



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

Diplomarbeit

**Untersuchungen zum Betriebsverhalten  
von abreinigbaren textilen  
Staubfiltermedien in Abhängigkeit von  
der Trägertemperatur**

ausgeführt am

Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und

Technische Biowissenschaften

der

Technischen Universität Wien

unter der Leitung von

Gerd MAUSCHITZ

und

Thomas LAMINGER

durch

**Benjamin Piribauer**

Matr. Nr.: 1027264

Schwelloedgasse 2a

3340 Waidhofen an der Ybbs

Juli 2017

**Kurzfassung**

Während sich Prüf- und Vergleichsmessungen von abreinigbaren textilen Staubfiltermedien bei Raumtemperatur durchgeführt werden, kommt es im industriellen Einsatz oft zu Problemstellungen bei höheren Temperaturen. Dabei ist ein Temperaturbereich bis ca. 200°C von Interesse.

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Filtermittelprüfstand gemäß VDI 3926 [2004] aufgebaut, welcher mit der Möglichkeit für den Betrieb bis 200°C erweitert wurde.

Nach Aufbau und Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Filtermittelprüfstandes wurde ein textiles Filtermittel bei Raumtemperatur nach VDI 3926 [2004] Prüfprozedur getestet.

Es wurden Vergleichsmessungen bei höheren Temperaturen durchgeführt, um das Heizsystem zu testen, und erste Erkenntnisse über das Alterungsverhalten des Filtermediums bei höheren Temperaturen zu erhalten.

Die so erhaltenen zeitlichen Verläufe der Druckverluste wurden mit einem Modell einer idealen Oberflächenfiltration ausgewertet und es wurde festgestellt, dass die so erhaltenen Filtermittelwiderstände bei unterschiedlichen Temperaturen bis 200°C annähernd gleich sind.

Es wurde dadurch festgestellt, dass die Modellgleichung mit bei Raumtemperatur ermittelten Filtermittelwiderständen gute Abschätzungen für den Druckverlust im Bereich der Kuchenfiltration, auch bei höheren Temperaturen, liefern kann.

**Abstract**

While most test and comparing measurements on the topic of dust filtration discuss the process at room temperature, many industrial filtration problems involve higher temperatures.

In the course of this work, a test rug for dust filtration was built according to VDI 3926 [2004] in addition the possibility to operate it at higher temperatures was added.

Subsequent, the function of the test rug was checked and a filtermedia was successfully tested with the VDI 3926 [2004] test scheme.

First comparing measurements at higher temperatures were made, to check the functionality of the heating system and to get first insights in the temperature behavior of the filtration process.

The resulting pressure drop curves of these experiments were compared to a model equation for ideal surface filtration, and it was determined that the filtermedia resistance of all the data at different temperatures was very similar.

It was determined that the model equation can deliver good estimates for the pressure drop in the cake filtration domain at higher temperatures with the filtermedia resistances determined at lower temperatures.

**Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Prof. Gerd Mauschwitz und Dr. Thomas Laminger, die meine Masterarbeit betreut und begutachtet haben. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Kollegen Johannes Niedermayer bedanken, der mir mit viel Geduld, Interesse und Hilfsbereitschaft zur Seite gestanden ist. Bedanken möchte ich mich für die zahlreichen interessanten Debatten und Ideen, die maßgeblich dazu beigetragen haben, dass diese Masterarbeit in dieser Form vorliegt.

Meinen Freunden Alexander Kirnbauer, Bernhard Girsule und Valerie Schrayvogel danke ich besonders für den starken emotionalen Rückhalt über die Dauer meines gesamten Studiums.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern Franz und Eva Piribauer bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben und stets ein offenes Ohr für meine Sorgen hatten.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Zielsetzung</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Grundlagen der Staubabscheidung</b>	<b>8</b>
3.1	Grundbegriffe . . . . .	8
3.2	Abscheidemechanismen . . . . .	9
3.2.1	Trägheitseffekt . . . . .	10
3.2.2	Sperreffekt . . . . .	10
3.2.3	Elektrodiffusiver Effekt . . . . .	10
3.2.4	Molekulardiffusiver Effekt . . . . .	11
3.2.5	Überlagerung der Abscheidemechanismen . . . . .	12
3.3	Grundlagen der Staub-Filtration . . . . .	14
3.3.1	Abreinigungsfiltration . . . . .	15
3.3.2	Mechanismen bei der Abreinigungsfiltration . . . . .	16
3.3.3	Filtergleichung . . . . .	17
3.3.4	Filtration bei höheren Temperaturen . . . . .	19
3.4	Alterung von Filtermitteln . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Versuchsaufbau</b>	<b>23</b>
4.1	Übersicht . . . . .	23
4.2	Anlagenteile . . . . .	25
4.2.1	Roh- und Rein-Gasraum . . . . .	25
4.2.2	Heizsystem . . . . .	27
4.2.3	Filtermittelhalter . . . . .	29
4.2.4	Staubdosierer . . . . .	30
4.2.5	Druckluftabreinigung . . . . .	30
4.2.6	Absolutfilter . . . . .	32
4.2.7	Gaskühler . . . . .	32
4.2.8	Pumpe . . . . .	33
4.3	Messung und Steuerung . . . . .	35
4.3.1	Software . . . . .	35
4.3.2	Messkarte . . . . .	35
4.3.3	Volumenstromregelung . . . . .	36
4.3.4	Differenzdruckaufnehmer . . . . .	36
4.3.5	Temperaturmessung . . . . .	38
4.3.6	Steuerung der Abreinigung des Filtermittelprüfstandes . . . . .	39

