 mm und ein Flächengewicht von 70 g/m².



Abbildung 9: Luftfiltervlies



4.1.3 Schüttschichten

Dies Art von Filtern besteht aus einer losen Schüttung von körnigem Material. Es ist die einzige Art von Filtermaterial bei welcher das Herstellverfahren nicht direkt mit der Filtereigenschaften zusammenhängt.

- Keramikugeln

- SiLibeads Keramikugeln Typ ZS der Firma Sigmund Linder. Der Filter besteht aus einer 1.5 cm hohen Kugelschüttung von Kugeln aus Zirkonsilikat mit einem Durchmesser von 2 bis 2.2 mm, die jeweils mit einem Edelstahlgitter 20MESH abgeschlossen wird. Die Kugeln werden lose geschüttet in das Filtergehäuse gegeben.
- SiLibeads Keramikugeln Typ ZS der Firma Sigmund Linder. Der Filter besteht aus einer 1.5 cm hohen Kugelschüttung von Kugeln aus Zirkonsilikat mit einem Durchmesser von 1 bis 1.2 mm, die jeweils mit einem Edelstahlgitter 20MESH abgeschlossen wird. Die Kugeln werden lose geschüttet in das Filtergehäuse gegeben.

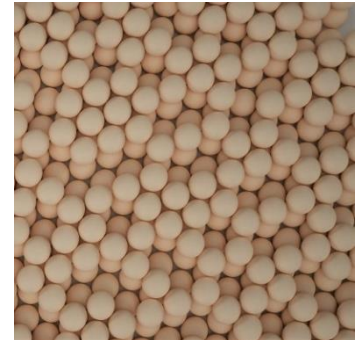


Abbildung 10: Keramikugelschüttung

- Blähton Kugeln

- Der Kugelfilter Blähton besteht aus einer 6 cm hohen Kugelschüttung von Kugeln aus offenporigem Blähton mit einem Durchmesser von 4 bis 6 mm, die jeweils mit einem Edelstahlgitter 20MESH abgeschlossen wird. Die Kugeln werden lose geschüttet in das Filtergehäuse gegeben.



4.2 Berechnungen und Vergleich zu elektrostatischen Filtern

4.2.1 Abschätzung der Abgasmenge

Abbildung 11: Blähton

Ein Holzfeuer produziert pro kg verbranntes Holz ca. 10 m^3 Abgas. Ein Kg. Holz entspricht knapp 4 kWh Energie. Für Feuerungen mit 20 – 70 kW Leistung muss daher mit Abgasvolumina von ca. 50 – 175 m^3/h gerechnet werden.

4.2.2 Definition Filterquerschnittsfläche für Druckverlustmessungen

Die durchströmte Fläche des Filters ist entscheidend für die Strömungsgeschwindigkeit und entsprechend auch für den Druckverlust. Grundsätzlich ist eine Anordnung des Filtermaterials wie in denkbar. Die angedachte Filteranlage sieht dabei eine kontinuierliche Nachführung von Filtermaterial vor. Geht man von einer solchen Bauweise aus, wäre die aktive Filterfläche gleich dem Querschnitt des Kamines. Vom Bauvolumen einer solchen Lösungen wäre dies diejenige welche einem elektrostatischen Filter am nächsten käme. Bei einem mittleren Kamindurchmesser von ca. 150mm ergibt sich damit eine Strömungsgeschwindigkeit von 0.8-2.8 m/s (48-168 m/min).

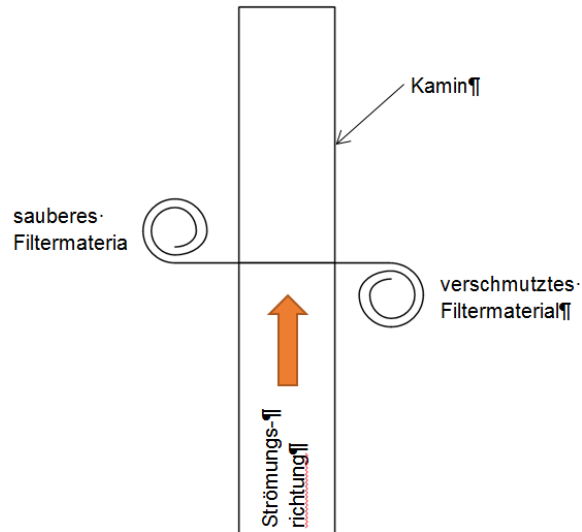


Abbildung 12: Konzeptidee Filteranlage

Diese Geschwindigkeiten wurden für einen ersten Versuch auf dem Prüfstand abgebildet. Die Filter wurden auf ihren Druckverlust im unbeladenem Zustand und bei kleinstmöglicher Strömungsgeschwindigkeit untersucht.

Die Zwischenergebnisse dieser Versuche führten zu einer Neudefinition der Anströmgeschwindigkeit aufgrund der typischen Filterflächenbelastungen für Oberflächenfilter gemäss VDI 3677 Blatt 1 und den Angaben aus der Norm UNI 11304-1:2008. Die Anströmgeschwindigkeiten wurden auf 1.2 m/min (0.02 m/s) und 6 m/min (0.1 m/s) festgelegt. Dabei entspricht 1.2 m/min einem empfohlenen Wert und 6 m/min entspricht gemäss VDI 3677 Blatt 2 der Grenze bei welcher sich kleine Partikel noch durch Diffusion zur Faser transportiert werden.

4.2.3 Definition zulässiger Druckverlust

Durch den Einbau eines Filtermediums in eine Abgasstrecke muss der entstehende Druckverlust mit einem Ventilator überwunden werden. Mit dem Anspruch, energetisch nicht mehr als ca. die doppelte elektrische Energie eines elektrostatischen Abscheiders zu benötigen, erhält man ein Leistungsbudget von rund 30-80 W für die Leistungsaufnahme des Abgasventilators. Damit kann bei den genannten Abgasvolumina und je nach Ventilatorart und Hersteller ein Druckverlust von ca. 300-400 Pa überwunden werden.

4.3 Kriterienkatalog

4.3.1 Temperaturstabilität

Zunächst wurde davon ausgegangen, dass die Temperaturstabilität der möglichen Filtermaterialien entsprechend der Rauchgastemperatur im Bereich von 80-200° C gewählt werden könne. Aus Produzentensicht ist dieses Temperaturspektrum jedoch viel zu niedrig gegriffen. Aufgrund der aktuellen Vorschriften ist eine im Kamin platziertes Filteranlage Teil des Kamines und unterliegt damit den gleichen technischen Regeln und Vorschriften wie das Kaminsystem selbst. Insbesondere gilt die Temperaturklasse T400, nach der das gesamte System für eine Dauer von 6 Stunden einer Rauchgastemperatur von 500° C ausgesetzt werden muss. Das System muss danach noch voll funktionsfähig sein.

Ist die Filteranlage jedoch, unabhängig vom Kaminsystem, im Bereich eines Zentralheizungskessels



untergebracht, gilt die Temperaturklasse T200 respektive T250. Ist die Filteranlage Bestandteil eines voll geregelten Heizkessels könnte über eine geeignete Kühlung oder ähnliches die Temperaturanforderung noch weiter abgesenkt werden.

Grundsätzlich stellt sich die Problematik, dass die heutigen Normen verlangen, dass ein Filter auch nach einer Temperaturprüfung noch voll funktionsfähig sein muss. Hier werden aus Sicht der Autoren sicherheitstechnische Anforderungen mit solchen zur Funktion des Filters vermischt. Dass sie sicherheitstechnischen Aspekte nicht vernachlässigt werden könne, steht ausser Frage. Weshalb nach einem nicht regulären Ereignis (z.B. Kaminbrand) ein Filter weiter die volle Abscheidewirkung aufweisen muss, ist für die Autoren nicht nachvollziehbar. Die Autoren gehen davon aus, dass die aktuellen Normen für den Fall, dass sinnvolle Technologien für die Feinstaubreduktion vorhanden sind, langfristig angepasst werden können.

Wie man Abbildung 3 entnehmen kann ist die Feuchte ein Einflussfaktor auf die Filterwirkung. Sollte es zu Kondensation am Filter kommen, kann sich dies auch negativ auf die Regeneration des Filtermaterials auswirken. Deswegen sollte ein unterschreiten der Kondensationstemperatur vermieden werden. Daher sollte die Temperaturbeständigkeit zumindest höher als die Kondensationstemperatur sein.

- Ausscheidekriterium für die Temperaturstabilität: 100°C

4.3.2 Filterwirkung

Die Filterwirkung ist das entscheidende Kriterium für die Einsetzbarkeit des Materials als Filter. Das Material muss in der Lage sein, einen wesentlichen Bestandteil der Feinstaubfracht aus dem Rauchgas zurückzuhalten. Je nach Einsatzgebiet muss der Filter unterschiedliche Abscheidewirkungen aufweisen. So sind für Feuerungsanlagen, die einen Grenzwert für Feinstaubemissionen knapp nicht einhalten, Abscheidegrade von 50% ausreichend um einen legalen Betrieb zu ermöglichen. Von sensibilisierten Kunden werden oft Abscheidegrade von deutlich über 90 % erwartet.

- Ausscheidekriterium für die Filterwirkung: min. 50% Abscheidegrad

4.3.3 Brennbarkeit

Die Filter sollten möglichst nicht brennbar sein. Wenn allerdings mit einer Entzündung innerhalb der Betriebstemperatur nicht zu rechnen ist, kann das Material durchaus anwendungstauglich sein. Denkbar ist gerade bei flächigen, fließartigen Filtermaterialien eine geeignete Eingrenzung des Filterbrandes auf die aktive Filterfläche und ein Mechanismus zur Nachführung frischen Filtermaterials.

- Ausscheidekriterium für die Brennbarkeit: Zeit bis zur vollständigen Verbrennung des Materials <1 min

4.3.4 Anfänglicher Druckverlust

Die Filter stellen dem Abgas einen Strömungswiderstand entgegen, der sich als Druckverlust bemerkbar macht. Dieser Druckverlust wirkt begrenzend auf die Einsatztauglichkeit des Filters. Ein anfänglich zu hoher Druckverlust bedeutet eine zu geringe Gasdurchlässigkeit des Filters, die mit entsprechenden Massnahmen (Ventilatoren) kompensiert werden müssen. Aufgrund der Abschätzungen zum Druckverlustbudget im Vergleich zum Elektrostatischen Filter wurde der Anfangsdruckverlust relativ niedrig angesetzt.

- Ausscheidekriterium für den Anfangsdruckverlust: max. 100 Pa



4.3.5 Packungsdichte

Der Filter muss aus einem Material bestehen, bei welchem die einzelnen Fasern, Fäden oder Kugeln zu einem Ausreichend dicht gepacktem Material geformt sind oder geformt werden können.

- Ausschusskriterium war hierbei eine von Auge sichtbare Lücke im Material wenn das Material durchleuchtet wurde.

4.3.6 Mechanische Stabilität

Der Filter muss ausreichende mechanische Stabilität gegen die Abgasdruckbeaufschlagung im Betrieb aufweisen. Weiterhin sind gewisse mechanische Einwirkungen im Zusammenhang mit der Wartung bzw. dem Filtertausch oder gegebenenfalls der Regeneration zu erwarten, denen der Filter widerstehen muss.

- Materialien welche eine zu geringe Webdichte oder Stabilität hatten wurden aussortiert. Materialien welche eine geringe Stabilität haben, jedoch eine stabilere Variante bekannt ist (welche aber für Versuchszwecke nicht erhältlich waren) wurden dennoch getestet.

4.3.7 Einbaugrösse

Die Einbaugrösse ist ein entscheidender Parameter in späteren Anwendungsfällen da oft, insbesondere auch bei Nachrüstungen bestehender Heizanlagen, der Platz am Einbauort beschränkt ist.

4.3.8 Filterstandzeit

Die Filterstandzeit ist eine Kombination aus der Degradation, der mechanischen Stabilität und der Änderung des Druckverlustes mit zunehmender Beladung und bestimmt über die Wartungsintervalle wesentlich die Wirtschaftlichkeit des Systems. Es wird davon ausgegangen, dass die Beladung und der damit einhergehend steigende Druckverlust der bestimmende Faktor für die Filterstandzeit ist.

4.3.9 Regenerierbarkeit

Sind die Filter regenerierbar, kann die Beschaffung neuer Filter in grösseren Intervallen erfolgen. Allerdings ist dies im Zusammenhang mit dem Aufwand für die Regenerierung der Filter zu betrachten.

4.3.10 Entsorgung

Idealerweise sind die Filter im Holzbrenner veraschbar. Ansonsten wird hier die Entsorgung und der damit evtl.im Zusammenhang stehende Aufwand untersucht.

4.3.11 Kosten / Wirtschaftlichkeit

Die Gesamtkosten werden anhand der vorliegenden Informationen abgeschätzt. Dabei kommt ein „total cost of ownership“-Ansatz zur Anwendung.



4.4 Voruntersuchung der Materialien

Alle Materialien wurden vor Beginn der Versuche optisch geprüft. Ziel war es, die Materialien auszusortieren, welche erkennbare Mängel aufwiesen. Die Materialien wurden auf mögliche Lecks und ihre Formstabilität untersucht.

Da sich die Materialien wie auch die gefundenen Mängel oft sehr ähnlich sind wird hier nicht auf jedes einzelne Material eingegangen. Zwei Beispiele für gefundenen Mängel sind im Folgenden mit einem Foto dargestellt.

- nicht ausreichend dicht gewoben

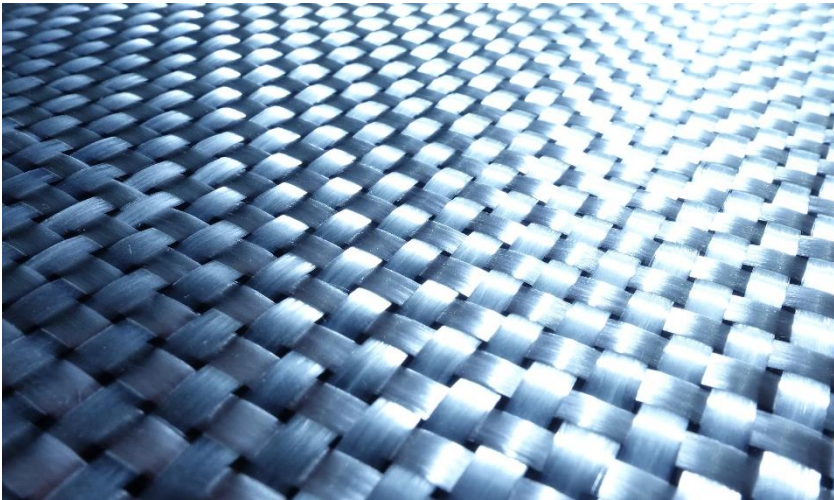


Abbildung 13: Webdichte zu gering

- Beschädigung des Materials durch minimale Reibung verursacht durch normales Handling (Anheben, Transport etc.)

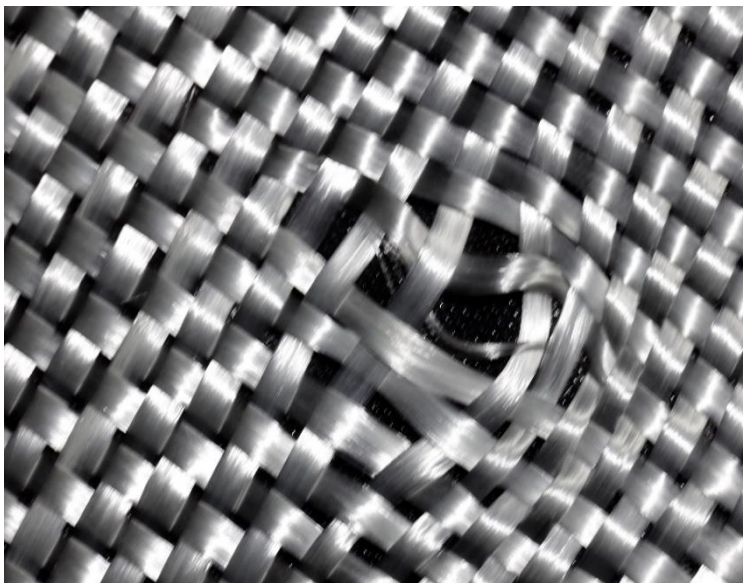


Abbildung 14: Formstabilität zu gering



4.5 Druckverlustmessungen

Die Druckverlustmessungen wurden in zwei Etappen durchgeführt. Zuerst wurde der Druckverlust bei hohen Anströmgeschwindigkeiten untersucht. Die Resultate dieser Untersuchungen führten zum Umbau der Versuchsanlage.

Die in Tabelle 2: Auflistung der untersuchten Materialien inkl. deren Druckverluste sowie die Druckdifferenz zu einem Niveau von 300 Pa abgebildeten Resultate zeigen den Druckverlust unterschiedlicher Filtermaterialien bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0.8 m/s. Der Druckverlust wurde mit reiner Luft ermittelt. Zusätzlich ist die Druckdifferenz zum Niveau 300 Pa ausgewiesen. Dabei ist ersichtlich, dass bei einem Grossteil der Materialien bereits bei nicht beladenem Filter kein weiterer Druckverlust durch eine Beladung des Filters mit Feinstaub akzeptabel ist.

Produktbezeichnung und Beschreibung	Druckverlust [Pa] @ 0.8 m/s	Verfügbares $\Delta P =$ 300Pa-Druckverlust
Blähton, Filterdicke 115mm	270	30
SiLibeads ZS 1.0-1.2mm, Filterdicke 20mm	209	91
SiLibeads ZS 1.0-1.2mm Filterdicke 40mm	773	-473
SiLibeads ZS 2.0-2.2mm, Filterdicke 30mm	285	15
Glasfilament Silane Leinwand 48g/m ² 2-lagig	300	0
Glasfilament Silane 80gr/m ² Körper	217	83
Glasfilament Silane 110gr/m ² Leinwand	348	-48
Glasfilament Silane 160gr/m ² Leinwand	418	-118
Glasfilament Silane 160gr/m ² Körper	146	154
Glasfilament Silane 163gr/m ² Leinwand	806	-506
Glasfilament Silane 390gr/m ² Leinwand	686	-386
Carbonfasergewebe SPC8506	209	91
Carbonfaserfilz Sigracell KFD 2.5 EA	300	0
Flumroc Brandschutzplatte FPI700 10mm	630	-330
Flumroc Brandschutzplatte FPI700 6mm	600	-300
Stoff gelb	530	-230
Biobaumwolle	920	-620
Stoff grau	930	-630
Bauwolle roh	770	-470
Stoff blau (Filz)	1350	-1050
Stoff blau schwarz	1090	-790
Luftfiltervlies 2221	1513	-1213
Luftfiltervlies 4453	3317	-3017
Luftfiltervlies 1720 HD	740	-440
Luftfiltervlies 1944	315	-15

Tabelle 2: Auflistung der untersuchten Materialien inkl. deren Druckverluste sowie die Druckdifferenz zu einem Niveau von 300 Pa

Aufgrund dieser Ergebnisse mussten die ursprünglich gewählten Rahmenbedingungen überdacht werden. Wie in Kapitel 4.2.2 bereits beschrieben sind die Geschwindigkeiten welche sich durch den Anspruch – kein Querschnittvergrößerung – ergeben enorm hoch im Vergleich zu den in der Literatur empfohlenen. Aus diesem Grund wurde dieser Anspruch gelockert. Dies bringt den Vorteil, dass die Filter potenziell eine bessere Abscheiderate erreichen und der Druckverlust enorm gesenkt werden kann. Der Versuchsstand wurde von Rohrdurchmesser 80mm auf 230mm vergrössert. Der grössere Durchmesser hat jedoch den Nachteil, dass diverse Mustermaterialien gar nicht in dieser Grösse oder



nur zu sehr hohen Preisen beschafft werden können. Die verbleibenden Materialien sind hauptsächlich der Filterart Gewebefilter zuzuordnen, welche gemäss Literatur von den Vliesmaterialien Grossteiles verdrängt wurden. Deswegen wurden die ausgeschiedenen Materialien mit Vliesmaterialien ersetzt. Dabei hat man sich hauptsächlich an Empfehlungen von Filterherstellern orientiert.

Produktbezeichnung und Beschreibung	Strömungs- geschwindigkeit	Druckverlust
	[m/min]	[Pa]
Flumroc Brandschutzplatte FPI700	1.2	17
	6.0	65
Blähton	1.2	2
	6.0	3
SiLibeads ZS 1.0-1.2mm Filterdicke	1.2	6
	6.0	17
SiLibeads ZS 2.0-2.2mm Filterdicke	1.2	2
	6.0	6
Carbonfaserfilz Sigracell KFD 2.5 EA	1.2	10
	6.0	34
Glasfilament Silane 390gr/m2 Leinwand	1.2	0
	6.0	8
Glasfilament Silane 80gr/m2 Körper	1.2	25
	6.0	173
Glasfilament Silane 110gr/m2 Leinwand	1.2	2
	6.0	1
Glasfilament Silane 160gr/m2 Körper	1.2	4
	6.0	6
Glasfilament Silane 200gr/m2 Leinwand	1.2	-1
	6.0	-1
Unifrax: Insulfrax LTX 25mm Dicke	1.2	44
	6.0	162
Baumwollstoff	1.2	4
	6.0	33
Stoff blau (Filz)	1.2	28
	6.0	143
isoGLAS®-Gewebe	1.2	31
	6.0	184
Herding Glasfasermatte	1.2	16
	6.0	98
needlona®	1.2	22
	6.0	103
microvel® TF	1.2	34
	6.0	138
microvel® PL	1.2	22
	6.0	93
isoGLAS® Nadelvlies 500g/m²	1.2	6
	6.0	24
isoGLAS® Nadelvlies 1000g/m²	1.2	28
	6.0	116

Tabelle 3: Ergebnisse der Druckverlustmessungen bei angepassten Geschwindigkeiten



Die Druckverluste sanken durch die Reduzierung der Anströmgeschwindigkeit massiv. Ein Überschreiten des Grenzwertes von 100 Pa kann nur im Zusammenhang mit einer Geschwindigkeit von 6 m/min beobachtet werden. Mit diesen Ergebnissen und den gefundenen Schwachstellen konnte die folgende Auswahl an Materialien getroffen werden für die weiteren Versuche Temperaturbeständigkeit, Brennbarkeit und Staubabscheidung.

Produktbezeichnung und Beschreibung	Kommentar
Flumroc Brandschutzplatte FPI700	Einziges Produkt aus Steinwolle. Festigkeit Mangelhaft
Blähton	Druckverlust und Festigkeit i.O.
SiLibeads ZS 2.0-2.2mm	Einfacher in der Handhabung als 1-1.2 mm Alternative
Carbonfaserfilz Sigracell KFD 2.5 EA	Einziges Produkt aus Carbonfasern. Festigkeit Mangelhaft aber Verbesserungspotenzial vorhanden
Glasfilament Silane 390gr/m² Leinwand	Grösstes Flächengewicht bei kleinem Druckverlust aller Glasfilamente. Damit höchste Wahrscheinlichkeit auf einen ausreichenden Abscheidegrad.
Baumwollstoff	Druckverlust vs. Webdichte am besten
isoGLAS®-Gewebe	Andere Glasfaser und stabilere Webung als Glasfilament
Herding Glasfasermatte	Empfehlung vom Hersteller
needlona®	Empfehlung vom Hersteller
microvel® TF	Empfehlung vom Hersteller
microvel® PL	Empfehlung vom Hersteller
isoGLAS® Nadelvlies 500g/m²	Empfehlung vom Hersteller
isoGLAS® Nadelvlies 1000g/m²	Empfehlung vom Hersteller

Tabelle 4: Auswahl für die weiterführenden Versuche Temperaturbeständigkeit, Brennbarkeit und Staubabscheidung.

4.6 Temperaturbeständigkeit

Die Tests auf die Temperaturbeständigkeit hatten den Hauptzweck nachzuweisen, dass die untersuchten Materialien bis mindestens 100°C einsetzbar sind. Bei den Materialien welche einen T400 Test (6h bei 500°C im Ofen) bestehen sollten wurde zusätzlich noch untersucht welche Veränderungen bei Belastungen gemäss einen T400 Test entstehen. Materialien die einen T400 Test sicher nicht bestehen, wurden nur bis 100 °C getestet. Die Ergebnisse der Versuche sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.



Produktbezeichnung und Beschreibung	Max. T [°C] Nach Datenblatt	Ofen Temperatur	Akzeptable Festigkeits- Änderungen?
Flumroc Brandschutzplatte FPI700	650	(-)	Auf Grund der Materialdicke konnte die Festigkeitsänderung nicht beurteilt werden.
Blähton	Nicht bekannt	(-)	Aufgrund der Ergebnisse der Staubabscheideversuche nicht getestet
SiLibeads ZS 2.0- 2.2mm Filterdicke	Nicht bekannt	(-)	Aufgrund der Ergebnisse der Staubabscheideversuche nicht getestet
Carbonfaserfilz Sigracell KFD 2.5 EA	Nicht bekannt	200	keine Veränderung
		500	Material viel weicher, filzartiger und halb so schwer. Mechanische Stabilität ist dadurch nicht messbar beeinträchtigt.
Glasfilament Silane 390gr/m2 Leinwand	280	500	Material wird spröder und ist bei Faltversuch gebrochen
Biobaumwolle	Nicht bekannt	100	keine Veränderungen
isoGLAS®-Gewebe	1100	500	Faserverbund leicht erhöht, allerdings spröder
Herding Glasfasermatte	500	500	Material wirkt spröder, verlor bei Tests filzartige Fasern
needlona®	250	100	keine Veränderungen
		250	keine Veränderungen
microvel® TF	260	500	Material ist komplett verbrannt
		250	keine Veränderungen
microvel® PL	260	500	Material ist komplett verbrannt
		250	Keine Veränderungen
isoGLAS® Nadelvlies 500g/m2	550	500	Material oberflächlich leicht spröder
isoGLAS® Nadelvlies 1000g/m2	550	500	Material oberflächlich leicht spröder

Tabelle 5: Ergebnisse der Versuche auf Temperaturbeständigkeit

Es konnten mehrere Materialien gefunden werden, welche einen T400 Test bestehen. Diese sind aber mit einer Ausnahme alle aus Glasfaser. Die einzige Überraschung ist hier das Carbonfaser Material der Firma SLG Carbon. Dieses hatte zwar diverse Mängel nach dem Test, die könnten jedoch durch Produktkombinationen verschiedener SLG Carbon Produkte weitgehend beseitigt werden. Gemäss Herstellerfirma sind solche Produktkombinationen bereits bekannt. Leider konnten diese noch nicht eingehender getestet werden.



4.7 Brennbarkeit

Diese Versuche wurden anstelle von Funkenflugversuchen durchgeführt. Ziel war es, aufzeigen zu können welches Brandrisiko bei Entzündung (z.B. durch Funken) besteht.

Beschreibung	Resultat
Flumroc Brandschutzplatte FPI700	Einzelne Glasfasern zogen sich zusammen und sind geschmolzen
Blähton	nicht getestet
SiLibeads ZS 2.0-2.2mm Filterdicke	Keramik Kugel brennen nicht
Carbonfaserfilz Sigracell KFD 2.5 EA	Keine äusserlichen Veränderungen, Fasern in Flambereich ein bisschen spröder
Glasfilament Silane 390gr/m2 Leinwand	Einzelne Glasfasern zogen sich zusammen und sind geschmolzen
Biobaumwolle	Komplett abgebrannt
isoGLAS®-Gewebe	Einzelne Fasern haben sich zusammengezogen und sind geschmolzen
Herding Glasfasermatte	Einzelne Fasern haben sich zusammengezogen und sind geschmolzen
needlona®	Verbrennung des Stoffes lokal bei Flamme, keine Entzündung
microvel® TF	Verbrennung des Stoffes lokal bei Flamme, keine Entzündung
microvel® PL	Verbrennung des Stoffes lokal bei Flamme, keine Entzündung
isoGLAS® Nadelvlies 500g/m2	Einzelne Fasern haben sich zusammengezogen und sind geschmolzen
isoGLAS® Nadelvlies 1000g/m2	Einzelne Fasern haben sich zusammengezogen und sind geschmolzen

Tabelle 6: Ergebnisse der Versuche auf Brennbarkeit



Bis auf eine Ausnahme lassen sich die getesteten Materialien nicht entzünden. Gewisse verschmoren an der Zündstelle sobald jedoch die Zündquelle entfernt wird stoppt auch die Degradation des Materials. Einzig der Baumwollstoff verbrannte komplett.



Abbildung 15: Ergebnisse der Versuche auf Brennbarkeit der Materialien microvel® PL, Herding Glasfasermatte, isoGLAS® Nadelvlies 500g/m² und needlona® (von links)

Damit kann das Brandrisiko der Materialien als sehr gering eingestuft werden. Die grösste Gefahr bei Funkenflug ist eine mögliche Beschädigung welche eine Leckage verursachen könnte. Dies ist aber auch nur bei den Kunststofffaser-Materialien eine Gefahr.

4.8 Staubabscheidung

Die Fähigkeit Staub abzuscheiden ist die Kernaufgabe eines Filters. Dementsprechend hoch war der Aufwand für die Versuche im Verhältnis zu den restlichen Versuchen des Projekts.

4.8.1 Staubabscheidung bei einer Anströmgeschwindigkeit von 1.2 m/min

Die Messungen wurden mit einem online-Messgerät der Firma Test (T380) durchgeführt. Vor Beginn der Versuche wurde eine Baseline aufgenommen werden. Dazu wurden die Emissionen bei identischen Einstellungen wie bei den anschliessenden Versuchen gemessen. Für die Untersuchungen bei einer Anströmgeschwindigkeit der Filtermaterialien von 1.2 m/min liegen dadurch die Mittelwerte für CO-Konzentration und Feinstaubkonzentration als «Baseline» vor:

- CO-Konzentration: 275 ppm @ 13% O₂
- Feinstaubkonzentration: 41 mg/m³ @ 13% O₂

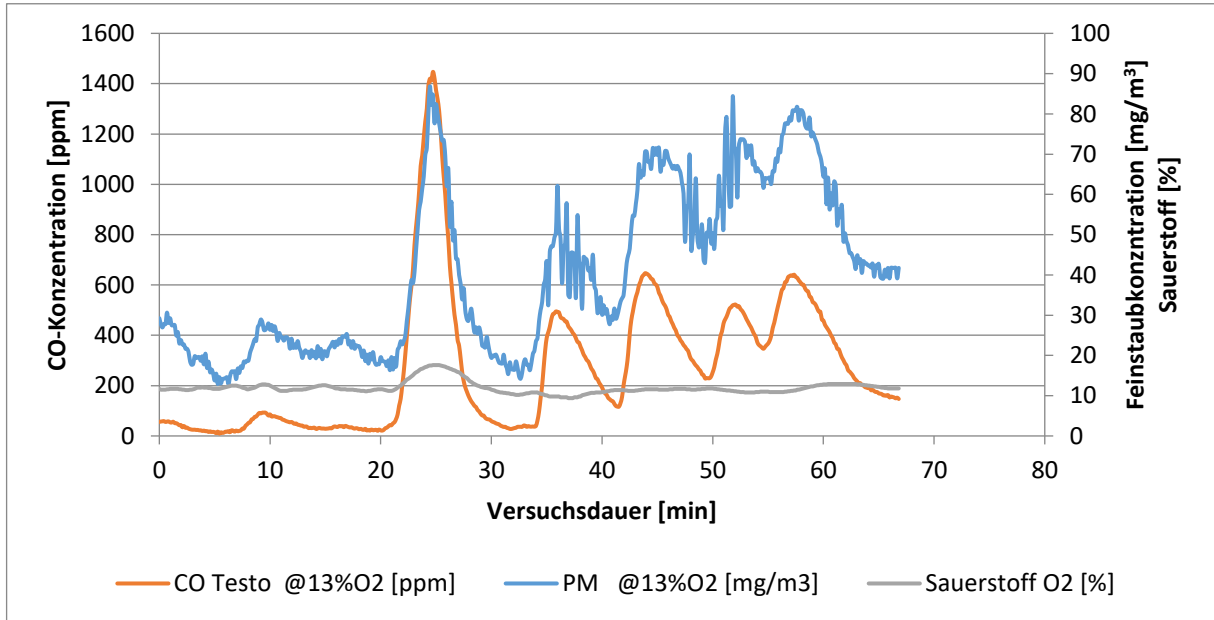


Abbildung 16: Baseline-Messung bei 1.2 m/min

Für diese Feuerung kann die Aussage gemacht werden, dass bei einem Anstieg der CO-Konzentration auch mit einem Anstieg der Feinstaubkonzentration gerechnet werden muss. Es ist aber nicht so, dass eine Verdopplung der CO-Konzentration auch einer Verdopplung der Feinstaubkonzentration gleichkommt. Da die CO- und Feinstaubwerte aber gekoppelt sind wurden für die Auswertung die Feinstaubwerte in Abhängigkeit der CO-Werte verglichen. Als Ausscheidkriterium wurde eine Abscheiderate von min. 50% festgelegt. Dies entspricht bei 1.2m/min einem Wert von 0.165 mg/m³ pro ppm CO.



Für alle Materialien wurde eine mittlere Partikelmassekonzentration pro CO-Konzentration für den Bereich 0-200Pa ermittelt.

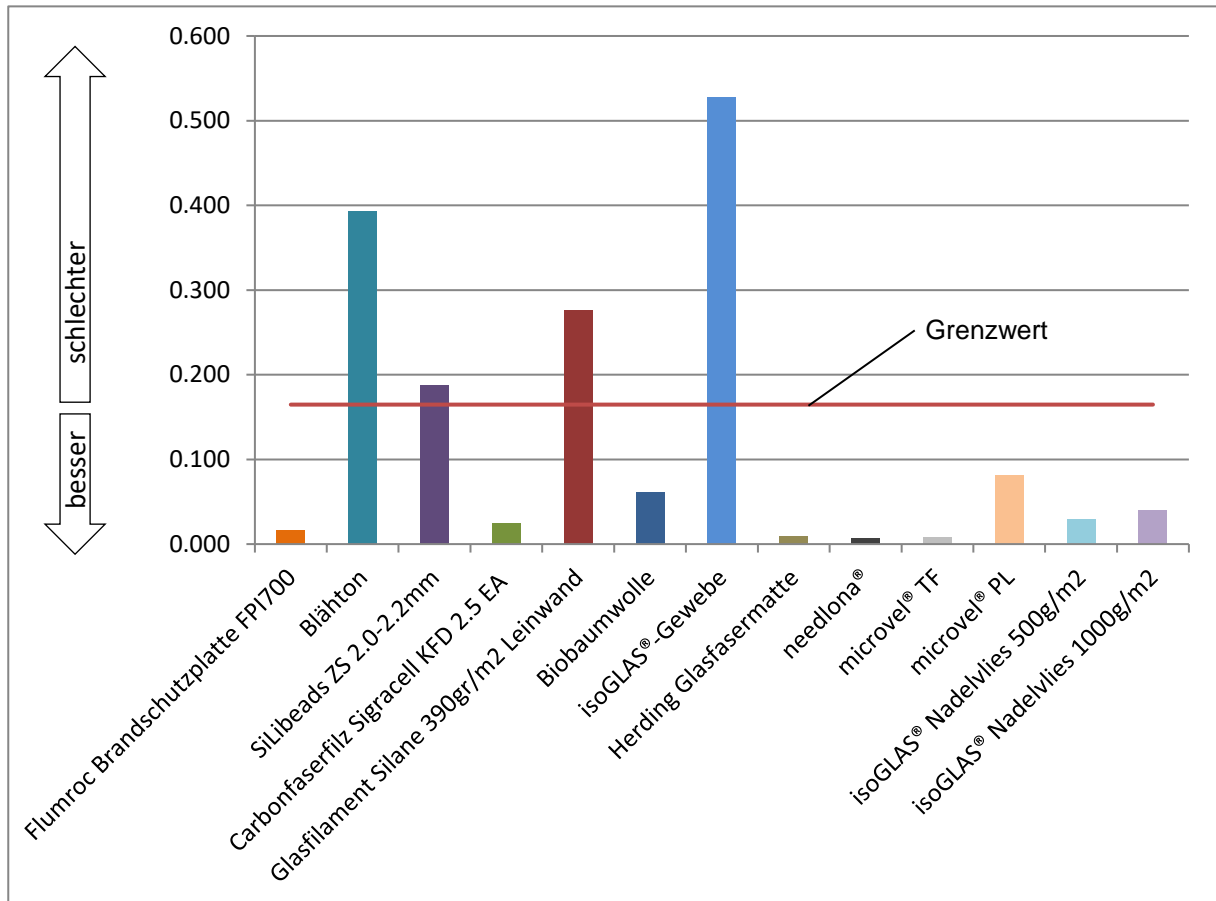


Abbildung 17: Abscheidewerte bei 1.2 m/min als Partikelmassekonzentration pro CO-Konzentration

Materialien aus der Kategorie Nadelfilze und Vliese haben allesamt ohne Probleme die gewünschte Abscheiderate erreicht. Die Schüttgutfilter haben alle nicht bestanden und bei den Gewebefiltern ist es sehr unterschiedlich. Diese Werte sind allerdings mit Vorsicht zu genießen. Filtermedien welche durch Oberflächenfiltration abscheiden haben in der Regel von Beginn weg gute Abscheideraten. Tiefenfilter hingegen benötigen eine gewisse Zeit bis sie sich stabilisiert haben. Werden nur die Daten bis 200Pa ausgewertet kann damit nicht generell gesagt werden, ob ein Material abscheidet oder nicht. Es kann lediglich festgestellt werden, dass es in diesem Bereich einen entsprechenden Abscheidegrad hat. In der Abbildung 3 sind die Abhängigkeiten auf das Verhalten eines Oberflächenfilters zusammengestellt. Daraus ist ersichtlich, dass auch von Seiten des Filtermediums der Abscheidegrad beeinflusst werden kann. Dass dies ein signifikanten Einfluss haben kann ist gut ersichtlich am Produktportfolio der Firma Lydall Gutsche.

So beinhaltet beispielsweise das Produktsortiment die Firma Lydall Gutsche diverse Behandlungen des Filtermaterials welche die Regeneration, die Bildung des Filterkuchens und diverse weitere Dinge verbessern. Deswegen und da der Ofen unseres Prüfstandes nicht immer identisches Verhalten aufweist müssen die Resultate detaillierter betrachtet werden. Im Folgenden sind für alle untersuchten Materialien detaillierte Darstellungen der gemessenen Parameter über den Verlauf des Versuchs dargestellt und kommentiert sowie fotografisch im Endzustand dokumentiert.



Flumroc Brandschutzplatte FPI 700:

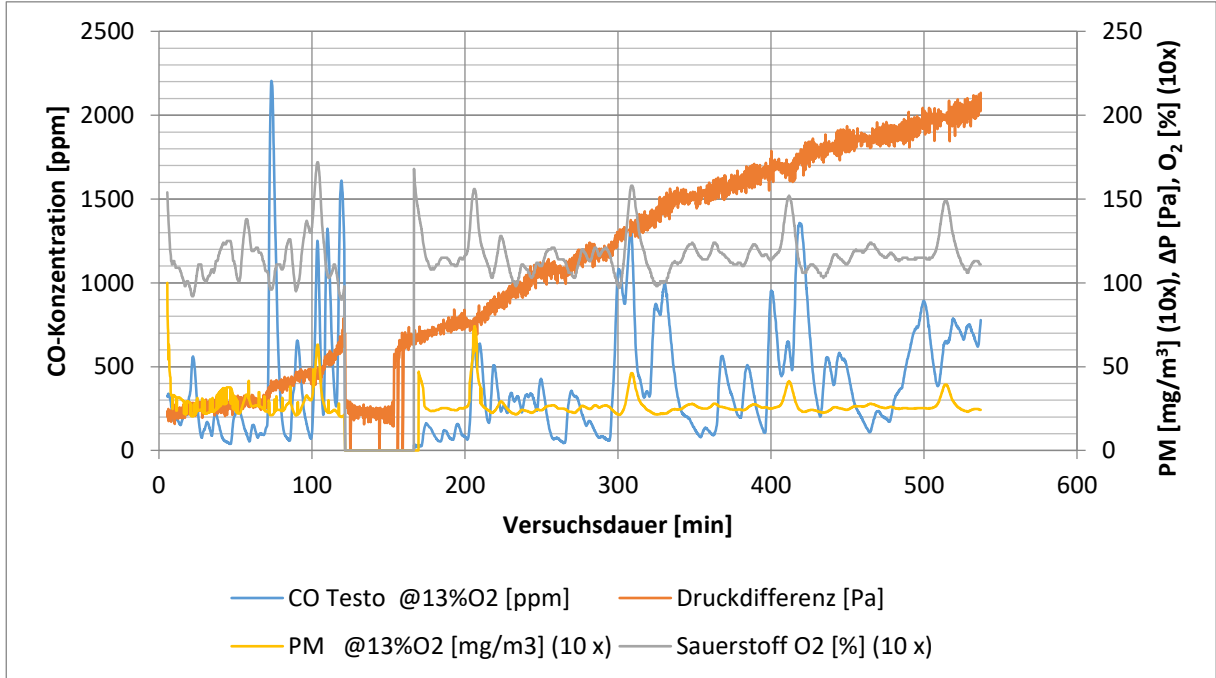


Abbildung 18: Messdaten der Flumroc Brandschutzplatte FPI 700 bei 1.2 m/min

Der Verlauf der Feinstaubkonzentration lässt darauf schliessen, dass die Abscheidung dieses Material auf Oberflächenfiltration beruht. Diese haben im Gegensatz zu Tiefenfilter keine Stabilisierungsphase am Anfang ihres Einsatzes. Eine Analyse des Querschnittes zeigte, dass der abgeschiedene Feinstaub nur in die oberen Lagen des Materials eingedrungen ist und sich ein Staubkuchen bildet. Die aufgezeichneten CO-Werte wie auch ein Vergleich der mittleren CO-Werte mit denen der Baseline zeigen, dass beim Versuch ein gleich grosses, wenn nicht grösseres Feinstaubvorkommen im Rohgas vorhanden war als bei der Baseline. Folglich ist der Abscheidegrad dieses Materials definitiv höher als 50%.



Abbildung 19: Querschnitt durch die Flumroc Brandschutzplatte

Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration Flumroc	CO-Konzentration Flumroc
41 mg/m ³ @ 13% O ₂	275 ppm @ 13% O ₂	2.9 mg/m ³ @ 13% O ₂	399 ppm @ 13% O ₂



Blähton

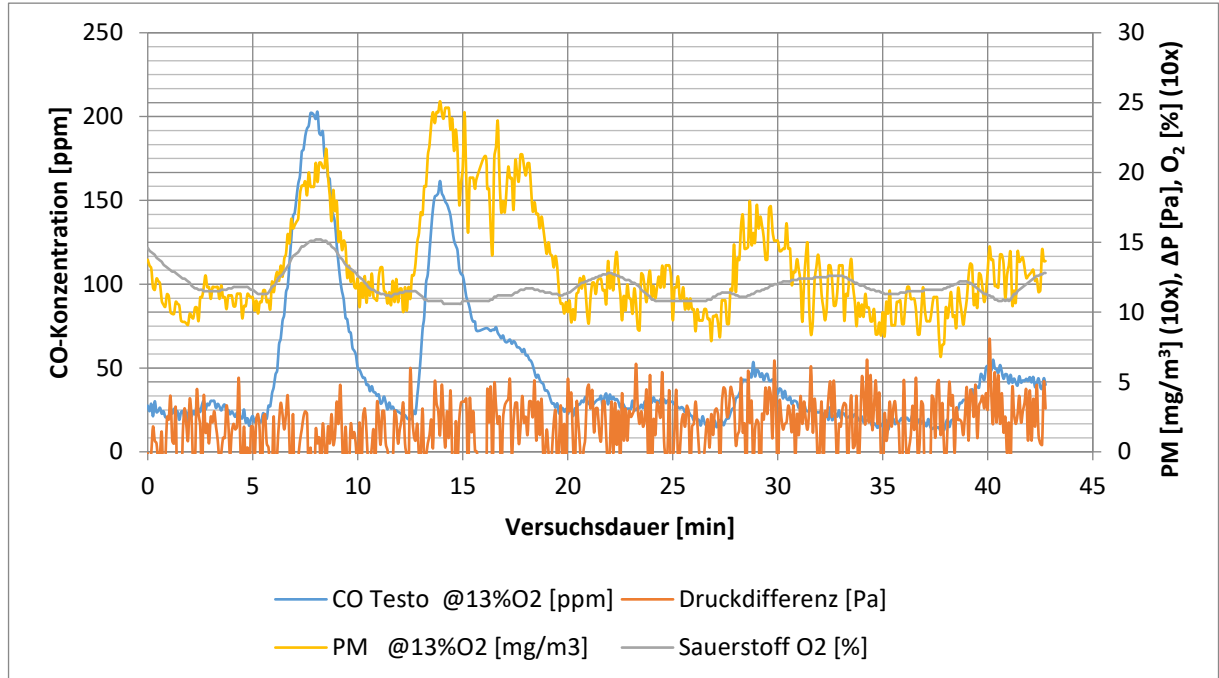


Abbildung 20: Messdaten der Blähton Kugeln bei 1.2 m/min

Die Mittelwerte der CO-Konzentration lassen auf eine deutlich kleinere Feinstaubkonzentration schliessen als bei der Baseline. Dies macht die Beurteilung aufgrund der Feinstaubwerte schwierig. Da der Druckverlust aber während 40 min nicht stieg und sämtliche CO-Anstiege auch einen deutlichen Anstieg der Feinstaubwerte zur Folge hatte, kann der Abscheidegrad dieses Material als kleiner 50% eingestuft werden.

Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration Blähton	CO-Konzentration Blähton
41 mg/m ³ @ 13% O ₂	275 ppm @ 13% O ₂	13.2 mg/m ³ @ 13% O ₂	45 ppm @ 13% O ₂



SiLibeads 2-2.2mm

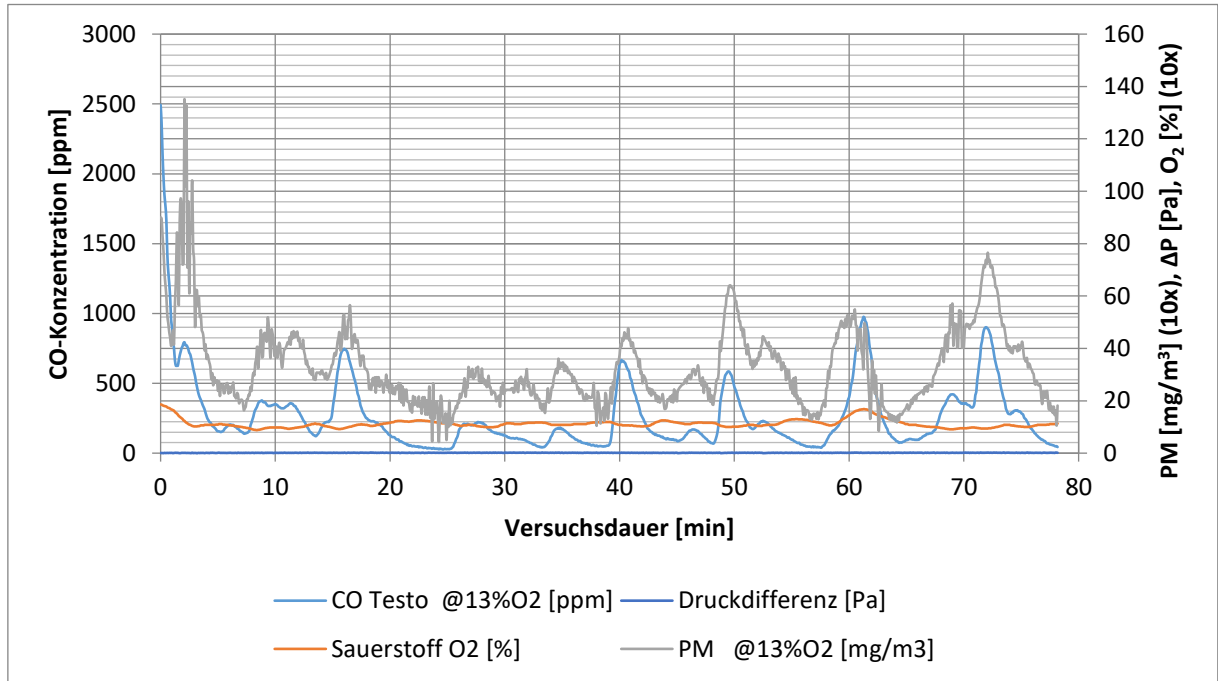


Abbildung 21: Messdaten der SiLibeads Kugeln bei 1.2 m/min

Hier zeigt sich ein sehr ähnliches Bild wie bereits bei dem Blähton Filter mit dem Unterschied, dass sich die CO-Werte nicht markant von denen der Baseline unterscheiden. Auch hier kann davon ausgegangen werden, dass dieses Material nicht für die Feinstaubabscheidung eignet.

Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration SiLibeads	CO-Konzentration SiLibeads
41 mg/m ³ @ 13% O ₂	275 ppm @ 13% O ₂	32.9 mg/m ³ @ 13% O ₂	266 ppm @ 13% O ₂



Carbonfaserfilz Sigracell KFD 2.5 EA

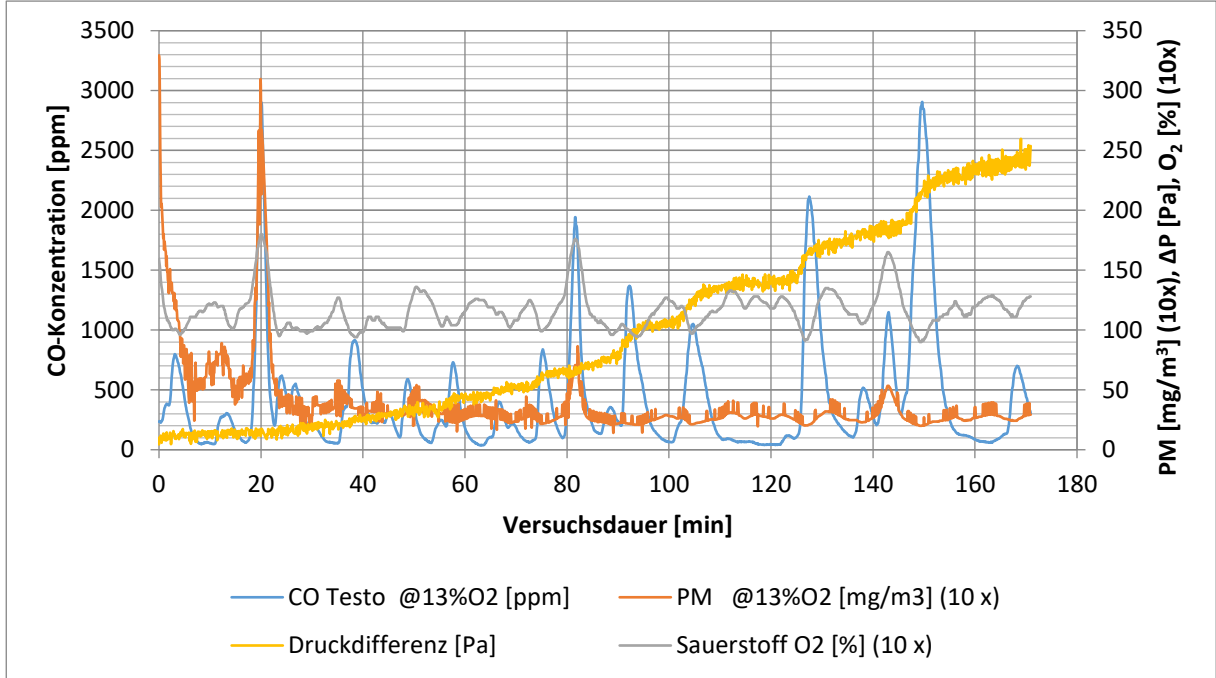
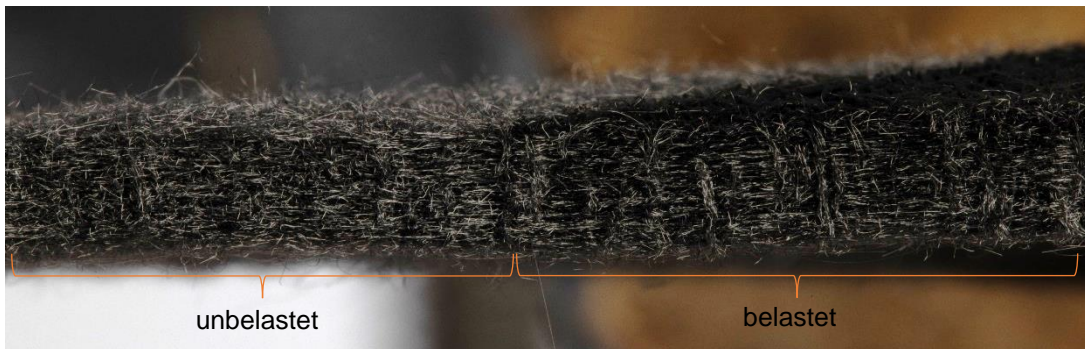


Abbildung 22: Messdaten des Carbonfaserfilzes Sigracell KFD 2.5 EA bei 1.2 m/min

Bei diesem Material ist schwierig zu sagen, ob die Abscheidung mehrheitlich durch Oberflächenfiltration oder Tiefenfiltration zustande kommt. Der Verlauf zu Beginn, Anstieg des Druckverlustes bei sinkenden Staubkonzentrationswerten, deutet auf Tiefenfiltration hin. Da die CO-Werte allerdings auf sehr hohe Staubkonzentrationswerte hindeuten kann davon ausgegangen werden, dass die Abscheiderate bereits von Beginn weg relativ hoch ist. Dies wiederum würde auf eine Oberflächenfiltration hindeuten. Auch durch die Analyse des Querschnittes kann diese Frage nicht abschliessend geklärt werden, da nicht zwischen Filtermaterial und Feinstaub unterschieden werden kann.



Die Mittelwerte wie auch die im Diagramm dargestellten Werte zeigen ein Verhalten welches auf einen Abscheidegrad grösser 50% schliessen lässt.

Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration Carbonfaserfilz	CO-Konzentration Carbonfaserfilz
41 mg/m ³ @ 13% O ₂	275 ppm @ 13% O ₂	4.0 mg/m ³ @ 13% O ₂	381 ppm @ 13% O ₂



Glasfilament Silane 390gr/m² Leinwand

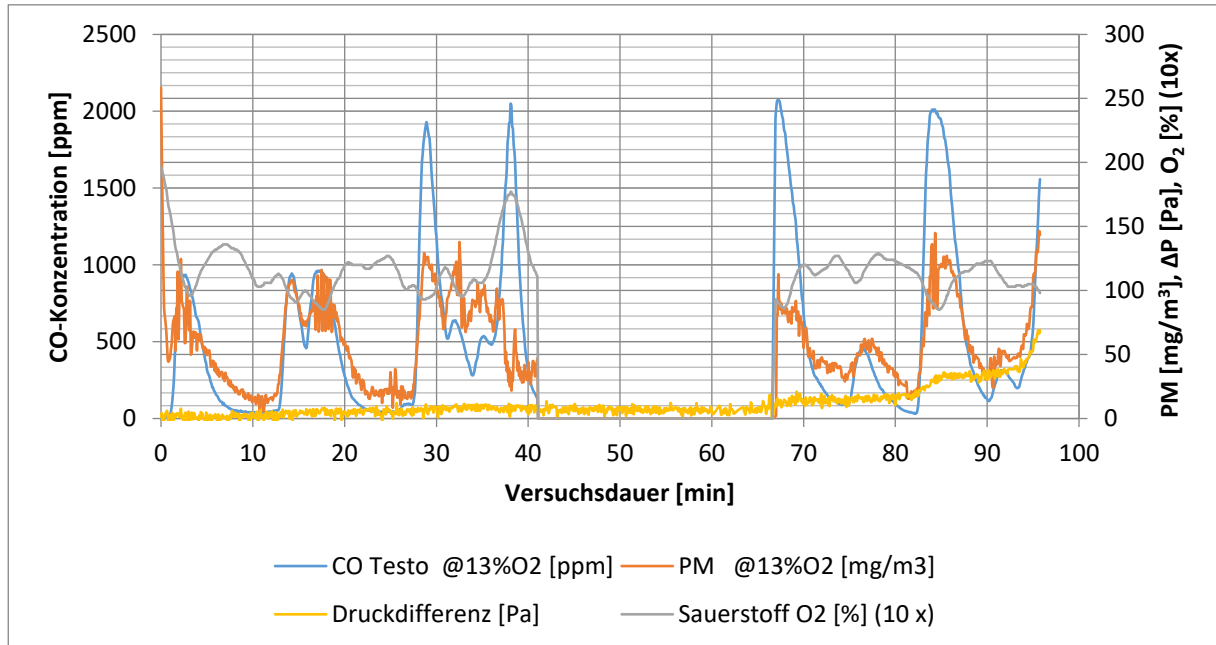


Abbildung 23: Messdaten der Glasfilament Silane 390gr/m² bei 1.2 m/min

Aufgrund der CO- und Feinstaubkonzentrationswerten kann davon ausgegangen werden, dass sich dieses Material nicht als Filter eignet. Der Anstieg des Druckverlustes zum Ende des Versuches deutet jedoch auf eine Ablagerung von Feinstaub hin. Die Feinstaubkonzentrationswerte scheinen gleichzeitig aber immer noch stark zu schwanken, was nicht auf eine Filterwirkung rückschliessen lässt. Und da bei allen Glasfilament Materialien, unabhängig von Flächengewicht und Bindung, mangelnde Webdichte und Stabilität festgestellt wurde (siehe auch Kapitel 4.4), kann dieses Material als nicht geeignet eingestuft werden. Dass die Webdichte und Stabilität die Filtereigenschaften negativ beeinflusst zeigt auch eine Analyse der Staubseite des Filters. Die Hohlräume zwischen den einzelnen Faserbündeln verstopfen, wenn die Voraussetzungen (welche nicht genau bekannt sind) dafür gegeben sind.

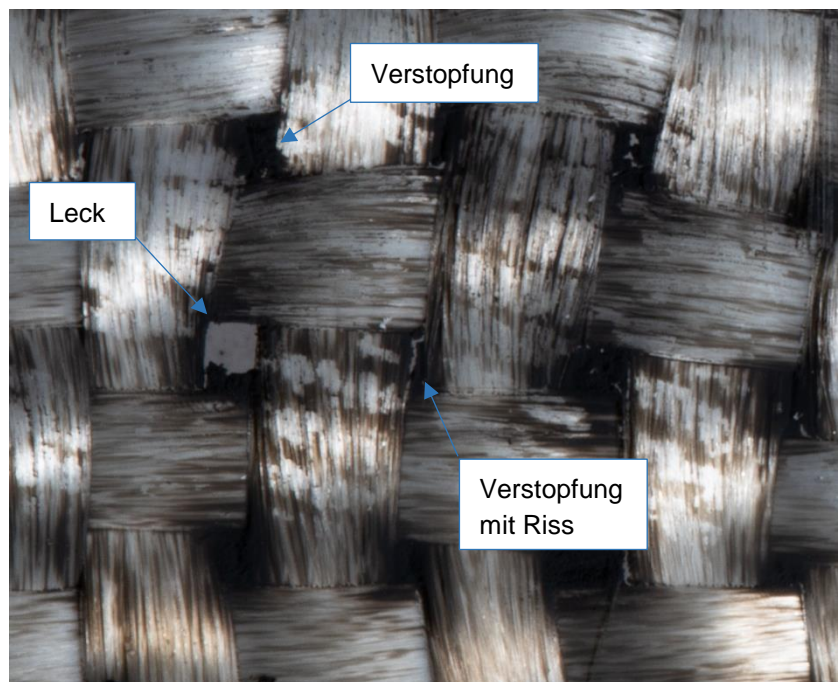


Abbildung 24: Staubseite Glasfilament Silane 390 g/m²



Geschieht dies, ist eine gewisse Abscheidung möglich. Dies führt aber auch zu einem rapiden Druckverlustanstieg was wiederum zu einem Ablösen dieser Verstopfungen führen kann (die Strömung verursacht Schwingungen welche zum Ablösen von Feinstaub führen können). Zusätzlich kann es vorkommen, dass die Hohlräume nie vollständig verstopfen was eine Definition des Abscheidegrades unmöglich macht. Diese kann in Abhängigkeit vom Materialausschnitt sehr gut oder auch ungenügend sein.

Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration Glasfilament	CO-Konzentration Glasfilament
41 mg/m ³ @ 13% O ₂	275 ppm @ 13% O ₂	59.7 mg/m ³ @ 13% O ₂	541 ppm @ 13% O ₂

Biobaumwolle

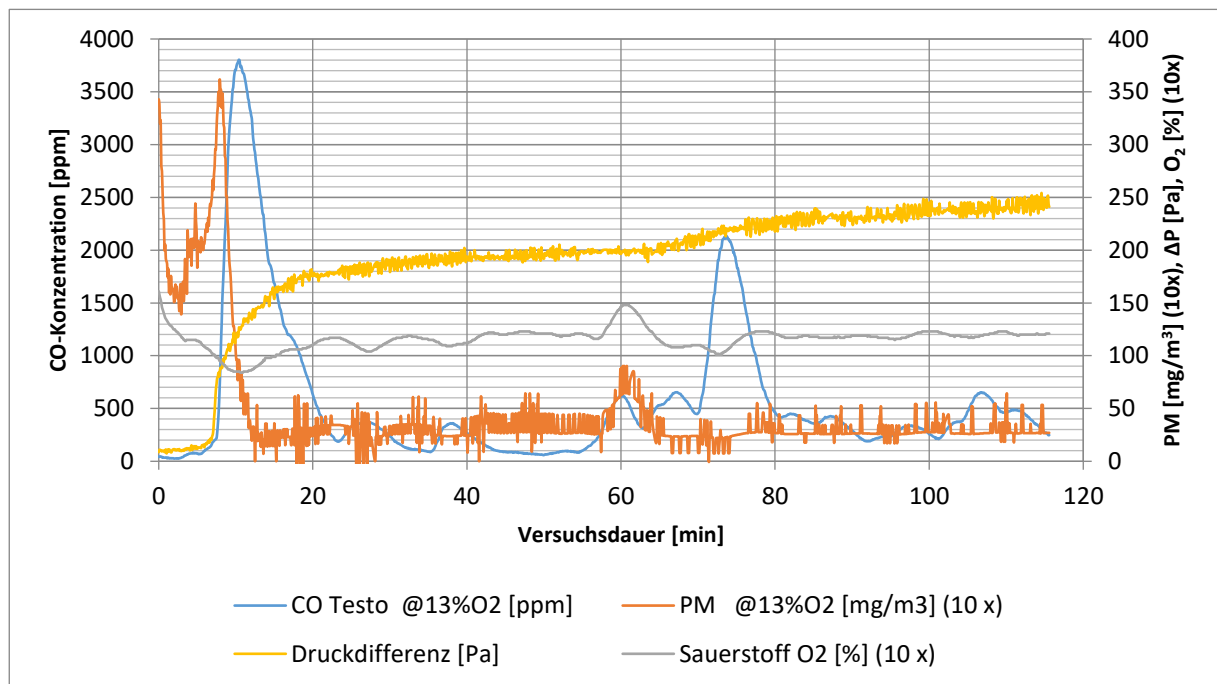


Abbildung 25: Messdaten der Biobaumwolle bei 1.2 m/min

Aus dem Verlauf von Druckverlust und Feinstaubkonzentration wie auch von den Mittelwerten dieser kann auf eine Filterwirkung > 50 % geschlossen werden.

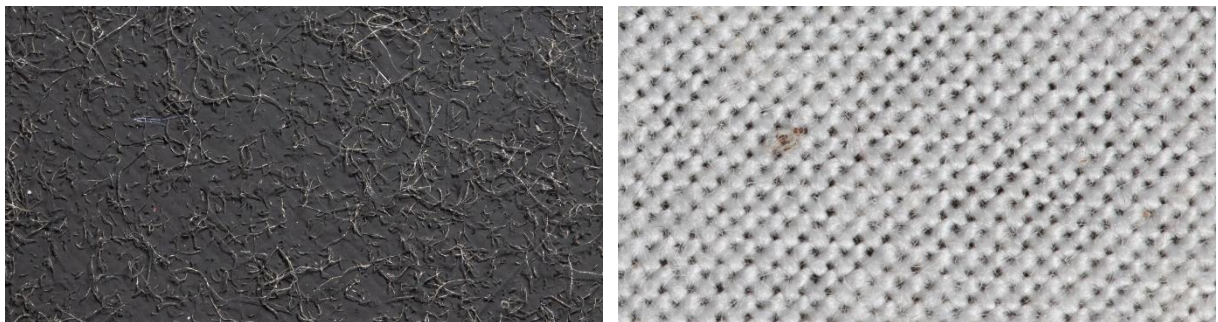


Abbildung 26: links: Staubseite; rechts: Reingasseite



Betrachtet man zusätzlich die Staubseite und Reingasseite kann ein ähnliches Verhalten wie schon beim Glasfilament Silane 390gr/m² Leinwand erkannt werden. Die Lücken welche bei gewobenen Materialien immer bis zu einem gewissen Grad vorhanden sind haben sich auch hier zugestopft. Zusätzlich hat sich aber auf der Oberfläche ein Ansatz eines Staubkuchens gebildet. Der Staubkuchen übernimmt nach seiner Entstehung die hauptsächliche Filterfunktion und ist für den Abscheidegrad des Materials verantwortlich.

Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration Biobaumwolle	CO-Konzentration Biobaumwolle
41 mg/m ³ @ 13% O ₂	275 ppm @ 13% O ₂	6.2 mg/m ³ @ 13% O ₂	573 ppm @ 13% O ₂

isoGLAS®-Gewebe

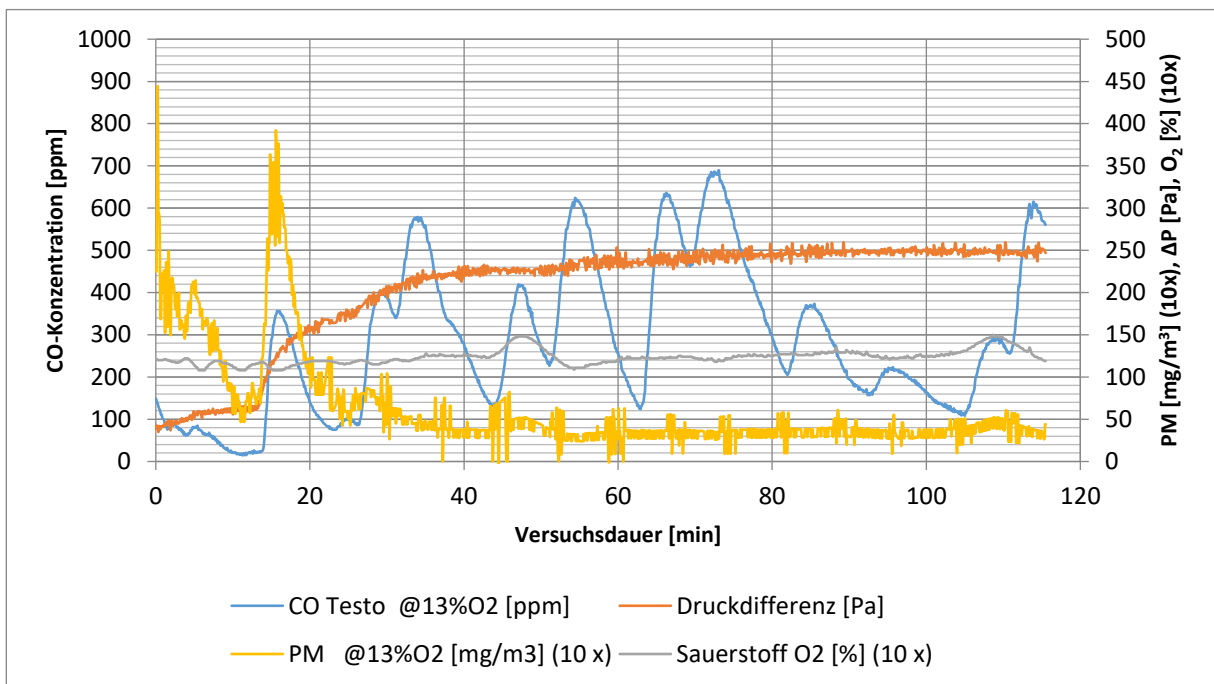


Abbildung 27: Messdaten des isoGLAS®-Gewebes bei 1.2 m/min

Der Verlauf von Druckverlust und Feinstaubkonzentration lassen grundsätzlich eine Filterwirkung erwarten. Dass dieser Filter in Abbildung 17 jedoch eine Abscheiderate <50 % aufweist ist einerseits durch die tiefen CO-Werte aber hauptsächlich durch den Druckverlustverlauf erklärbar. Da alle Filter bzw. deren Eigenschaften im Bereich 0-200 Pa verglichen wurden, hat dieser Filter eine zu kleine Abscheiderate. Vergleicht man diese Resultate mit denen des Materials Baumwolle ist ein sehr ähnliches Verhalten sichtbar. Hauptunterschied ist der Druckverlust welcher sich einstellt bis man von einer Stabilisierung dieses sprechen kann. Daher kann man nicht sagen, dass dieses Material keine Filterwirkung hat, lediglich dass es für den Einsatz bei kleinen Differenzdrücken ungeeignet ist.



Abbildung 28: link: Reingasseite; rechts: Staubseite

Bei der Analyse der Staubseite des Filters fällt auf, dass sich im Vergleich zur Biobaumwolle kein Staubkuchen gebildet hat. Der Feinstaub scheint in das Garn einzudringen und sich dort Abzulagern.

Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration isoGLAS®-Gewebe	CO-Konzentration isoGLAS®- Gewebe
41 mg/m ³ @ 13% O ₂	275 ppm @ 13% O ₂	22.0 mg/m ³ @ 13% O ₂	128 ppm @ 13% O ₂



Herdung Glasfasermatte

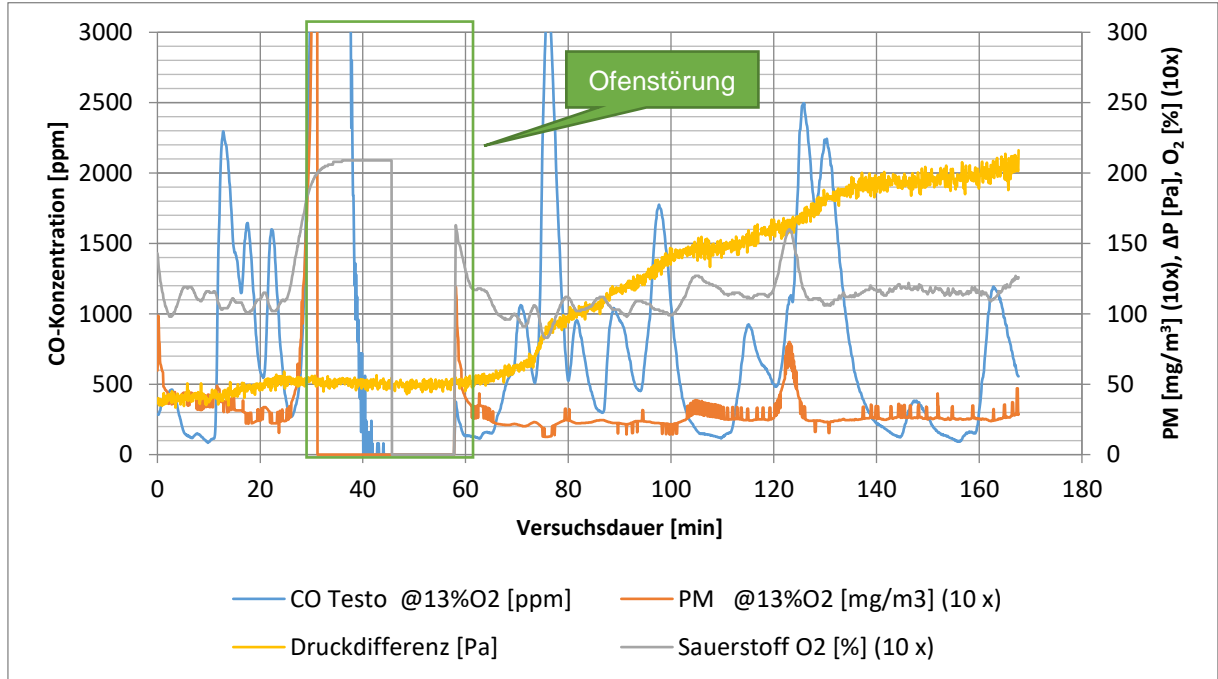


Abbildung 29: Messdaten der Herding Glasfasermatte bei 1.2 m/min

Aufgrund der Messwerte lässt sich dieser Filter als Oberflächenfilter mit sehr guter Abscheiderate einstufen. Betrachtet man den Querschnitt des Filters, bestätigt dieses eine Ansammlung von Feinstaub an der Oberfläche und in den obersten Lagen des Materials. Auf der Staubseite des Filters ist die Entstehung des Staubkuchens erkennbar - allerdings noch nicht sehr weit fortgeschritten.



Abbildung 30: links: Querschnitt durch den Werkstoff; rechts Staubseite

Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration Glasfasermatte	CO-Konzentration Glasfasermatte
41 mg/m ³ @ 13% O ₂	275 ppm @ 13% O ₂	2.9 mg/m ³ @ 13% O ₂	728 ppm @ 13% O ₂



needlona®

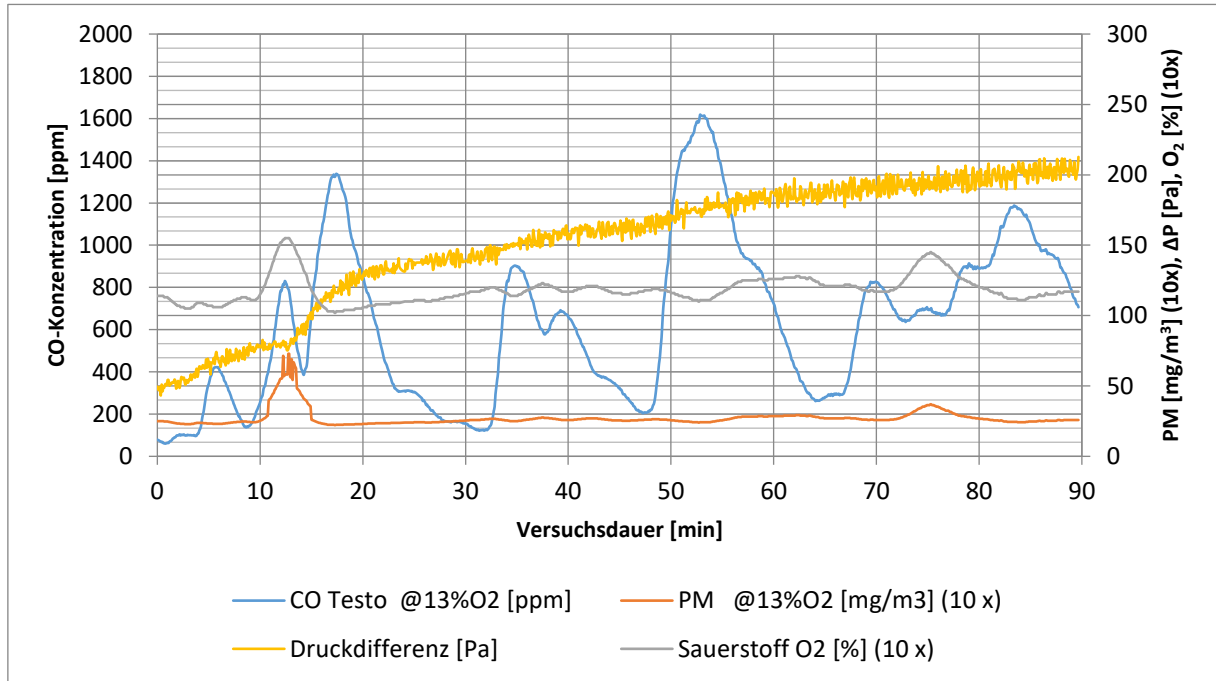


Abbildung 31: Messdaten needlona® bei 1.2 m/min

Dieses Filtermaterial weist von Beginn weg einen eher hohen Druckverlust auf. Es hat jedoch auch durchgängig sehr gute Abscheidewerte. Einziger Peak in der Feinstaubkonzentration nach dem Filter kann durch das zeitgleiche Ansteigen des Sauerstoffes erklärt werden. Die Gründe für dieses Verhalten des Filters können mit dem Material bzw. dessen Eigenschaften erklärt werden. Bei diesem Material handelt es sich um ein Vliesstoff, welcher aus PTFE Fasern hergestellt ist. Die sehr geringe Dicke lässt auf eine sehr hohe Komprimierung der einzelnen Faserschichten schließen. Dies und die sehr glatte Oberfläche verbessern die Abscheideeigenschaften wie auch die Bildung des Staubkuchens erheblich. Dieser Filter eignet sich deswegen insbesondere an Orten, wo sehr niedrige Grenzwerte im Reingas gefordert sind.

Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration needlona®	CO-Konzentration needlona®
41 mg/m ³ @ 13% O ₂	275 ppm @ 13% O ₂	2.7 mg/m ³ @ 13% O ₂	642 ppm @ 13% O ₂



Abbildung 32: links: Querschnitt durch den Werkstoff; rechts Staubseite

Die Analyse des Querschnittes und der Oberfläche zeigen deutlich das Verhalten eines Oberflächenfilters. Der Staubkuchen ist allerdings noch nicht sehr gross, was gut an den den Staubkuchen durchdringenden Fasern erkennbar ist.



microvel® TF

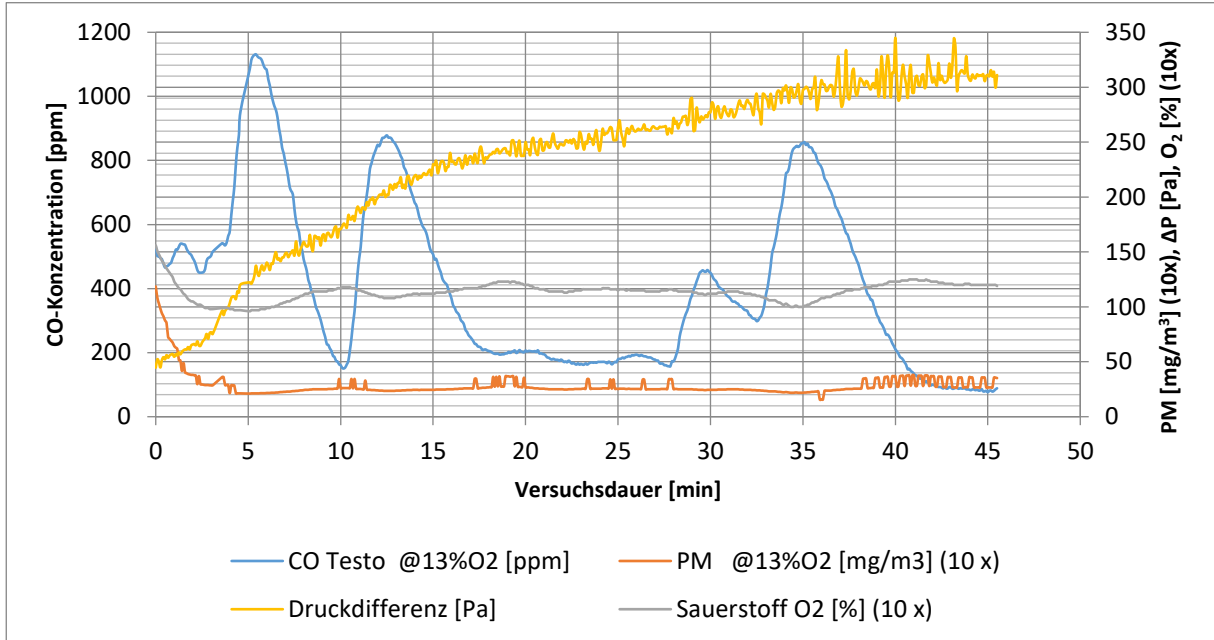


Abbildung 33: Messdaten des microvel® TF bei 1.2 m/min

Hier haben wir eine ähnliche Situation wie bereits beim vorherigen Material. Dieses Material ist jedoch speziell für Feuerungen konzipiert. Gemäss Aussagen und Informationsmaterial der Herstellerfirma ist das Material für den Einsatz von deutlich höherem Druckverlust und in Kombination mit einer Druckluftabreinigung gedacht.

Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration microvel® TF	CO-Konzentration microvel® TF
41 mg/m ³ @ 13% O ₂	275 ppm @ 13% O ₂	3.3 mg/m ³ @ 13% O ₂	584 ppm @ 13% O ₂

Beim Filterquerschnitt und auf der Staubseite zeigt sich ein typisches Verhalten für ein Oberflächenfilter. Der Feinstaub hat sich praktisch ausschliesslich in der obersten Lage des Material angesammelt. Der Staubkuchen ist hier allerdings erst in der Entstehung. Somit ist das Staubspeichervermögen dieses Materials bei 200Pa Diferenzdruck vergleichsweise klein.



Abbildung 34: links: Querschnitt durch den Werkstoff; rechts Staubseite



microvel® PL

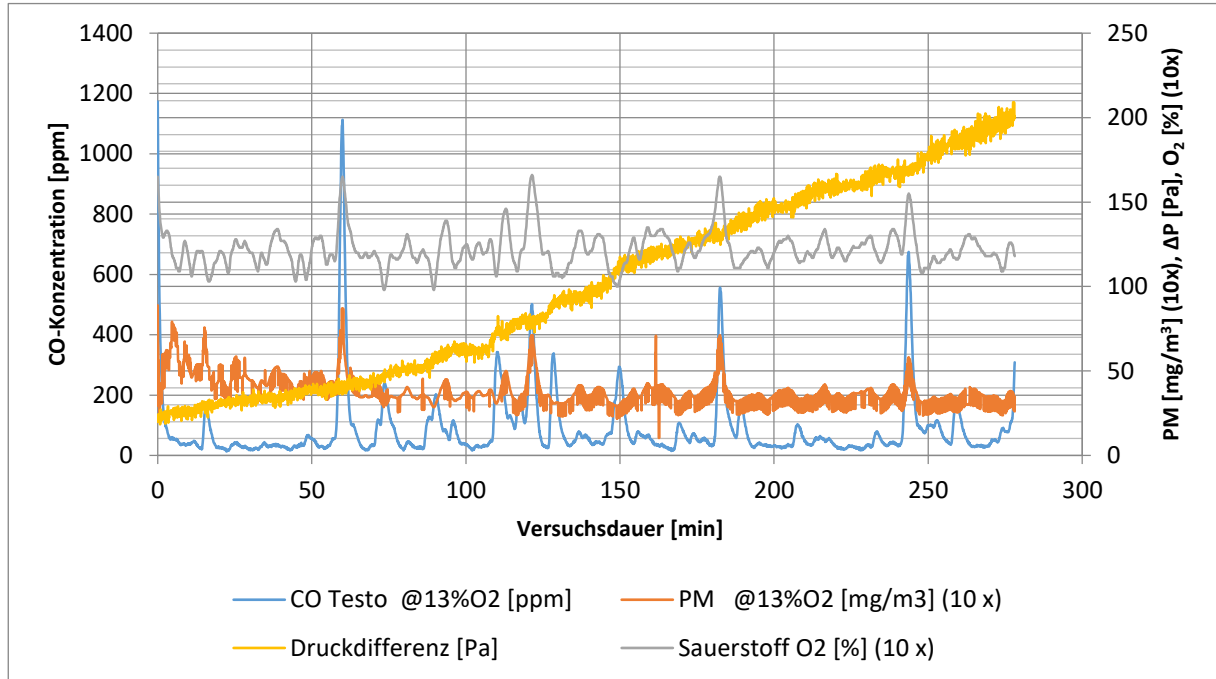


Abbildung 35: Messdaten des microvel® PL bei 1.2m/min

Das Material verhält sich sehr ähnlich wie das microvel® TF. Die Beurteilung ist hier durch sehr niedrige CO-Werte allerdings etwas erschwert. Der Verlauf wie auch der Mittelwert der Feinstaubkonzentration in Zusammenhang mit dem Druckverlustanstieg lassen aber auf eine ausreichend gute Abscheiderate schliessen.

Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration microvel® PL	CO-Konzentration microvel® PL
41 mg/m ³ @ 13% O ₂	275 ppm @ 13% O ₂	3.8 mg/m ³ @ 13% O ₂	88 ppm @ 13% O ₂

Bei näherer Betrachtung des Testfilters fällt auf, dass die Staubseite sehr viel faseriger und feiner ist als die Reinseite. Nach etwas Nachforschung wurde festgestellt, dass dieser Filter genau umgekehrt eingesetzt werden sollte für optimale Ergebnisse. Er wurde im Zusammenhang mit den Regenerationsversuchen nochmals getestet und hatte dort ebenfalls sehr gute Abscheidewerte.



Abbildung 36: links: Querschnitt durch den Werkstoff; rechts Staubseite



isoGLAS® Nadelvlies 500 g/m²

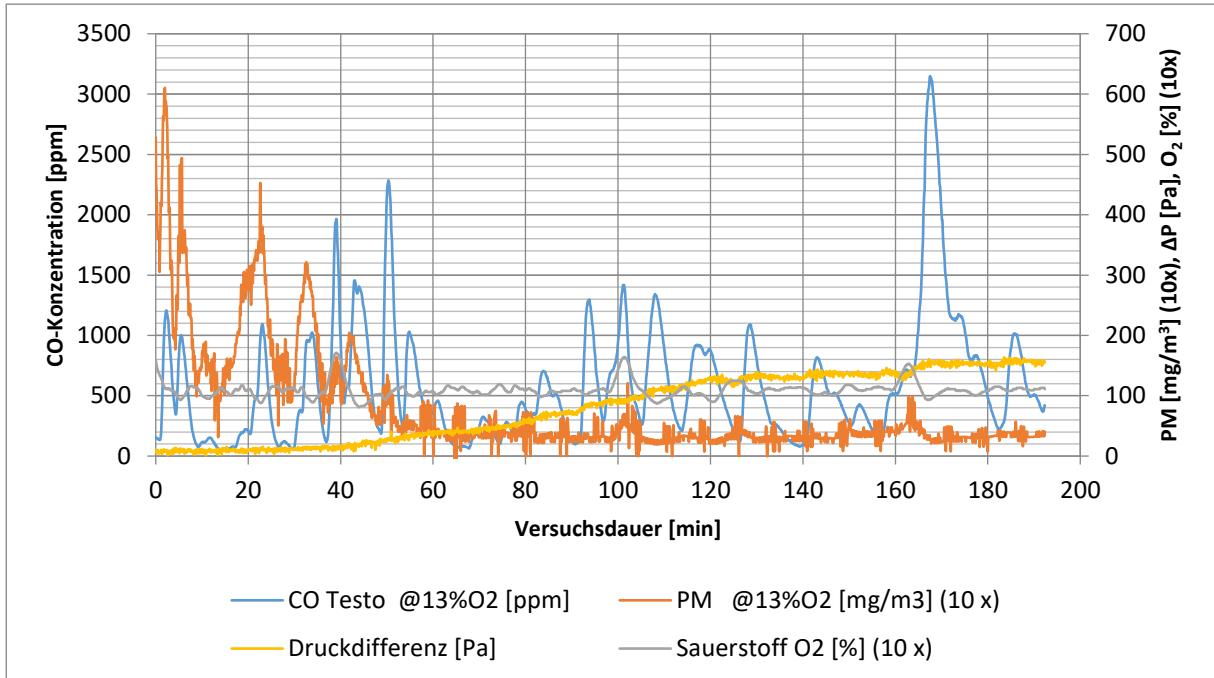


Abbildung 37: Messdaten isoGLAS® Nadelvlies 500 g/m² bei 1.2 m/min

Aufgrund vom Verlauf der Feinstaubkonzentration im Zusammenhang mit dem Druckverlust kann davon ausgegangen werden, dass es sich hier um einen Tiefenfilter handelt welcher eine Abscheidegrad höher 50% besitzt.

Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration isoGLAS® Nadelvlies 500 g/m ²	CO-Konzentration isoGLAS® Nadelvlies 500 g/m ²
------------------------------------	------------------------------	---	--

41 mg/m ³ @ 13% O ₂	275 ppm @ 13% O ₂	7.9 mg/m ³ @ 13% O ₂	592 ppm @ 13% O ₂
---	------------------------------	--	------------------------------

Auf der Staubseite des Filters lässt sich noch kein Ansatz eines Staubkuchens erkennen. Im Querschnitt lässt sich erkennen, dass der Feinstaub teils bis mehr als die Hälfte des Materials durchdrungen hat. Somit handelt es sich hierbei sicherlich um Tiefenfiltration.



Abbildung 38: links: Querschnitt durch das Material; rechts Staubseite



isoGLAS® Nadelvlies 1000 g/m²

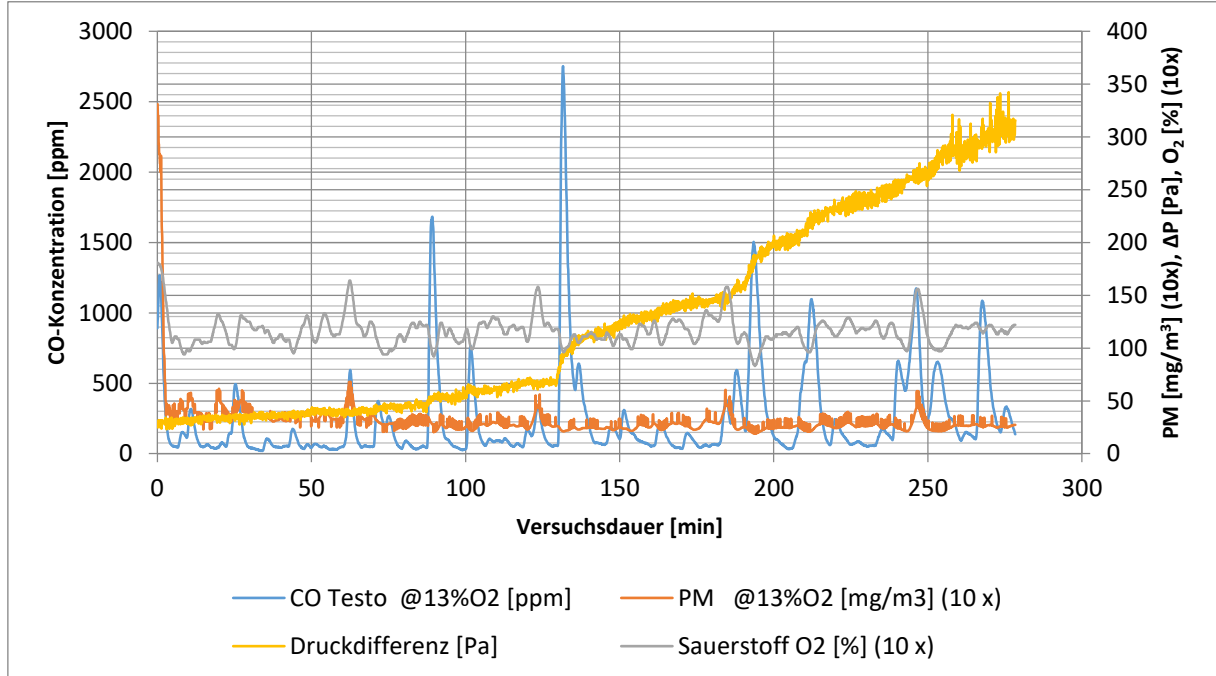


Abbildung 39: Messdaten isoGLAS® Nadelvlies 1000 g/m² bei 1.2 m/min

An diesem Material ist gut erkennbar was alleine ein höheres Flächengewicht, was in diesem Fall auch einer höheren Komprimierung der Fasern entspricht, auf die Stabilisierungsphase und die Filtereigenschaften zu Beginn der Filtereinsatzzeit ausmachen kann. Bei halbem Flächengewicht war die Stabilisierungsphase ca. 40 min nach der Verdoppelung ist diese nicht mehr im messbaren Bereich (erste 5 min.). Dies deutet auch auf eine mögliche Oberflächenfiltration hin.

Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration isoGLAS® Nadelvlies	CO-Konzentration isoGLAS®
41 mg/m ³ @ 13% O ₂	275 ppm @ 13% O ₂	3.3 mg/m ³ @ 13% O ₂	215 ppm @ 13% O ₂

Im Querschnitt sind Spuren von Feinstaub auf der ganzen Dicke des Filter zu finden. Der grösste Teil befindet sich jedoch in der obersten Schicht und auf der Oberfläche. Auch auf der Staubseite lassen sich erste Anzeichen für einen Staubkuchen erkennen.