4.4	Teststaub und Filtermittel . . . . .	41
4.4.1	Pural NF . . . . .	41
4.4.2	Filtermittel . . . . .	42
4.5	Kalibrierung und Anfahrverhalten . . . . .	43
4.5.1	Kalibrierung des Staubdosierers . . . . .	43
4.5.2	Temperaturentwicklung beim Anfahren des Prüfstandes . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Alterungsversuch bei Raumtemperatur</b>	<b>47</b>
5.1	Versuchsdurchführung . . . . .	47
5.2	Auswertung und Darstellung der Ergebnisse . . . . .	50
5.2.1	Zyklen vor der Alterung . . . . .	50
5.2.2	Alterung des Filtermittels . . . . .	52
5.2.3	Zyklen nach der Alterung . . . . .	53
<b>6</b>	<b>Auswirkung der Trägertemperatur auf die Alterung von abrei-</b>	
	<b>nigbaren textilen Filtermitteln</b>	<b>55</b>
6.1	Filtermittelalterung bei erhöhter Trägertemperatur und konstan-	
	ten Trägertgasmassenstrom . . . . .	55
6.2	Filtermittelalterung bei erhöhter Trägertemperatur und konstan-	
	ten Volumenstrom . . . . .	59
6.3	Einfluss des Volumenstromes auf die Temperatur im Rohgaskanal so-	
	wie auf den Filterkuchenwiderstand . . . . .	62
<b>7</b>	<b>Ausblick</b>	<b>63</b>
7.1	Volumenstromregelung und Massenströmeinstellung . . . . .	63
7.2	Bypass Volumenstrom . . . . .	64
7.3	Quality Of Life Changes . . . . .	64
7.4	Potential für zukünftige Forschung . . . . .	65
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>67</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>68</b>
	<b>List of Figures</b>	<b>71</b>
	<b>List of Tables</b>	<b>74</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

In der industriellen Fertigung und in der Verbrennungstechnik kommt es oft zur Freisetzung von großen Staubmengen. Dieser Staub kann für die Umwelt und den Menschen gefährlich werden, wenn er nicht abgeschieden wird. Vor allem im Energiebereich kommt es zur Emission von partikelgebundenen Schwermetallen an die Umwelt. [Umweltbundesamt Deutschland]

Die Korngröße des Staubes ist eine wichtige Kenngröße zur Bewertung der Gefährlichkeit eines Staubes. In Abbildung 1.1 sind die typischen Korngrößen diverser Stäube zu sehen.