Abbildung 40: links: Querschnitt durch das Material; rechts Staubseite



4.8.2 Staubabscheidung bei einer Anströmgeschwindigkeit von 6 m/min

Für die Untersuchungen bei einer Anströmgeschwindigkeit von 6 m/min liegen die Mittelwerte der Baseline für CO-Konzentration und Feinstaubkonzentration bei:

- CO-Konzentration: 152 ppm @ 13% O₂
- Feinstaubkonzentration: 22 mg/m³ @ 13% O₂
- Abscheidegrad 50%: 0.358 mg/m³/ppm

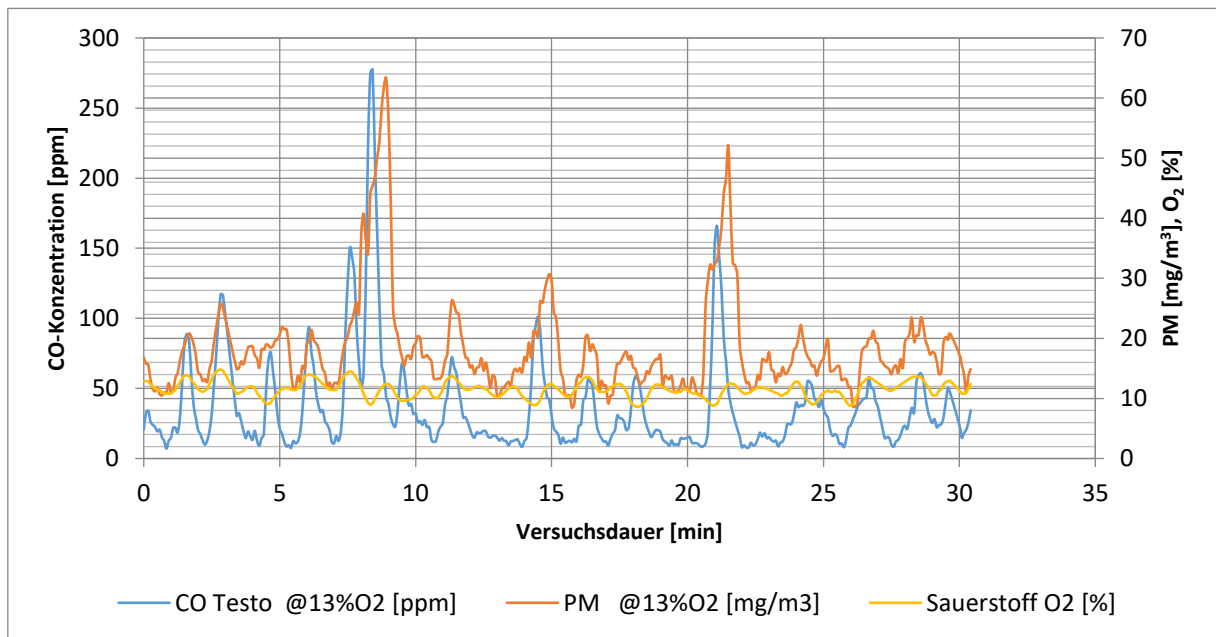


Abbildung 41: Baseline-Messung bei 6 m/min

Für die höheren Rauchgasgeschwindigkeiten konnte der Ofen nicht mehr mit den gleichen Parametern betrieben werden. Es zeigte sich, dass die Feinstaubkonzentration im Mittel gerade halb so hoch (22 mg/m³) wie bei der Baseline-Messung mit 1.2 m/min Rauchgasgeschwindigkeit betrug. Dies macht die Beurteilung der Ergebnisse alleine aufgrund der Mittelwerte nochmals schwieriger, da beim besten Filter immer noch 3-5 mg/m³ gemessen wurden und das Messgerät kleinere Werte nicht erfassen kann. Dies wäre hier bereits ein Viertel der mittleren Feinstaubkonzentration. Die nachfolgende Zusammenstellung der Abscheidegrade lässt daher nur eine Einordnung der Materialien zu. Erst in Zusammenhang mit der Betrachtung der CO-, Feinstaub und Druckdifferenzwerten kann eine Aussage über die Abscheidequalitäten gemacht werden.

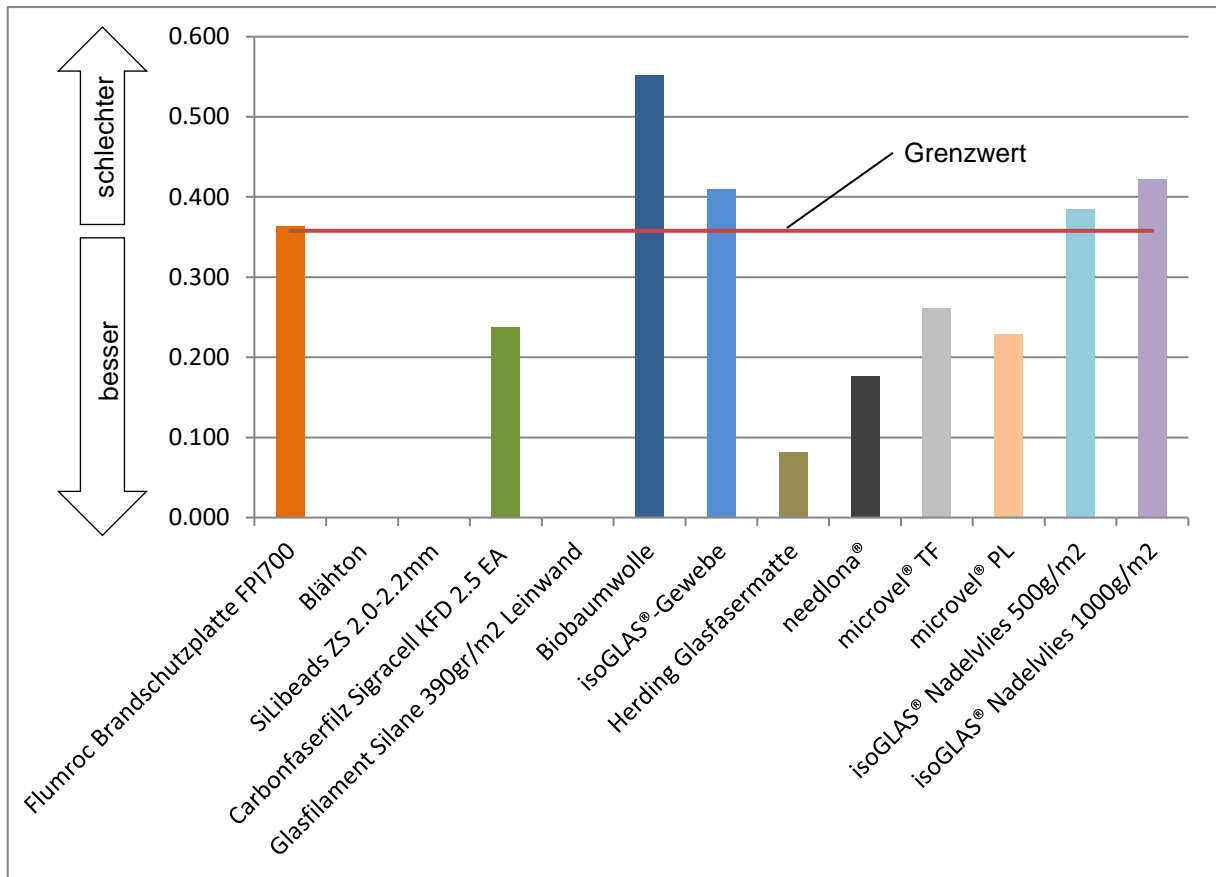


Abbildung 42: Abscheidewerte bei 6 m/min

Materialien welche bereits bei 1.2 m/min keine erkennbare Abscheidewirkung hatten wurden nicht erneut untersucht. Materialien welche nur im Bereich bis 200 Pa schlecht abschnitten und danach aber durchaus eine erkennbare Filterwirkung hatten wurden erneut untersucht. Alle Materialien wurden bis zu einer Druckdifferenz von 500Pa untersucht. Die Messungen wurden aber oft erst bei 1000Pa abgebrochen, da sehr oft sprunghafte Anstiege im Druckverlust von mehreren hundert Pascal beobachtet werden konnten.



Flumroc Brandschutzplatte FPI700

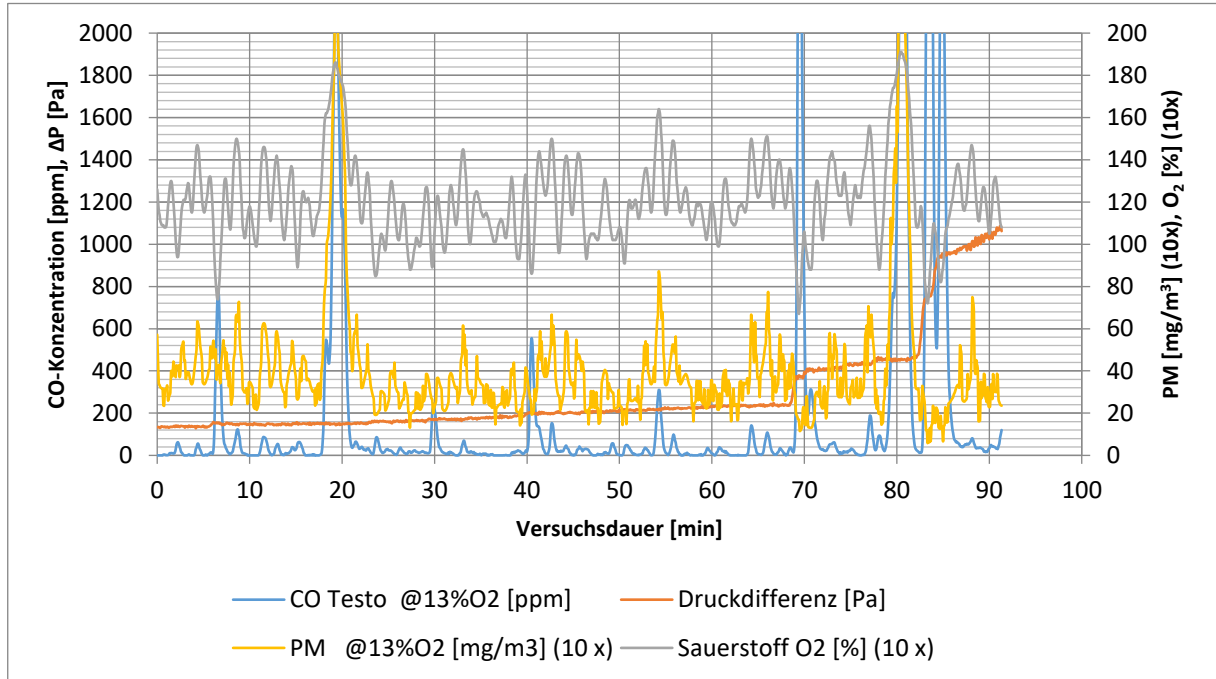


Abbildung 43: Messwerte der Flumroc Brandschutzplatte FPI 700 bei 6 m/min

Die Ergebnisse dieses Versuches sind schwierig zu beurteilen. Zum einen haben wir in der CO- wie auch in den Feinstaubwerten Peaks welche nur schwer zu erklären sind. Dass es zu Durchschlägen aufgrund der hohen Anströmgeschwindigkeit kommt ist nicht auszuschliessen. Wieso die CO-Peaks jedoch Teilweise extreme Anstiege im Druckverlust verursachen ist nicht bekannt. Eine Möglichkeit wäre, dass bei den CO-Peaks mit extremer Druckverluststeigerung eine grosse Menge an Feinstaub mit grossem aerodynamischem Durchmesser im Abgas vorhanden sind. Diese könnten für den Druckanstieg verantwortlich sein.

Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration Flumroc FPI700	CO-Konzentration Flumroc FPI700
22 mg/m ³ @ 13% O ₂	152 ppm @ 13% O ₂	4.2 mg/m ³ @ 13% O ₂	142 ppm @ 13% O ₂

Vergleicht man den Filterquerschnitt des Testobjektes welches mit 1.2m/min und dasjenige welches mir 6 m/min beaufschlagt wurde, erkennt man eine grössere Menge an Feinstaub in tieferen Schichten des Materials. Der Unterschied ist allerdings nicht extrem gross und Hinweise auf ein komplettes Durchdringen des Materials konnten auch nicht festgestellt werden.

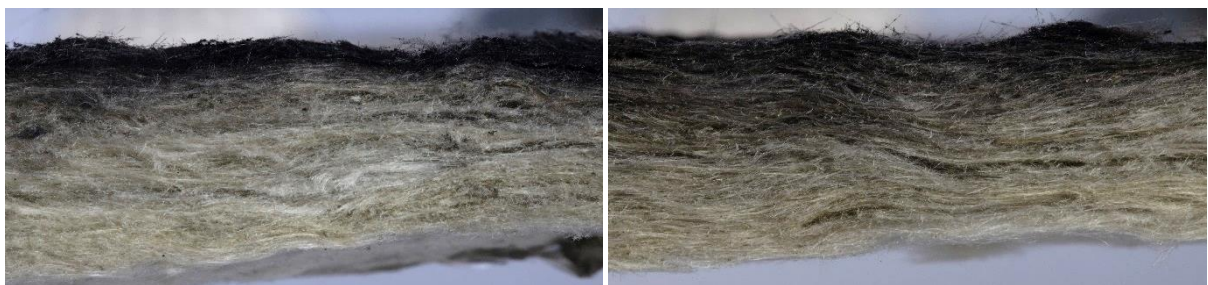


Abbildung 44: Vergleich Filterquerschnitt links 1.2 m/min, rechts 6 m/min



Sigracell KFD 2.5 EA

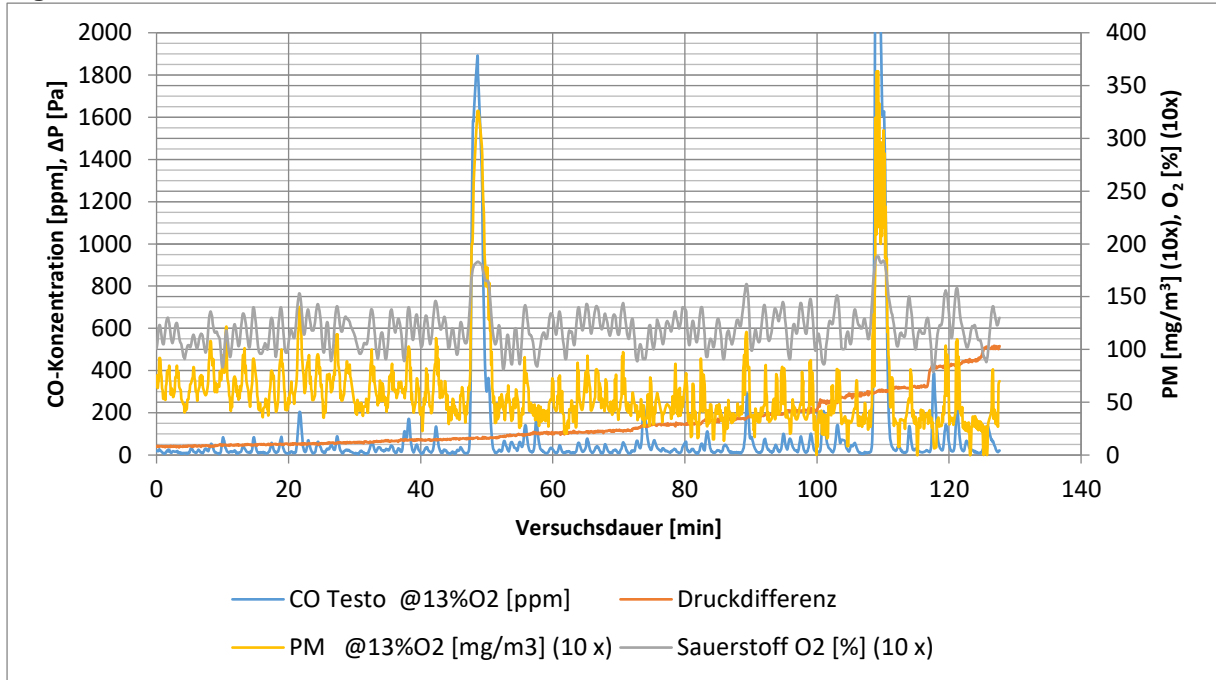


Abbildung 45: Messwerte des Sigracell KFD 2.5 EA bei 6 m/min

Auch hier ist eine endgültige Beurteilung schwierig. Hier kommt erschwerend hinzu, dass das Material schwarz ist und deswegen der Feinstaub auf und im Material nur schwer vom Material selbst zu unterscheiden ist. Es kann aber mit Sicherheit ausgesagt werden, dass das Material eine Filterwirkung hat. Wie hoch diese ist bleibt jedoch offen.

Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration Sigracell KFD 2.5	CO-Konzentration Sigracell KFD 2.5
22 mg/m ³ @ 13% O ₂	152 ppm @ 13% O ₂	5.8 mg/m ³ @ 13% O ₂	88 ppm @ 13% O ₂



Baumwolle

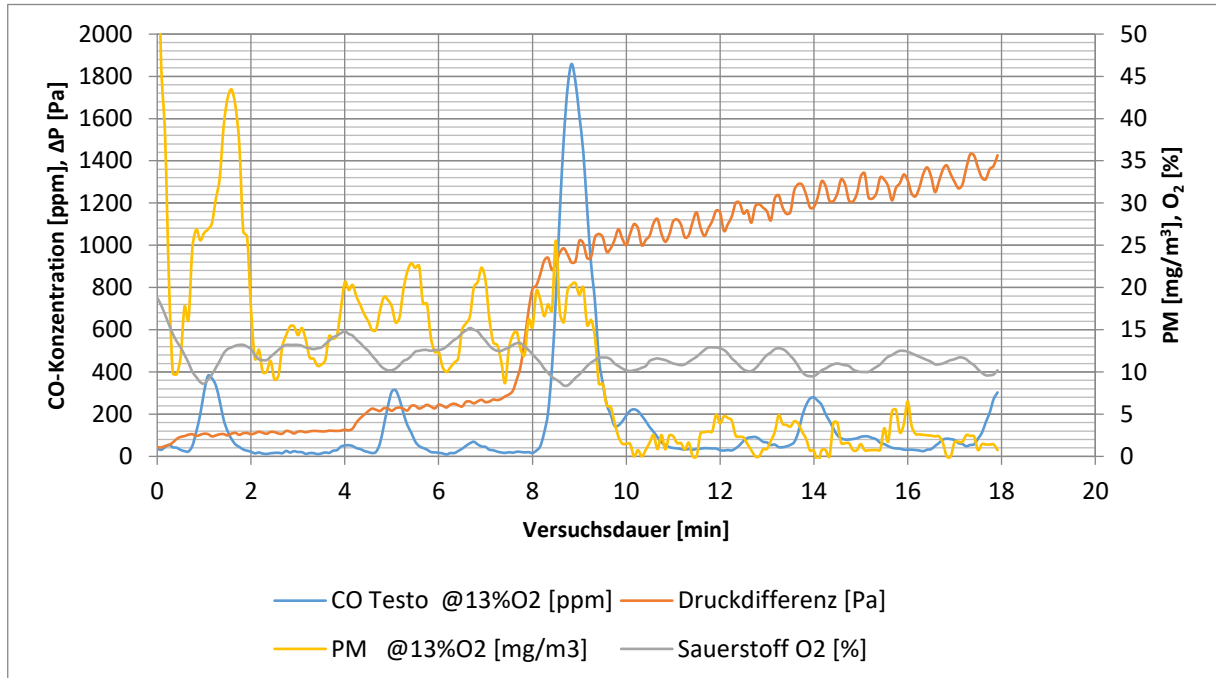


Abbildung 46: Messwerte der Baumwolle bei 6 m/min

Sinkende Feinstaubkonzentration und steigender Druckverlust deuten auf eine Abscheidung hin. Wie gut dieses Material effektiv abscheidet kann aufgrund der vorliegenden Daten nicht abschliessend beurteilt werden. Der verursachte Druckverlustanstieg ist jedoch so schnell entstanden und so gross, dass ein Einsatz unter den definierten Rahmenbedingungen nicht sinnvoll umsetzbar wäre.

Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration Baumwolle	CO-Konzentration Baumwolle
22 mg/m ³ @ 13% O ₂	152 ppm @ 13% O ₂	5.8 mg/m ³ @ 13% O ₂	88 ppm @ 13% O ₂



Auf der Staubseite des Materials lassen sich Ablagerungen erkennen welche auf die Entstehung eines Staubkuchens hindeuten. Dass diese Ablagerungen zu einem solch hohen Druckverlust führten hängt vermutlich mit der Dichte des Garns zusammen. Bei anderen gewobenen Materialien ist die Webdichte ähnlich das Garn jedoch loser. Daher kann die Luft bei diesem Material praktisch nur durch die Zwischenräume zwischen den einzelnen Garnen. Sind die einzelnen Fasern des Garns sehr dicht gepackt, ergibt sich ein sehr hoher Druckverlust.

Abbildung 47: Staubseite Baumwolle



isoGLAS®-Gewebe

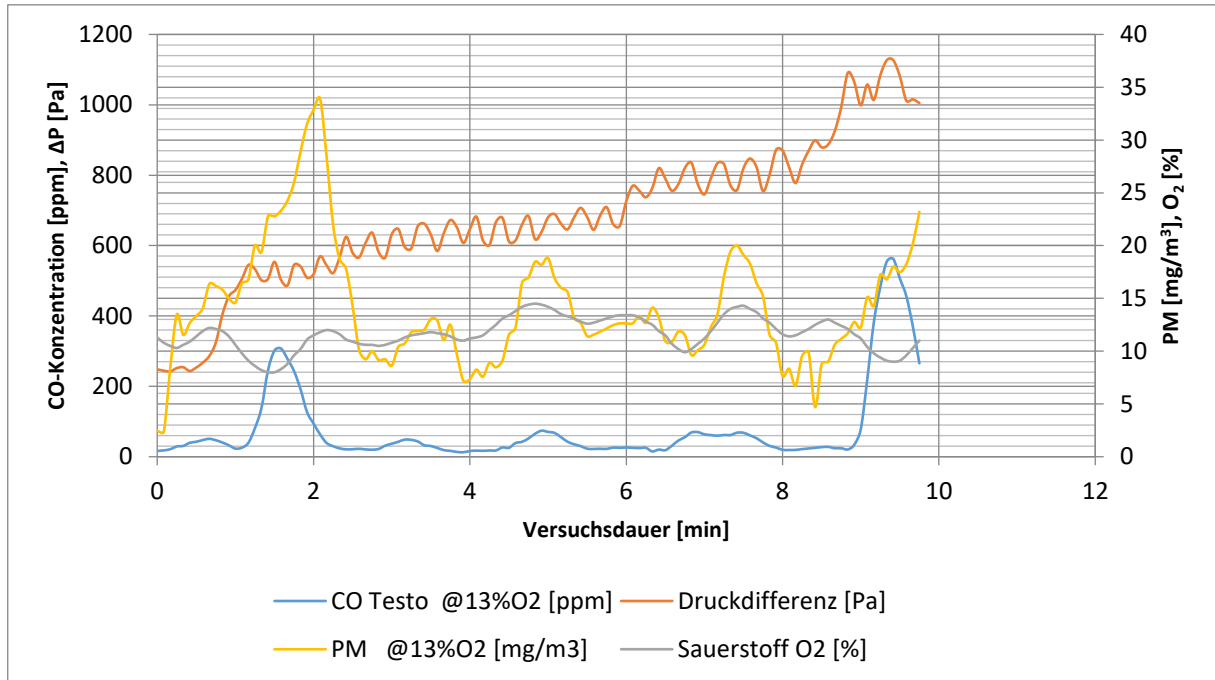


Abbildung 48: Messwerte des isoGlas®-Gewebes bei 6 m/min

Hier lassen die Werte nur Vermutungen zu. Die CO-Werte sind enorm Tief die Feinstaubwerte hingegen sind vergleichsweise hoch. Daraus kann eigentlich geschlussfolgert werden, dass dieses



Abbildung 49: Staubseite des IsoGlas®-Gewebes

Material keinen Feinstaub abscheidet. Das der Druckverlust trotzdem enorm ansteigt deutet hingegen auf eine Ablagerung von Feinstaub hin. Betrachtet man die Staubseite des Materials, lässt sich erkennen, dass die Verschmutzung sehr ungleichmässig ist. Dies deutet auf strömungsmechanische Phänomene hin welche verursachen, dass das Gas nur noch den Weg mit dem geringsten widerstand nimmt. Dort sind die Geschwindigkeiten entsprechend so gross, dass es zu Durchschlägen kommt. Diese Theorie müsste genauer untersucht werden um dies bestätigen zu können. Da der Druckverlust aber nach nur

10min bereits auf 1000 Pa gestiegen ist und die Feinstaubwerte immer noch vergleichsweise hoch sind kann das Material, zumindest für den untersuchten Fall, als ungeeignet deklariert werden.

Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration isoGLAS®-Gewebe	CO-Konzentration isoGLAS®- Gewebe
------------------------------------	------------------------------	---	---

22 mg/m ³ @ 13% O ₂	152 ppm @ 13% O ₂	14.6 mg/m ³ @ 13% O ₂	38 ppm @ 13% O ₂
---	------------------------------	---	-----------------------------



Herding Glasfasermatte

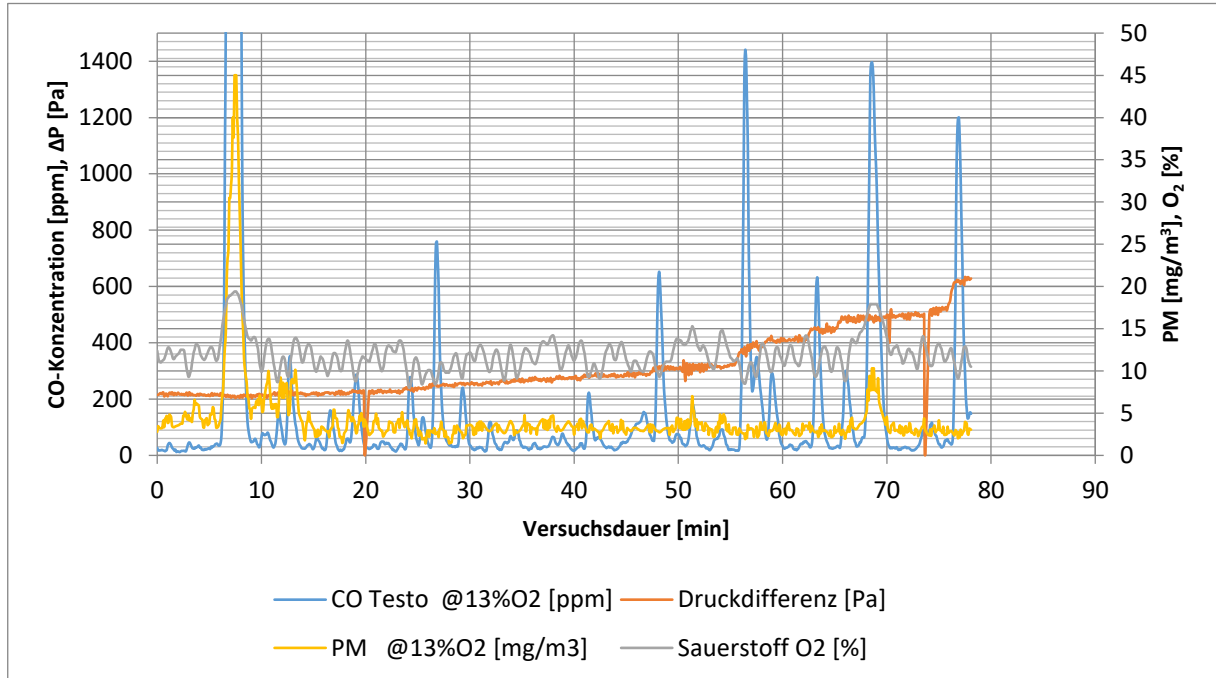


Abbildung 50: Messwerte der Herding Glasfasermatte bei 6 m/min

Das Verhalten des Filters ist hier sehr interessant. Das Verhalten bis ca. Minute 15 ähnelt eher dem eines Tiefenfilter als dem eines Oberflächenfilters. Dies obwohl das Verhalten des Filters bei 1.2m/min noch eher dem eines Oberflächenfilter glich. Vergleicht man die Filterquerschnitte bei 1.2 m/min und bei 6 m/min kann man erkennen, dass mehr Feinstaub in tieferen Gewebeschichten vorhanden ist.



Abbildung 51: Vergleich Filterquerschnitt; Anströmgeschwindigkeit links 1.2 m/min, rechts 6 m/min

Betrachtet man die Mittelwerte der Messung kann diesem Material ein Abscheidegrad von mehr als 50% zugeordnet werden.

Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration Glasfasermatte	CO-Konzentration Glasfasermatte
22 mg/m ³ @ 13% O ₂	152 ppm @ 13% O ₂	4.4 mg/m ³ @ 13% O ₂	206 ppm @ 13% O ₂



needlona®

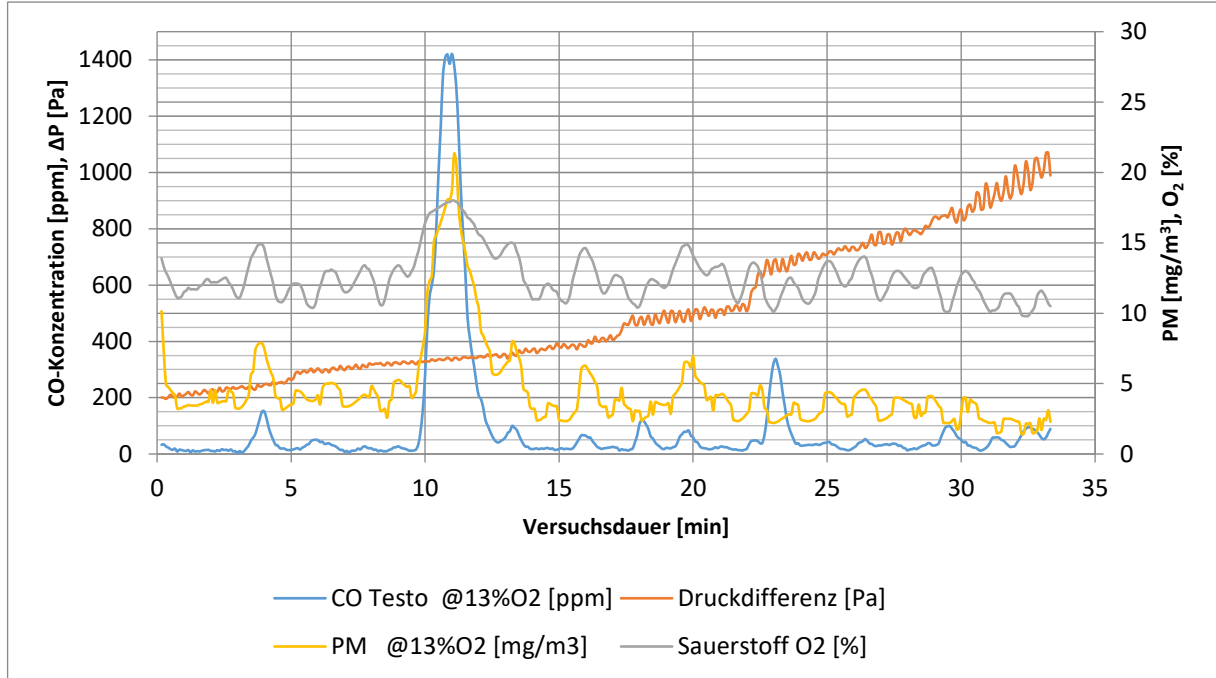


Abbildung 52: Messwerte des needlona® bei 6 m/min

Druckverlustwerte und Feinstaubwerte deuten auf einen Abscheidegrad hin. Aufgrund der niedrigen CO-Werte ist aber schwer zu sagen, ob dieser effektiv mehr als 50% beträgt. Zusätzlich kommt hinzu, dass die Werte im Mittel deutlich höher lagen als bei dem Versuch mit einer Anströmgeschwindigkeit von 1.2 m/min.

Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration needlona®	CO-Konzentration needlona®
22 mg/m ³ @ 13% O ₂	152 ppm @ 13% O ₂	5.5 mg/m ³ @ 13% O ₂	113 ppm @ 13% O ₂

Vergleicht man die Filterquerschnitte ist gut erkennbar, dass beim Versuch mit 6 m/min deutlich weniger Feinstaub auf dem Filter vorhanden ist. Dieser Umstand kann darauf zurückgeführt werden, dass der Druckverlust proportional zur Geschwindigkeit ist (solange laminare Strömungsbedingungen herrschen). Dies und der Umstand, dass sich der Druckverlust sehr sprunghaft entwickelt zeigt, dass davon abgesehen werden sollte das Material mit 6 m/min anzuströmen. Dieser Umstand kann auch bei anderen Filtermedien in ähnlichem Umfang beobachtet werden.

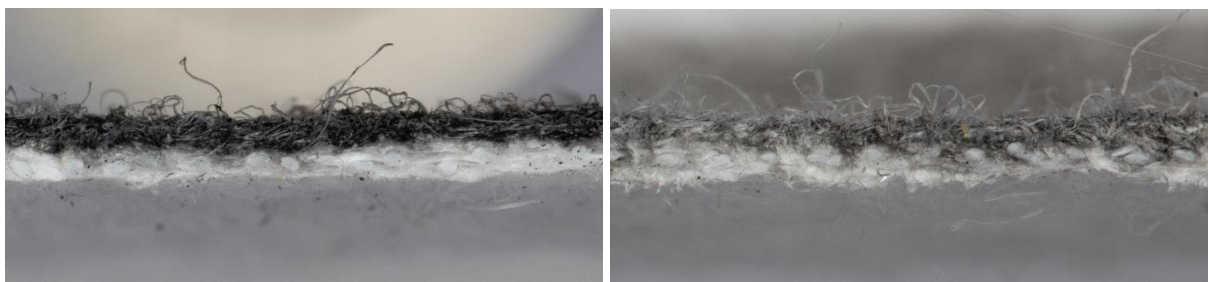


Abbildung 53: Vergleich Filterquerschnitt; links Anströmgeschwindigkeit 1.2 m/min, rechts 6 m/min



microvel® TF

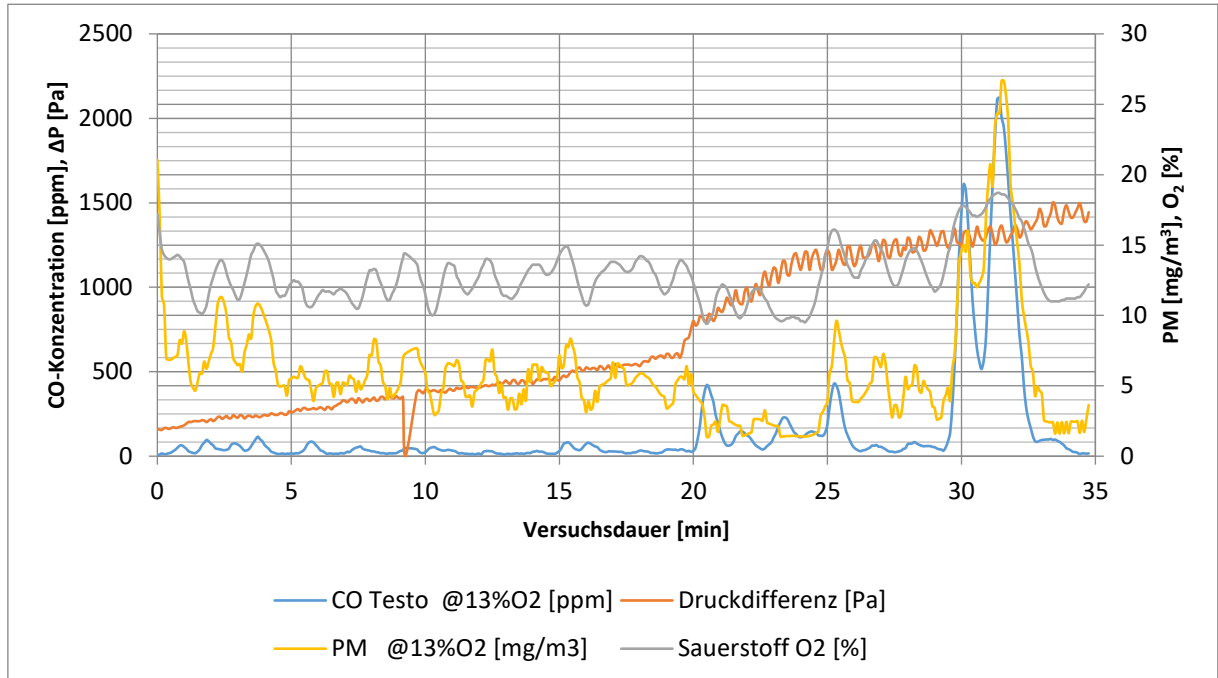


Abbildung 54: Messwerte des microvel® TF bei 6 m/min

Der Druckverlustverlauf deutet auf eine Abscheidung von Feinstaub hin. Die Feinstaubwerte in Kombination mit den niedrigen CO-Werten, im Bereich bis zu einem Druckverlust von 500 Pa, hingegen lassen keine Beurteilung des Abscheidegrads zu. Der weitere Verlauf von CO- und Feinstaubwerten hingegen kann nur schwer beurteilt werden aufgrund der vorhandenen Daten. Es ist jedoch sehr wahrscheinlich, dass es nach Minute 30 zu einem Durchschlag kam. Dies ist bei solch hohen Druckverlusten möglich. Eine Analyse des Querschnittes wie auch der Staubseite liefern allerdings keine eindeutigen Hinweise für diese Vermutung. Es ist jedoch erkennbar, dass der Feinstaub deutlich tiefer in das Material eingedrungen ist.

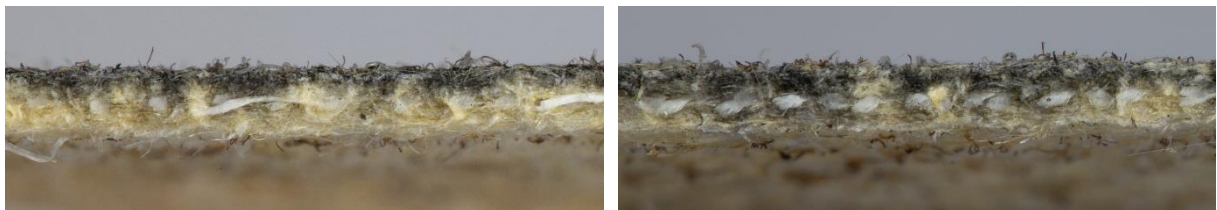


Abbildung 55: Vergleich Filterquerschnitt; links Anströmgeschwindigkeit 1.2 m/min, rechts 6 m/min

Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration microvel® TF	CO-Konzentration microvel® TF
22 mg/m ³ @ 13% O ₂	152 ppm @ 13% O ₂	6.3 mg/m ³ @ 13% O ₂	34 ppm @ 13% O ₂



microvel® PL

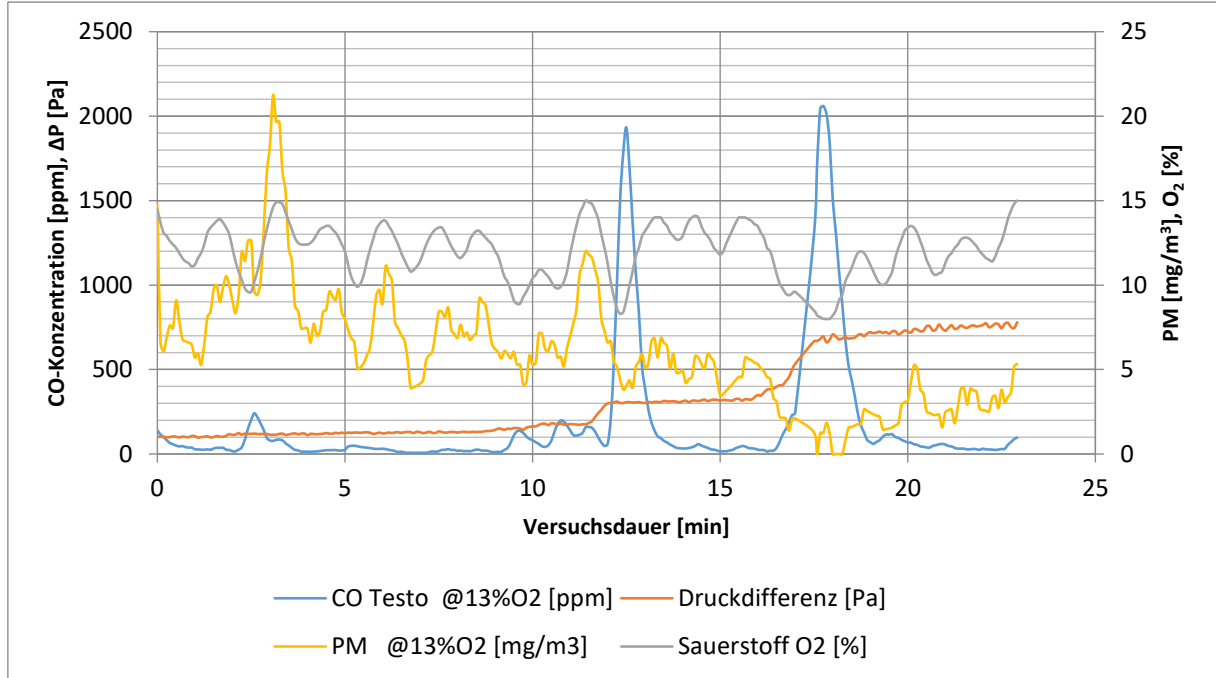


Abbildung 56: Messwerte des microvel® PL bei 6 m/min

Auch hier ist die Beurteilung des Abscheidegrades schwierig. Im Bereich bis 500 Pa ist allerdings ein Abwärtstrend in den Feinstaubwerten erkennbar und ein gleichzeitiger Druckanstieg. Dies spricht für eine Filterwirkung welche allerdings im der gemessenen Zeit eher auf Tiefenfiltration beruht wie auf Oberflächenfiltration. Der Querschnitt und die Staubseite des Filters unterstützen diese These. Der Feinstaub ist nicht so Tief in das Material eingedrungen, dass man von Lecks ausgehen muss. Er hat sich aber auch nicht nur an der Oberfläche angesammelt und es ist noch kein Ansatz eines Filterkuchens erkennbar. Dies obschon es sich – gemäss Hersteller- hierbei um einen Oberflächenfilter handelt.



Abbildung 57: links Querschnitt des Filters; rechts: Staubseite

Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration microvel® PL	CO-Konzentration microvel® PL
22 mg/m ³ @ 13% O ₂	152 ppm @ 13% O ₂	7.9 mg/m ³ @ 13% O ₂	118 ppm @ 13% O ₂



isoGLAS® Nadelvlies 500g/m²

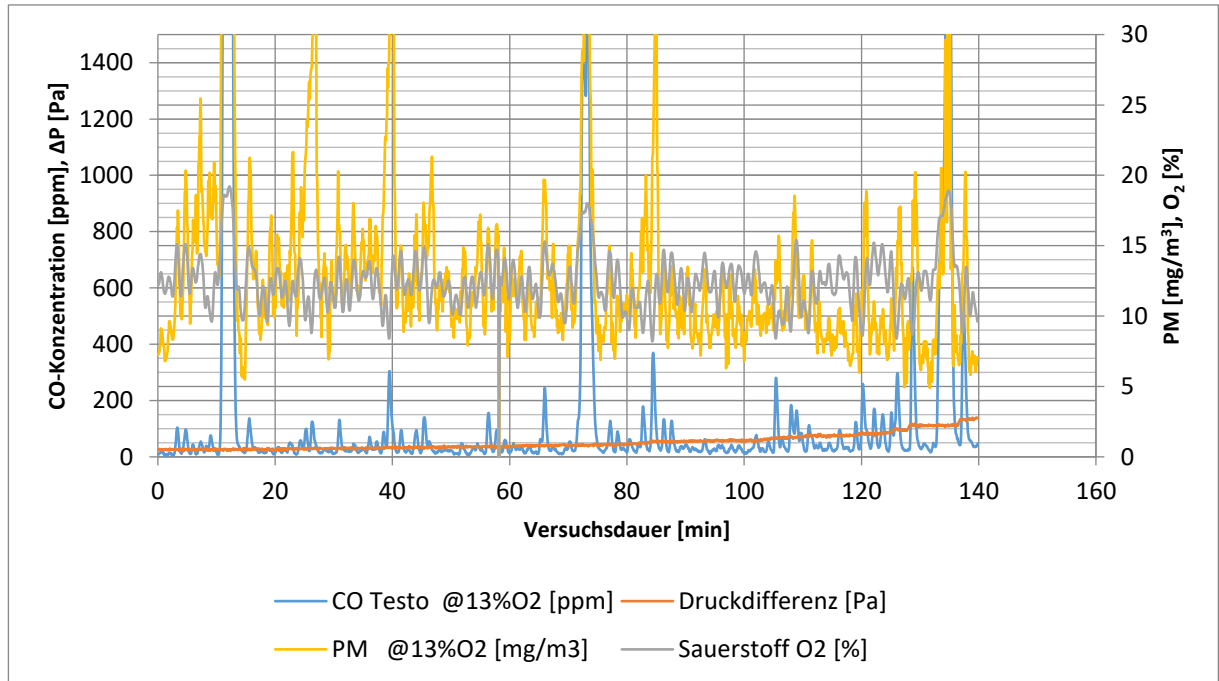


Abbildung 58: Messwerte des isoGlas® Nadelvlies 500 g/m² bei 6 m/min

Der Verlauf von Druckverlust und Staubkonzentration lassen eine Filterwirkung vermuten. Betrachtet man den Querschnitt des Materials kann unschwer erkannt werden, dass das Material auf dem gesamten Querschnitt mit Feinstaub gefüllt ist. Damit lässt sich mit Sicherheit auf einen Abscheidegrad >50% rückschliessen.



Abbildung 59: Querschnitt durch das isoGlas® Nadelvlies 500 g/m² nach einer Belastung mit 6 m/min

Es zeigt jedoch auch, dass das Material vom Feinstaub komplett durchdrungen wurde. Die Mittelwerte von Feinstaub- und CO-Konzentration lassen daruf schliessen, dass der Abscheidegrad kleiner 50% ist.

Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration isoGLAS®	CO-Konzentration isoGLAS®
22 mg/m ³ @ 13% O ₂	152 ppm @ 13% O ₂	13.7 mg/m ³ @ 13% O ₂	133 ppm @ 13% O ₂



isoGLAS® Nadelvlies 1000g/m²

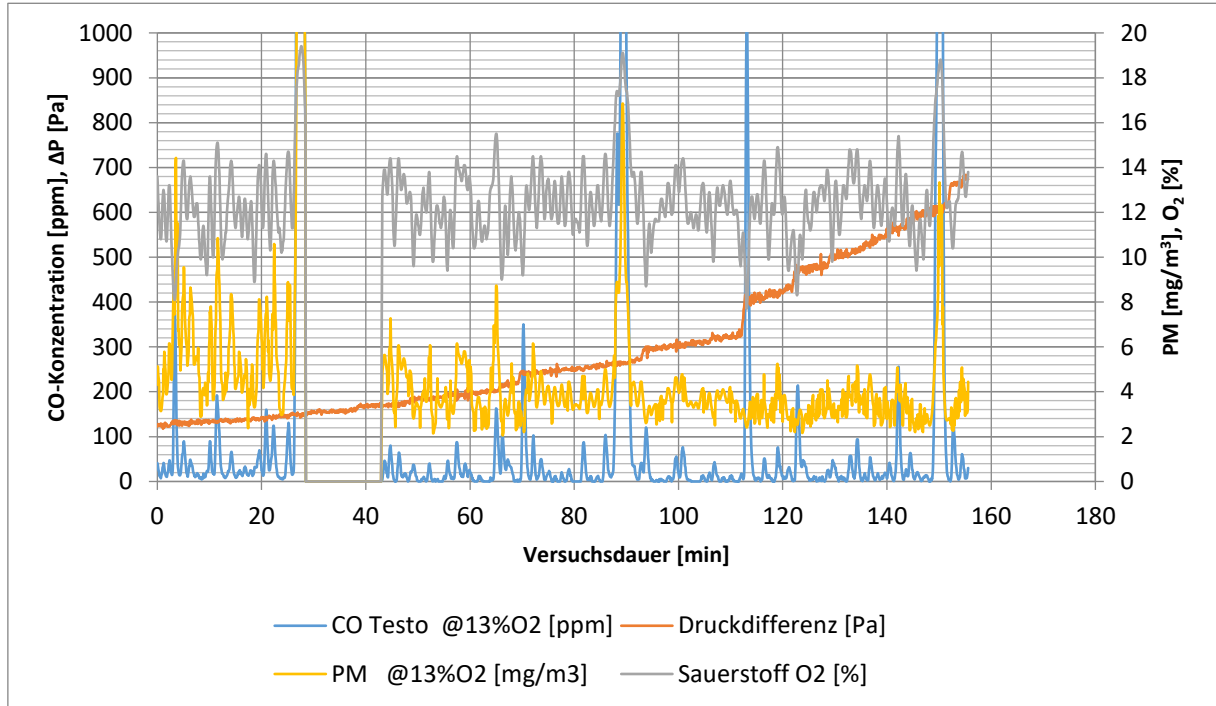


Abbildung 60: Messwerte isoGlas® Nadelvlies 1000 g/m² bei 6 m/min

Aus den Mittelwerten des Versuches wie auch aus dem Verlauf von Druckverlust- und Feinstaubwerten kann auf eine Abscheiderate grösser 50% geschlossen werden. Betrachtet man den Querschnitt, kann auch ausgeschlossen werden, dass die Peaks in den Feinstaubkonzentration als Lecks interpretiert werden müssen. Der Feinstaub dringt relativ tief in das Material ein. Es gibt allerdings keine Hinweise für ein Leck oder das Durchdringen von grossen Mengen an Feinstaub. Daher können die Peaks der Normierung auf 13% O₂ Gehalt zugeordnet werden und nicht einem Versagen des Filtermaterials.



Feinstaubkonzentration Baseline	CO-Konzentration Baseline	Feinstaubkonzentration isoGLAS® Nadelvlies	CO-Konzentration isoGLAS®
22 mg/m ³ @ 13% O ₂	152 ppm @ 13% O ₂	4.8 mg/m ³ @ 13% O ₂	109 ppm @ 13% O ₂



4.9 Regeneration

Alle Regenerationsverfahren, welche ohne eine Demontage des Filtermediums durchgeführt werden können, nutzen die Trägheit des Staubkuchens aus um eine Abscheidung dieses zu erreichen. Dabei gibt es zwei unterschiedliche Methoden. Zum einen wird auf der Reingasseite des Filters ein Überdruck durch umkehren der Strömungsrichtung oder entleeren eines Druckbehälter erzeugt. Was das Ablösen des Staubkuchens bewirken soll. Oder es wird durch das Aufbringen von Vibration ein Ablösen des Staubkuchens erwirkt.

Regenerationsverfahren welche eine Demontage des Filtermediums voraussetzen sind entweder ein Waschen oder ein Ausspülen. Bei letzterem ist es üblich auch Hochdruckreiniger einzusetzen. Diese Verfahren sind daher nicht direkt von der Trägheit des Staubkuchens abhängig. Sie erfordern aber entweder eine sehr hohe Festigkeit wie sie beispielsweise bei Metallfiltern anzutreffen ist (bei Hochdruckreinigung). Oder eine ausreichende Stabilität des Gewebes das es sich beim Waschen nicht verändert oder gar zersetzt. Hinzu kommt, dass das Auswaschen nur bei Wasserlöslichen Feinstaubpartikeln sinnvoll ist, da es sonst zum Verkleben des Feinstaubes am Filter kommen kann.

Nicht alle Bestandteile des Feinstaubes einer Holzfeuerung sind wasserlöslich. Keines der untersuchten Materialien besitzt eine ausreichende Festigkeit, dass eine Hochdruckreinigung denkbar wäre. Des Weiteren konnte bei keinem der untersuchten Materialien eine Messbare Gewichtszunahme festgestellt werden. Da die Abreinigung aber auf die Trägheit des Filterkuchens angewiesen ist, kann folglich kein Material durch die üblichen Verfahren regeneriert werden. Es muss dabei allerdings erwähnt werden, dass dies keine allgemeine Aussage zu den Materialien ist. Diese Aussage hat lediglich eine Gültigkeit für den Einsatz der Materialien bei einer Anströmgeschwindigkeit von 1.2 m/min respektive 6 m/min und einem Zulässigen Druckverlust von 200 Pa respektive 500 Pa.

Auf dieser Grundlage eine Beurteilung der Regeneration der Materialien zu erstellen ist wenig Zielführend. Was jedoch von Interesse ist, ist das Wissen darüber wie weit die gewählten Rahmenbedingungen angepasst werden müssten für einen potenziell regenerierbaren Filter zu erzeugen. Zu diesem Zweck wurden drei Materialien ausgewählt welche nochmals einem längeren Versuch unterzogen werden sollen.

- needlona®: Die durchgeführten Versuche zeigen gute Abscheidewerte und lassen auf eine gute Abreinigung schliessen.
- microvel® PL: hatte ebenfalls gute Abscheidewerte. Es wird vom Hersteller als gut regenerierbares Material beschrieben.
- isoGLAS® Nadelvlies 500g/m²: zum Vergleich soll ein Material mit Tiefenfiltration getestet werden.

Die Versuche wurden auf die gleiche Weise durchgeführt wie bereits die Versuche zur Staubabscheidung. Einziger Unterschied waren die Ofenparameter welche so eingestellt wurden, dass vom Ofen sehr hohe Feinstaubwerte erwartet werden können. Die Versuche wurden über jeweils 8 Betriebsstunden durchgeführt. Um dies zu erreichen wurde ein Druckverlust bis zu 800 Pa kompensiert.



Ein Vergleich der Mittelwerte von CO- und Feinstaubkonzentration über die gesamte Versuchszeit bestätigt die Resultate des vorhergehenden Kapitels. Die Abscheidung ist bei allen Materialien gut.

Materialbezeichnung	Feinstaubkonzentration nach dem Filter *	CO-Konzentration*
needlona®	4.8 mg/m ³ @ 13% O ₂	4217 ppm @ 13% O ₂
isoGLAS® Nadelvlies 500g/m ²	5.3 mg/m ³ @ 13% O ₂	1991 ppm @ 13% O ₂
microvel® PL	2.9 mg/m ³ @ 13% O ₂	2250 ppm @ 13% O ₂
Referenzmessung (vor dem Filter)	63.5 mg/m ³ @ 13% O ₂	724 ppm @ 13% O ₂

Tabelle 7: Messwerte der Regenerationsversuche

*Mittelwert über gesamte Versuchszeit

Auch mit hohem Abscheidegrad und starker Feinstaubbelastung im Rauchgas sind nach 8 Betriebsstunden nicht mehr als ca. 1.5 g Feinstaub auf dem verwendeten Filter zu erwarten.

Wird der Staubkuchen etwas genauer betrachtet so erkennt man, dass auf Grund des Aufbaus ein Abwurf durch einen Druckstoss oder mir anderen Methoden durchaus möglich erscheint.

Gut erkennbar ist, dass der Feinstaub nicht tief in das Material eingedrungen ist, sondern an der Oberfläche hängen blieb. Es hat sich eine deckende Schicht an Feinstaub über den ganzen Filter gebildet. Diese würde gegenüber einem Druckstoss einen guten Widerstand bilden und könnte dadurch theoretisch gut abgeschieden werden. In diesem Projekt ist der Druckstoss, aufgrund der Bauweise von Öfen und Kaminen in diesen Leistungsklassen, jedoch nicht die ideale Lösung. Daher wurde versucht mittels Rütteln am Filter, auf die Rückseite klopfen und mittels abstreifen die Filter zu reinigen.



Abbildung 62: Staubkuchen nach dem Abscheiden mittels Rüttler

Als Rüttler wurde ein Exzentrerschleifer verwendet, welcher auf die Rückseite der Filterhalterung gedrückt wurde. Die Problematik hier war die Übertragung der Vibration auf das flexible Filtermaterial bzw. auf den Staubkuchen.



Abbildung 61: links: Querschnitt durch das microve® PL; links: Staubseite mit deutlich erkennbarem Staubkuchen

Dementsprechend wenig konnte abgereinigt werden. Es haben sich lediglich einzelne Brocken aus dem Staubkuchen gelöst und sind abgefallen. Auf das Gesamtgewicht des Staubkuchens hat dies jedoch keinen messbaren Unterschied ergeben.



Zum Abklopfen wurde ein flexibler Massstab verwendet, mit welchem auf die saubere Seite geklopft wurde. Dies hatte stellenweise sehr gute Abreinigung zur Folge. Es blieben lediglich einzelne Brocken auf der Staubseite hängen. An den Stellen welche nicht direkt getroffen wurden blieb der Staubkuchen jedoch mehrheitlich in Takt. Es konnte damit ungefähr die Hälfte des Staubkuchens abgeworfen werden.

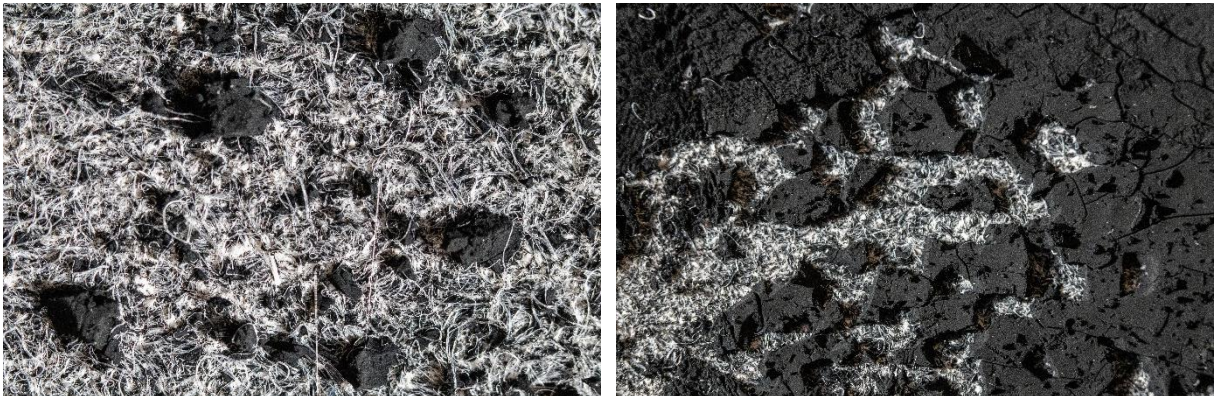


Abbildung 63: links: Staubkuchen direkt an der Stelle wo geklopft wurde; rechts: leicht neben der Klopfstelle

Hier besteht die grosse Schwierigkeit darin ein System zu entwickeln welches ausreichen stark klopft und dies über die ganze Fläche sehr gleichmässig. Dabei ist zu beachten, dass nicht zu stark geklopft werden darf, da dies eine Verkürzung der Lebensdauer des Filters zur Folge hätte.



Abbildung 64: Staubkuchen bzw. Staubseite nach dem Abstreifversuch

Versuche den Filterkuchen abzustreifen waren nur bedingt erfolgreich. Das Gewicht des Filters konnte dadurch reduziert werden. Die Oberfläche zeigt, dass der Staubkuchen zu einem grossen Teil abgeschieden wurde. Gleichzeitig ist erkennbar, dass der Staub durch das Abstreifen an das Material gedrückt und auf der Oberfläche verschmiert wird. Hinzu kommt, dass durch den Abstreifvorgang die oberste Schicht des Materials potenziell verletzt wird, was die Filterqualität vermindert.

Bei den untersuchten Materialien konnte ähnliche Ergebnisse erzeugt werden. Lediglich das isoGLAS® Nadelvlies 500g/m² konnte nur mit einer Druckluftpistole gereinigt werden. Bei diesem Material handelt es sich allerdings auch um einen klaren Tiefenfilter und diese lassen sich grundsätzlich nicht abreinigen. Die Abreinigung mittels Druckluftpistole führte zu einer starken Deformation des Materials. Daher ist von einem solchen Regenerationsverfahren in der Praxis abzusehen.



4.10 Filterkuchen als Filterndes Medium

Die länger andauernden Versuche zur Untersuchung der Regeneration zeigten, dass bei einer Anströmgeschwindigkeit von 1.2 m/min nach einer bestimmten Zeit der Druckverlustanstieg abnimmt. Der Druckverlust bleibt dann auf einem relativ konstanten Niveau welches bei allen getesteten Materialien zwischen 550-700Pa lag. Weshalb sich der Druckverlust auf diese Weise auf einem Niveau stabilisiert kann ist mit den erhobenen Messdaten nicht abschliessend zu erklären. Ein Zusammenhang mit dem Staubkuchen auf dem Filter ist jedoch sehr wahrscheinlich.

Während der Anfangsphase der Filtration erfolgt die Abscheidung bei Oberflächenfiltration zunächst im oberflächennahen Bereich des Filtermedium. Dabei spielt die Wechselwirkung zwischen den

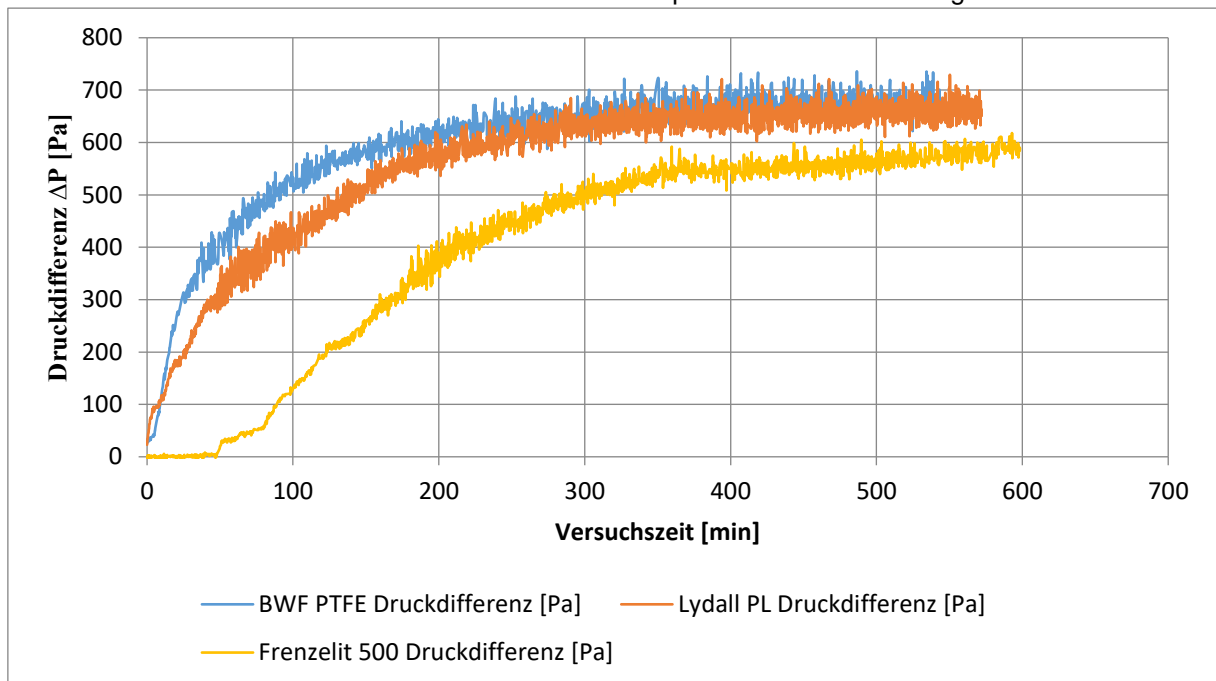


Abbildung 65: Vergleich der Druckdifferenzverläufe bei konstanter Anströmgeschwindigkeit (1.2 m/min)

Fasern des Mediums und des Feinstaubes eine entscheidende Rolle. Je mehr Staub im Material eingelagert ist desto stärker wird die Wechselwirkung der Staubpartikel untereinander. Es kommt zu Dendritenwachstum und Brückenbildung und die Abscheidung verlagert sich zunehmend an die Oberfläche des Filtermediums. Der sich dort bildende Staubkuchen ist bei weiterer Staubzugabe hauptsächlich für die Abscheidung verantwortlich. [2]



Die unterschiedliche Ausprägung des Staubkuchens in Abhängigkeit des Druckverlustes ist beispielhaft am Vergleich der Oberflächen des Materials needlona® bei einer Druckdifferenz von 300 Pa respektive 675 Pa erkennbar. Bei einer Druckdifferenz von 300Pa ist die Oberfläche des Filters noch nicht komplett mit einem Staubkuchen überzogen. Bei einer Druckdifferenz von 675 Pa hingegen ist die Oberfläche komplett mit einem Staubkuchen überzogen. Es ist daher naheliegend, dass dieser sowohl für die Abscheidung von weiterem Feinstaub hauptverantwortlich ist, wie auch für den Druckverlust des Systems Staubkuchen + Filtermedium.

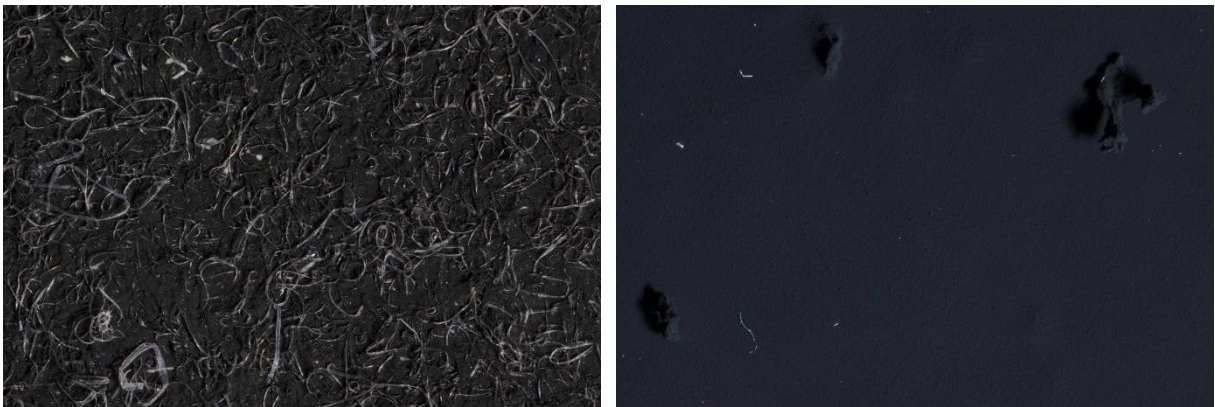


Abbildung 66: Vergleich Staubkuchen bei ΔP 300Pa (links) und ΔP 675 Pa (rechts)

Der Druckverlust eines Filtermediums kann im Allgemeinen wie folgt beschrieben werden:

$$\Delta P_F = \Delta L \cdot (1 - \varepsilon)^{1.5} \cdot [1 + 56 \cdot (1 - \varepsilon)^3] \cdot \frac{\eta \cdot v}{D_F^2}$$

Dabei ist

- ΔP_F Druckverlust des Filtermediums
- ΔL Dicke der filternden Schicht
- ε Schichtporosität (Porenvolumenanteil)
- η dynamische Gasviskosität
- v Filteranströmgeschwindigkeit
- D_F Faserdurchmesser

Der Faserdurchmesser wie auch die dynamische Gasviskosität sind materialspezifisch und können in diesem Fall als konstant betrachtet werden. Die Filteranströmgeschwindigkeit wurde bei den Versuchen konstant gehalten und soll für die weiteren Überlegung als konstant angenommen werden. Um einen Anstieg des Druckverlustes zu verursachen bleiben also nur noch die Schichtporosität und die Dicke der filternden Schicht übrig. Aufgrund der bisherigen Überlegungen kann davon ausgegangen werden, dass sobald sich ein Staubkuchen gebildet hat die Porosität des Grundmaterials durch die Zugabe von weiterem Staub nicht mehr verändert wird. Die Zugabe von weiterem Staub beeinflusst lediglich die Porosität des Staubkuchens und dessen Dimensionen. Somit ist der Druckverlust ab diesem Punkt nur noch vor der Entwicklung des Staubkuchens abhängig.



Eine theoretische Beschreibung des Druckverlustes eines Staubkuchens kann mit der Carman-Konzeny-Gleichung erfolgen.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\varepsilon^3 \cdot \Delta p \cdot A \cdot D_p^2}{(1 - \varepsilon)^2 \cdot \eta \cdot H \cdot K}$$

Dabei ist

Δp	Druckdifferenz über die Schüttung
H	Höhe der Schüttung (Staubkuchendicke)
ε	Schichtporosität
η	dynamische Gasviskosität
$\frac{dV}{dt}$	Volumenstrom durch die Schüttung
D_p	Partikeldurchmesser
K	Messtechnisch zu bestimmende Konstante
A	Anströmfläche bzw. Querschnitt der durchströmten Schüttung

Auch hier kann die Gasviskosität als Konstant betrachtet werden. Auch die Querschnittsfläche des Staubkuchens kann als Konstant betrachtet werden. Der Volumenstrom ist von der Querschnittsfläche und der Geschwindigkeit abhängig und kann für unseren Fall auch als Konstant betrachtet werden. Geht man von einer Normalverteilung des Partikeldurchmesser aus, bleiben für die Beschreibung der Druckverlustzunahme des Staubkuchens nur noch die Staubkuchendicke und dessen Porosität übrig. Nimmt man an, dass die durch den Staubkuchen abgeschiedenen Partikel die Porosität des Staubkuchens im gleichen Masse verringern wie sie die Dicke vergrößern, kann die Porosität des Staubkuchens als Konstant betrachtet werden. Somit wäre der Druckverlust nur noch von der Dickenzunahme des Staubkuchens abhängig.