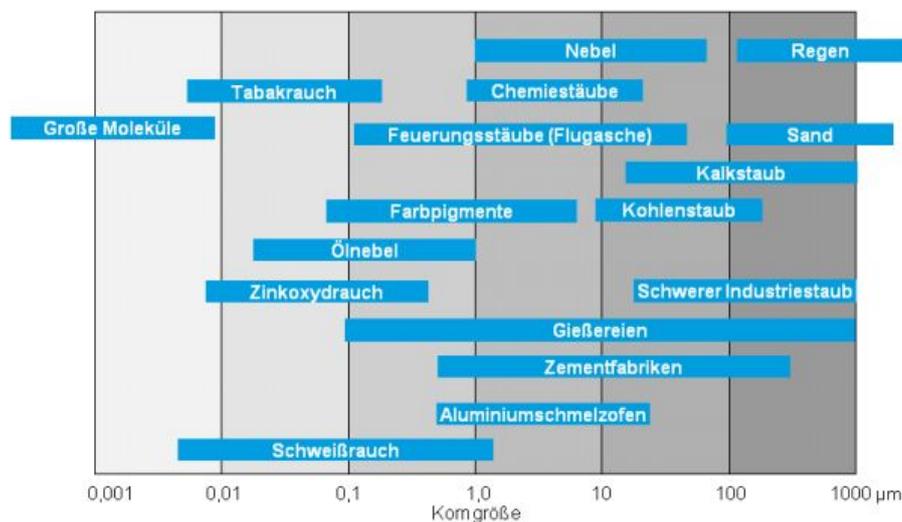


Abbildung 1.1: Korngrößenbereiche verschiedener industrieller und natürlicher Stäube [Intensiv - Filter]

Beim Feinstaub handelt es sich um den Anteil des Staubes mit Partikeldurchmessern von kleiner  $10 \mu m$ .

Er wird mit den Staubfraktionen  $PM_{10}$  und  $PM_{2,5}$  beschrieben. Die Fraktionen  $PM_x$  werden in DIN EN 12341 [2014] folgendermaßen definiert:

*Schwebstaub in der Luft, der einen gröÙenselektiven Lufteinlass passiert, der bei einem aerodynamischen Durchmesser von  $x \mu\text{m}$  eine Abscheidewirksamkeit von 50% aufweist.*

Feinstaub ist für den Menschen besonders gefährlich, da er, wie in Abbildung 1.2 zu sehen ist, bei Partikelgrößen kleiner als  $10 \mu\text{m}$  nur ungenügend im Nasen-Rachen-Raum abgeschieden wird, sondern bis in die Lunge gelangt.

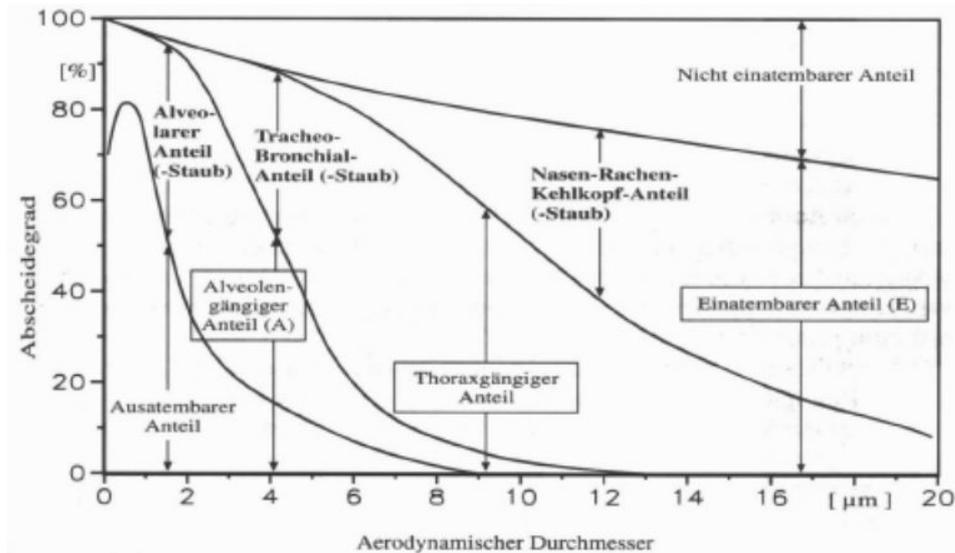


Abbildung 1.2: Abscheidegrade von Feinstaub im menschlichen Körper [Greil, 2006]

Während im Nasen-Rachen-Raum der abgeschiedene Staub durch die natürlichen Schleimbildung schnell wieder entfernt wird, kann Staub, der bis in die Lungenbläschen (Alveolen) vordringt, nur sehr langsam oder gar nicht mehr entfernt werden.

Laut Umweltbundesamt [Umweltbundesamt Österreich, b] steht Feinstaub im Zusammenhang mit signifikanten Verminderungen in der Lebenserwartung und kann zu Herz-Kreislauf-Erkrankungen führen.

In Österreich sinken die Emissionen von Feinstaub seit 1990 kontinuierlich ab. [Umweltbundesamt Österreich, a] Wie in Abbildung 1.3 zu sehen ist, bildeten Industrie, Energieversorgung und Heizanlagen von Kleinverbrauchern knapp 2/3 der jährlichen Feinstaubemissionen im Jahr 2014.

Um diesen Emissionstrend erfolgreich fortzusetzen, ist der Einsatz von Abscheidern, die in der Lage sind Feinstaub gut abzuscheiden, unumgänglich.

In Abbildung 1.4 sind die Abscheidegrade typischer industriell eingesetzter Staubabscheider dargestellt.

Während Zentrifugalkraft-Abscheider zwar hohe Durchsätze bewältigen können, sind sie zum Abscheiden von Feinstaub wenig geeignet. Sie kommen bestenfalls zur Vor-

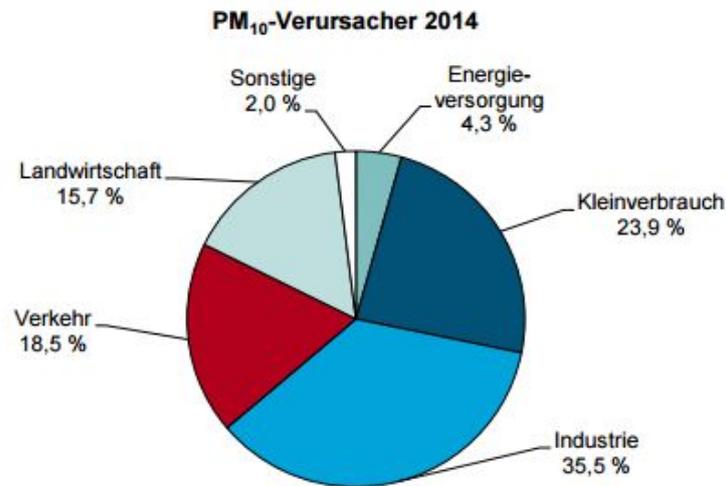


Abbildung 1.3:  $PM_{10}$  Emissionsquellen in Österreich [Umweltbundesamt Österreich, a]

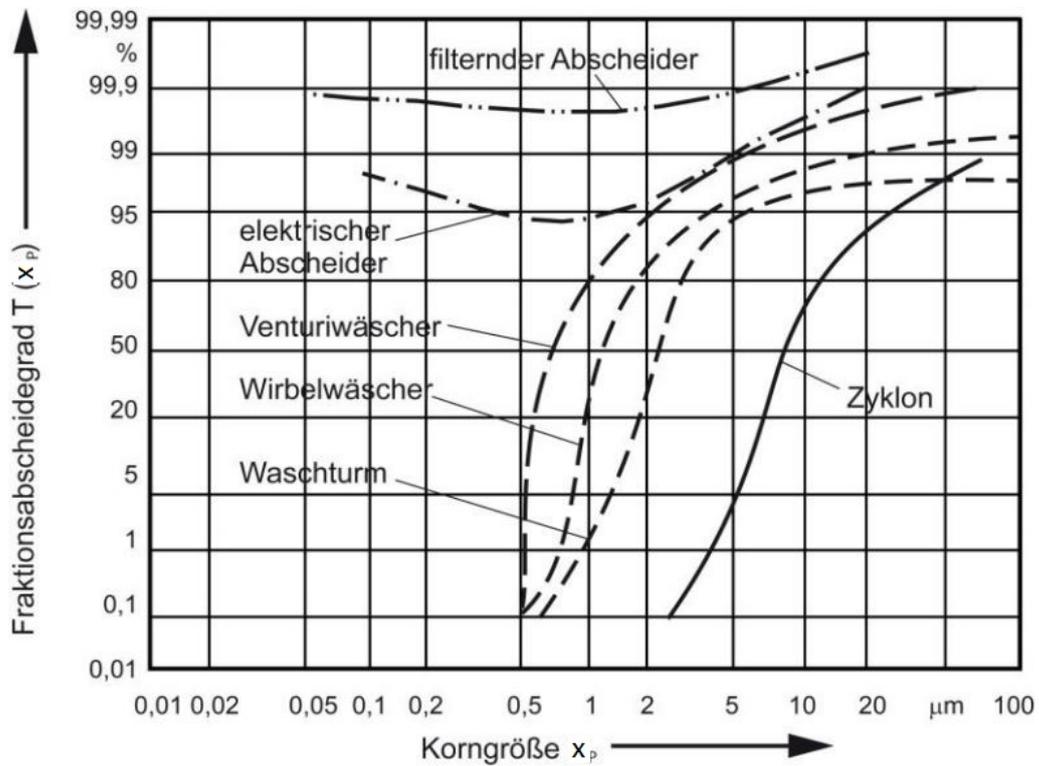


Abbildung 1.4: Fraktionsabscheidegrade verschiedener Staubabscheider im Vergleich [Intensiv - Filter]

abscheidung gröberer Staubfraktionen zum Einsatz.