Davon ausgehend könnte der Verlauf des Druckverlustes dadurch erklärt werden, dass der mittlere aerodynamische Durchmesser eines Feinstaubpartikels nur sehr klein ist und deswegen die Veränderung der Staubkuchendicke nur sehr langsam voranschreitet. Eine alternative Erklärung liefert Herr Harfmann der Firma Lydall Gutsche. Laut ihm wäre es möglich, dass sich Teile des Staubkuchens selbständig lösen und abfallen. Solange die abgeschiedene Menge an Feinstaub in etwa gleich der Abfallenden ist, würde der Druckverlust nicht weiter steigen.

Der Filterkuchen bei Oberflächenfiltern ist ein noch nicht vollumfänglich untersuchtes und beschriebenes System, wie auch die VDI-Publikation Filternde Abscheider Oberflächenfilter [2] erwähnt. Dies speziell in Situationen, in denen statt einem Normstaub eine wechselnde und nicht definierte Feinstaubzusammensetzung wie in Rauchgasen von Holzfeuerungen vorhanden ist. In solchen Situationen spielen gemäss der VDI-Publikation auf Erfahrung beruhende Erkenntnisse oftmals eine entscheidende Rolle.



4.11 Wirtschaftlichkeit und Grösse/Entwicklungspfad

Für die Abschätzung der Filtergrösse spielt die Standzeit, die Regenerierbarkeit wie auch der zulässige Druckverlust eine entscheidende Rolle. Die Regenerierbarkeit wird in einem ersten Schritt ausser Acht gelassen, da nur bei grösseren Druckverlusten überhaupt eine Regenerierbarkeit besteht. Hinzu kommt, dass die gängigen Regeneriermethoden bei kleinen Anlagen nur bedingt umsetzbar sind. Die Anströmgeschwindigkeit bei Oberflächenfilter liegt laut VDI 3677 typischerweise bei 0.7 – 2.5 m/min. Die Ergebnisse dieses Projektes zeigen auch, dass mit einer geringeren Anströmgeschwindigkeit bessere Ergebnisse erzielt werden können. Rechnen wir also mit einer Anströmgeschwindigkeit von 1.2 m/min weiter erhalten wir die folgenden Filtergrössen für die unterschiedlichen Leistungsgrössen:

Feuerungsleistung	Abgasvolumenstrom	Filterbreite	Filterlänge
10kW	25 m ³ /h	0.5 m	0.7 m
70kW	175 m ³ /h	0.5 m	4.9 m

In der Annahme, dass die Filterbox nicht viel grösser als 0.5 x 0.5 x 0.5m sein sollte wäre für den Filter, mit den im Projekt untersuchten Materialien, die folgende Ausführung denkbar:

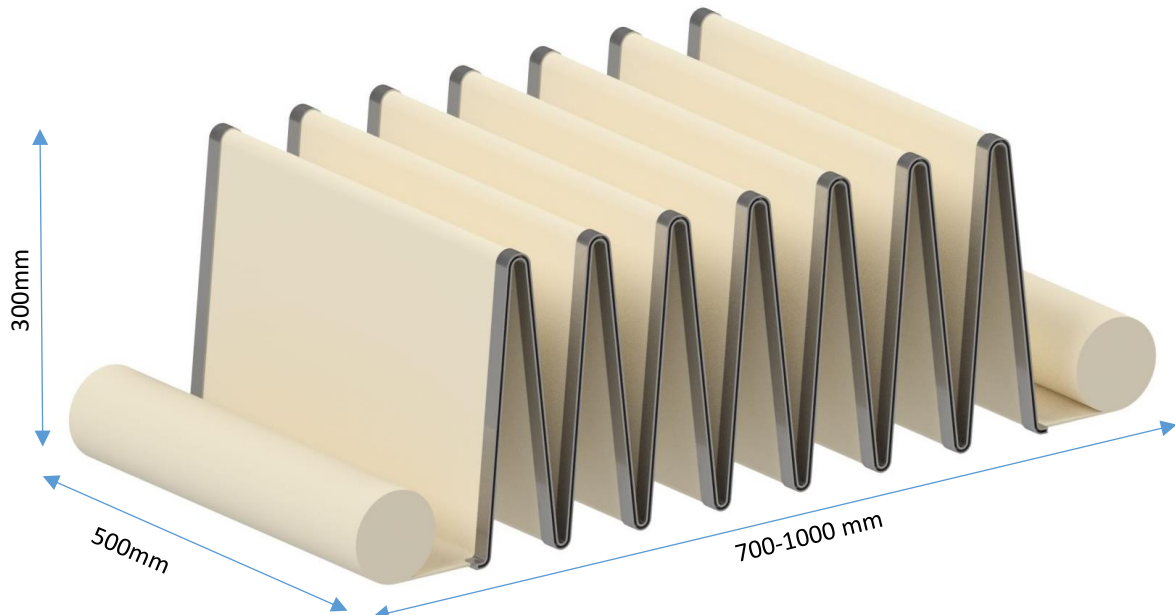


Abbildung 67: Konzept Filter für 70kW Feuerung

Mit der Anzahl an Falten können für 10-70kW Feuerungen Filter mit einer ausreichenden Grösse und Abmessungen von nicht mehr als 0.5 x 0.3 x 1m generiert werden. Auf der einen Seite wäre eine Rolle neues Filtermaterial und auf der anderen eine Rolle für das verschmutzte. Diese könnte beispielsweise vom Kaminfeger getauscht werden. Zu klären wäre wie lange die Filterbahn sein muss welche sich auf der Ersatzrolle befindet.



Nimmt man an, dass der zulässige Differenzdruck über die Filteranlage maximal 200Pa sein darf kann aus den erhobenen Daten eine Standzeit abgeschätzt werden. Bei diesen kleinen Druckverlusten muss zusätzlich davon ausgegangen werden, dass eine Regeneration nicht möglich ist. Die gesamte Staubmenge einer Heizperiode muss also vom Filter gespeichert werden können. Was dies für die gesamte Länge der Filterbahn bedeutet, ist für den besten Fall nachfolgend dargestellt.

Feuerungsleistung	Abgasvolumenstrom	Staubkonzentration	Dauer der Heizperiode	Filterlänge
10kW	25 m ³ /h	60 mg/m ³	¼ Jahr	≈ 600 m
70kW	175 m ³ /h	60 mg/m ³	¼ Jahr	≈ 800 m

Eine Rolle einer solchen Filterbahn hätte ca. 0.5m Durchmesser und ein Gewicht von über 100kg. Transport und Handhabung einer solchen Rolle sind nicht mehr einfach durch den Kaminfeger möglich. Auch Wirtschaftlich ist dies keine vertretbare Lösung, eine solche Rolle würde schätzungsweise 3000-10'000 CHF kosten. Dabei sind die Kosten für den Rest der Anlage noch nicht eingerechnet. Selbst wenn man von kleineren Staubkonzentrationen und kürzeren Heizperioden ausgeht erhält man keine sinnvollen Rollengrößen. Eine Einschränkung auf solch kleine Druckdifferenzen ist daher als nicht sinnvoll zu erachten.

Würde man als Beispiel den zulässigen Druckverlust auf 1000Pa anheben, könnte man von der starken Abflachung des Druckverlustanstieges profitieren. Dies würde bedeuten, dass die Filterlänge auf rund 30m Reduziert werden könnte. Ein Gebläse welches 1000Pa erzeugt ist aber weder leise noch günstig. Um einen hohen Druckverlust zu verhindern, wenn dieser effektiv durch den Staubkuchen verursacht ist, muss die Anströmgeschwindigkeit gesenkt werden. Dazu muss die aktive Filterfläche vergrößert werden. Dies bedeutet schlussendlich auch eine grössere Anlage. Wie weit die Anströmgeschwindigkeit gesenkt werden muss kann mit der Carman-Konzey-Beziehung ermittelt werden. Grob gesagt muss, wenn der Druckverlust auf ca. 300Pa gesenkt werden soll, auch die Anströmgeschwindigkeit halbiert werden. Will man ein halb so grosse Anströmgeschwindigkeit muss die Fläche wiederum verdoppelt werden. Dies wäre mit dem oben beschriebenen Konzept nur noch beding umsetzbar ohne die Abmessungen des Filterkastens zu vergrößern. Versucht man sich an einem anderen Konzept kommt schnell wieder die Filterkerze als mögliche Lösung. Da diese jedoch nicht kontinuierlich ausgetauscht werden kann, wird auch diese Option nicht als potenziellen Lösungsweg erachtet.

Es zeigt sich, dass der klar relevanteste Kostentreiber in einem Filtersystem das Filtermaterial ist. Die Kosten für die mechanischen und elektrischen Komponenten einer Filteranlage sind bei den genannten Randbedingungen von untergeordneter Bedeutung und können erst nach Erarbeitung eines detaillierten Pflichtenheftes erhoben werden.



5 Schlussfolgerungen und Fazit

5.1 Bewertungsmatrix

Eine für alle untersuchten Materialien einheitliche Bewertung und eine daraus abgeleitete Rangliste der am besten geeigneten Materialien wäre wünschenswert, kann aber nicht erstellt werden. Die Vielzahl an untersuchten Parametern und unterschiedlichen Eigenschaften der untersuchten Filtermedien lassen keine logische und Produkte- und einsatzzweckunabhängige Einordnung zu. Insbesondere weil eine isolierte vergleichende Betrachtung der untersuchten Parameter nicht zulässig ist, da für die Erklärung der Messergebnisse mehrere unterschiedliche Einflussfaktoren zu berücksichtigen sind. Im Folgenden wird versucht, dennoch eine Einteilung auf Grund der Parameter «Materialbeschaffenheit» und «Abscheidegrad» vorzunehmen.

Aus den vorhergehenden Kapiteln dargestellten Ergebnissen lassen sich, für kleine Feuerungsleistungen (10-70kW), die folgenden Beurteilungs- und Auslegefaktoren für Filtermaterialien definieren:

- Materialbeschaffenheit
unter diesem Aspekt werden die Kriterien Temperaturbeständigkeit, Webdichte, Faserdichte, Stabilität und Brennbarkeit. Die Materialien werden in drei Kategorien unterteilt:

Klassifizierung

1	5	10
unbrauchbar	mit Modifikationen einsetzbar	ohne Modifikationen einsetzbar (eignet sich sehr gut)

- Abscheidegrad
Mit diesem Faktor wird unabhängig vom Einsatz eine Einteilung in besser abscheidende und schlechte abscheidende Materialien angegeben.

Klassifizierung

1	5	10
keine Abscheidung	ausreichend Abscheidung	kein Feinstaub im Reingas

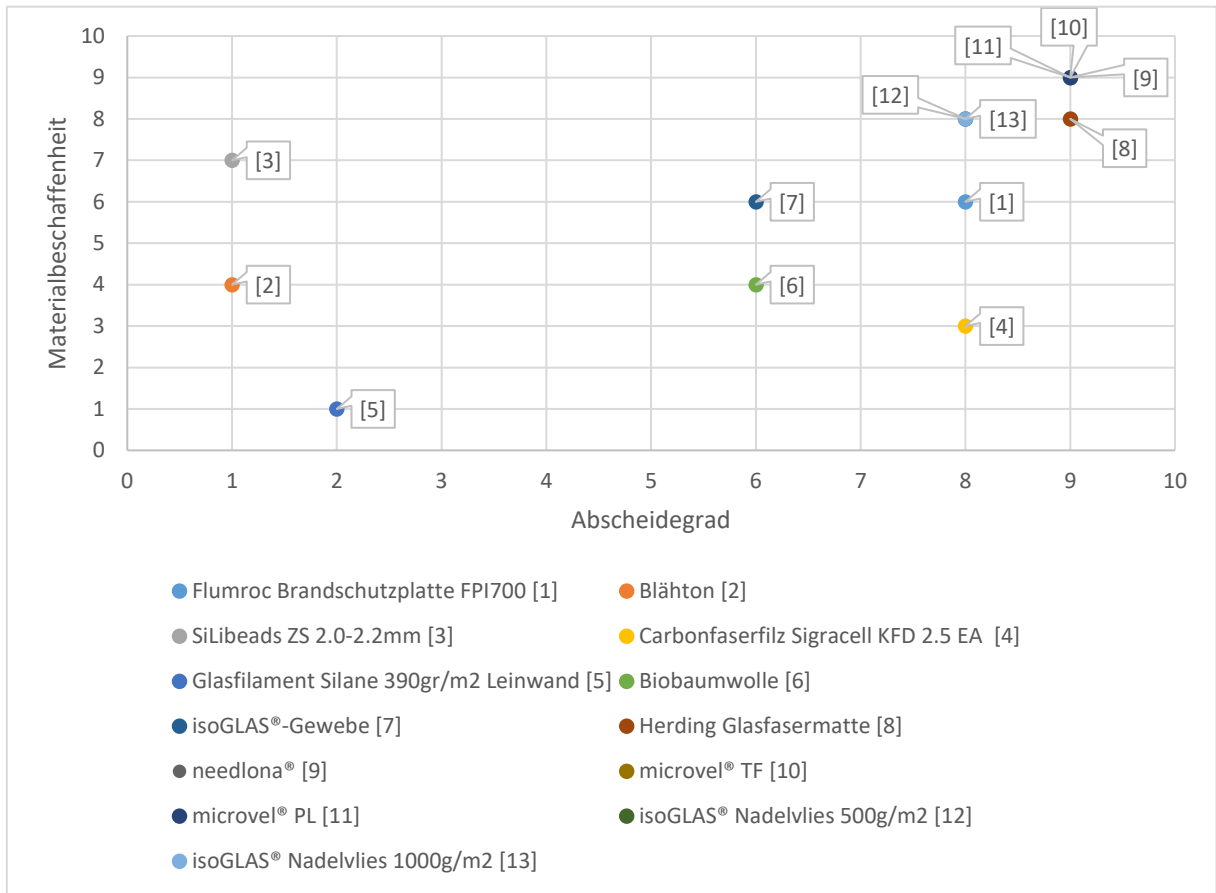


Abbildung 68: Auswahlmatrix der untersuchten Materialien



5.2 Schlussfolgerungen

Aus den durchgeführten Untersuchungen können die folgenden Erkenntnisse gewonnen werden und Schlussfolgerungen gemacht werden:

- Gewebefilter haben durchaus einen Abscheidegrad grösser 50%. Sie sind aber weder von der Regenerierbarkeit noch von Betriebssicherheit her empfehlenswert. Die möglichen Lecks, verursacht durch ungleichmässige Webung oder nicht ausreichend dichter Webung können mit den erhobenen Daten nicht beurteilt werden. Ausserdem spielt diese Art von Filter in der Praxis nur noch eine Untergeordnete Rolle.
- Die untersuchten Vlies und Nadelfilz-Materialien haben bei einer Anströmgeschwindigkeit von 1.2m/min alle einen guten Abscheidegrad. Bei 6 m/min nimmt der Abscheidegrad ab, sie bleibt aber bei den meisten bei mehr als 50%. Allerdings nehmen Phänomene wie Durchschläge und rapide Druckanstiege zu. Aufgrund derer von einem Einsatz bei 6 m/min abzuraten ist.
- Vom Einsatz der untersuchten Filtermedien bei einer Anströmgeschwindigkeit von 6 m/min ist dringen abzuraten. Druckverlust, Staubspeichervermögen und Abscheidegrad verschlechtern sich deutlich. Lediglich die Grösse der Filteranlage könnte damit reduziert werden.
- Die Abscheidung durch den Staubkuchen weist darauf hin, dass eine Abscheidung mittels einer Schüttung grundsätzlich funktionieren sollte. Die untersuchten Schüttgutfilter konnten dies jedoch nicht bestätigen. Weshalb diese nicht funktionieren kann mit den erhobenen Daten nicht abschliessend beurteilt werden. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Porosität der Filter zu gross war.
- Die mechanische Stabilität ist gerade bei Filtermaterialien sehr gut. Bei Materialien welche nicht grundsätzlich als Filter gedacht sind ist diese teilweise Mangelhaft. Dies könnte jedoch bei den meisten durch Kombination mit anderen Materialien noch deutlich gesteigert werden.
- Die Temperaturbeständigkeit der meisten Materialien ist gemäss den aktuellen Normen ungenügend. Geht man davon aus, dass sich die Norm dahin gehend verändern wird, dass nur die Brandsicherheit relevant ist und nicht der Abscheidegrad nach einen Brandereignis ist die Temperaturbeständigkeit bis auf das Baumwollmaterial bei allen ausreichend für den Einsatz als Feinstaubfilter in Kaminen.
- Mit Ausnahme des Baumwollstoffes sind die Materialien nicht brennbar.
- Die Anströmgeschwindigkeit ist nach Möglichkeit so tief wie möglich zu halten. Durch eine tiefe Anströmgeschwindigkeit wird die Abscheidung verbessert und der Druckverlust tief gehalten. Auch ist ein Filter welcher bei kleinerer Anströmgeschwindigkeit betrieben wird tendenziell besser regenerierbar. Dies ist steht immer im Konflikt mit der Anforderung nach einem möglichst kleinen Filter.
- Der zulässige Druckdifferenz über den Filter, sollte nicht wie bisher Aufgrund der elektrischen Leistung eines elektrostatischen Filters, sondern aufgrund der optimalen Betriebsbedingungen für den entsprechenden Filter gewählt werden. Dabei ist der Zusammenhang von Staubkuchen und Anströmgeschwindigkeit noch genauer zu untersuchen.
- In der Praxis hat sich die Abreinigung mittels des Pulse-Jet-Verfahrens weitgehend als Standard durchgesetzt. [7] Dieses Beruht auf einem Druckluftstoss welcher den Staubkuchen abwirft. Ein solches Verfahren ist bei kleinen zulässigen Druckverlusten nicht denkbar da der Staubkuchen nicht ausreichend gross ist. Hinzu kommt, dass ein solches Verfahren einen hohen Energiebedarf hat und bei offenen Feuerungen technisch nur sehr bedingt umsetzbar ist. Im Bereich der



Regeneration besteht ein grosser Forschungsbedarf bei der Erforschung weniger energieintensiver Regenerationsverfahren.

- Die durchgeführten Untersuchungen in Bezug auf die Regeneration zeigen, dass eine Regeneration mit alternativen Methoden zum Druckluftverfahren funktionieren. Die Umsetzung dieser und die dadurch erreichbaren Standzeiten müssen aber noch genauer untersucht werden.
- Das nachrüsten einer Anlage welche hohe Differenzdrücke erzeugt bzw. benötigt, ist bei den aktuellen Kaminen sehr anspruchsvoll. Der hohe Unterdruck bzw. Überdruck dürfte nur im Bereich der Filteranlage bestehen und diese müsste auf den entsprechenden Druck zertifiziert werden. Hinzu kommen die Lärmemissionen eines solchen Gebläses und der Energiebedarf.
- Der Druckverlust von Oberflächenfiltern ist weniger vom Material sondern viel mehr vom Staubkuchen abhängig. Dieser wiederum ist stark von der Art des Staubes und der Grössenverteilung der Staubpartikel abhängig.

5.3 Fazit

Einen Filter zu bauen der auf Basis der untersuchten Materialien und in den definierten Einsatzbereichen in den Punkten Druckverlust, Energieverbrauch, Bauvolumen, Anschaffungskosten sowie Betriebskosten und Filterwirkung mit einem elektrostatischen Filter vergleichbar ist, ist nicht realisierbar. Es ist aber aufgrund der Erkenntnisse denkbar, dass ein Filter entwickelt werden könnte, welcher in einem Teil der genannten Aspekte durchaus konkurrenzfähig oder gar besser wäre. So könnte zum Beispiel eine Filteranlage entwickelt werden, welche enorm gute und sehr zuverlässige Abgaswerte erreicht, welche so nicht von elektrostatischen Filteranlagen erreicht werden können. Auch wäre es möglich, dass die Gesamtbetriebskosten massiv reduziert werden, wenn auf eine Kaminreinigung nach dem Filter verzichtet werden kann.



6 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben sind für die Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse in einem markttauglichen Produkt noch weitere Fragen zu beantworten. Dabei sind gewisse Erkenntnisse weiterzuerfolgen aber auch neue Wege zu erforschen um den elektrostatischen Filtern ebenbürtig zu werden. Es ist aber auch denkbar, dass die Techniken des elektrostatischen Filters und der Filtration durch Filtermatten etc. verknüpft werden für optimale Ergebnisse.

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass der Staubkuchen und der dadurch erzeugte Abscheidegrad wie auch der Druckverlust einen wesentlichen Einfluss auf die Filtergrösse, Betriebskosten etc. hat. Gemäss der Carman-Kozeny-Beziehung bleibt für den Fall eines Feinstaubkuchens zwei mögliche Einflussgrössen auf den Druckverlust. Einerseits kann der Druckverlust reduziert werden indem die Anströmgeschwindigkeit bzw. die Filterflächenbelastung gesenkt wird. Andererseits kann versucht werden die Porosität des Staubkuchens zu beeinflussen. Wie dies gemacht wird und welchen Effekt dies auf den Druckverlust und den Abscheidegrad hat muss noch genauer untersucht werden.

Nebst dem Zusammenhang von Staubkuchen und Druckverlust wäre auch die Entstehung des Staubkuchens zu untersuchen. Dabei wäre es interessant alternative Möglichkeiten zur Erzeugung des Staubkuchens zu suchen. Beispielsweise ob ein Staubkuchen auch durch den Einsatz von Elektrostatik erzeugt werden kann und wie viel Stützstruktur (bisher durch Vlies etc. gegeben) ein solcher Staubkuchen benötigt.

Wenn der Druckverlust und die Bildung des Staubkuchens klar sind bleibt noch die Frage der Regeneration des Filterelements. Auch hier drängt sich die Frage auf ob dies durch elektrostatische Kräfte machbar wäre. In der Elektroindustrie wird bereits heute mit elektrostatischen Saugern Staub von den Bauteilen entfernt. Inwiefern dies auch bei Filtermedien angewandt werden könnte müsste noch geklärt werden.

Sind die zuvor beschriebenen Punkte untersucht, sollte das Konzept des Filters für kleine Feuerungen überdacht werden. Auf Basis des neuen Konzeptes muss eine Strategie zur Entwicklung einer Filteranlage festgelegt werden.



7 Literaturverzeichnis

- [1] HS-Luftfilterbau GmbH, „Grundlagen Filtertechnik,“ Luftfilterbau GmbH, Kiel, Deutschland, 2019.
- [2] Verein Deutscher Ingenieure, „Filternde Abscheider Oberflächenfilter VDI 3677,“ Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf, 2010.
- [3] Verein Deutscher Ingenieure, „Filternde Abscheider Heißgasfiltration VDI 3677,“ Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf, 2012.
- [4] Verein Deutscher Ingenieure, „Filternde Abscheider Tiefenfilter aus Fasern VDI 3677,“ Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf, 2004.
- [5] H. H. H. H. Martin Kaltschmitt, Energie aus Biomasse, Berlin Heidelberg: Springer, 2016.
- [6] M. S. Dr. Alexander Hakenjos, „Feinstaubfilter für kleine Holzfeuerungen,“ Langenbruck, 2018.
- [7] L.-P. Nethe, „Der Einfluss der Qualität der Oberflächenfiltration auf den wirtschaftlichen Betrieb einer Filteranlage für die trockene Rauchgasreinigung,“ Texocon GmbH, Potsdam.