Elektrische Abscheider weisen einen geringeren Abscheidegrad im Bereich der  $PM_{2,5}$  Emissionen auf und sind dadurch auch nur begrenzt in diesem Bereich einsetzbar.

Filternde Abscheider haben über das komplette Partikelgrößen-Spektrum einen sehr guten Abscheidegrad, kommen mit höheren Staubkonzentrationen zurecht als elektrische Abscheider und können auch im Gasdurchsatz ähnliche Werte wie andere Abscheider erzielen.

Somit eignen sich filternde Abscheider ausgezeichnet zur Abscheidung von Feinstaub und haben deshalb auch einen ständig steigender Marktanteil am Entstaubungsmarkt.

Zu filternden Abscheidern existieren bereits einige Normen, wie zum Beispiel DIN EN 779 [2012] zur Klassifizierung von Filtern. Zur Überprüfung des Langzeit Betriebsverhaltens von abreinigbaren Filtermitteln gibt es DIN ISO 11057 [2012] und die VDI 3926 [2004] Richtlinie. In diesen Normen wird ein Verfahren zur schnellen künstlichen Alterung von Filtermitteln und der Auswertung der erhaltenen Ergebnisse beschrieben.

An der TU-Wien haben sich unter anderem Schubert [2010] und Stecher [2014] mit der Alterung von Filtermitteln beschäftigt. Mithilfe einer Alterungskammer hat Stecher [2014] die bei der künstlichen Alterung im Labor auftretenden Verstopfungsvorgänge modelliert.

In keiner der oben genannten Normen wurde jedoch auf den Einfluss der Temperatur Bezug genommen. In der industriellen Anwendung erfolgt die Filtration jedoch nicht bei Raumtemperatur wie es bei der normgemäßen Filtermittelprüfung vorgeschrieben ist.

Heidenreich [2013] definiert Heißgasfiltration als Filtration über  $260^{\circ}\text{C}$ . Bei dieser Temperatur kommen, aufgrund der geringeren Temperaturbeständigkeit von aus Natur- und/oder Kunstfaser produzierten Filtermitteln, hauptsächlich keramische und metallische Filtermedien (Abbildung 1.5) zum Einsatz.

In VDI 3677 [2012] wird analog zu VDI 3926 [2004] eine Prüfung für Heißgasfilter vorgestellt. Auch hier wird auf den Bereich zwischen  $260^{\circ}\text{C}$  und Raumtemperatur nicht weiter eingegangen. Nach Abbildung 1.6, entnommen aus VDI 3677 [2012], werden zwar Schlauchfilter in diesem Temperaturbereich verwendet, die Norm selbst geht aber nicht weiter darauf ein.

Dieser Temperaturbereich könnte aber für viele Industriebereiche interessant werden, da ein Einsatz von Nadelfilzen noch möglich ist und Gase in diesem Temperaturbereich durch einem Schornstein anschließend ausgetragen werden können.

Deshalb setzt diese Arbeit hier an. Es ist von Interesse eine experimentelle Mög-

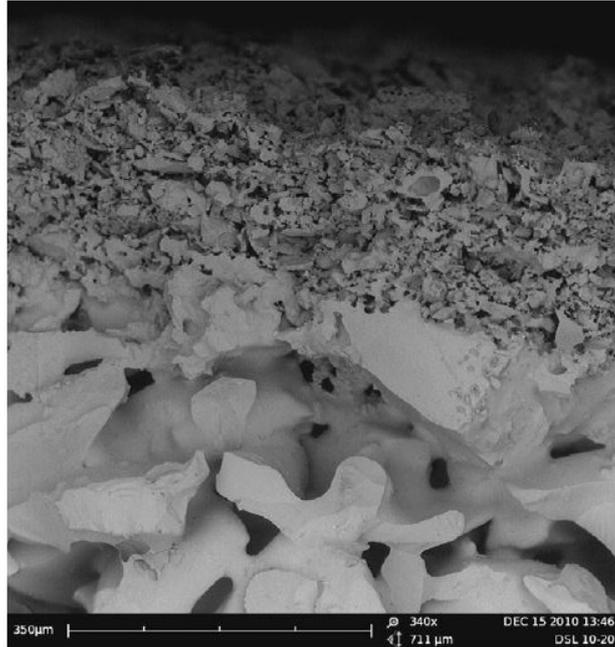


Abbildung 1.5: Assymetrische Keramikfiltermembran für die Heisgasfiltration [Heidenreich, 2013]

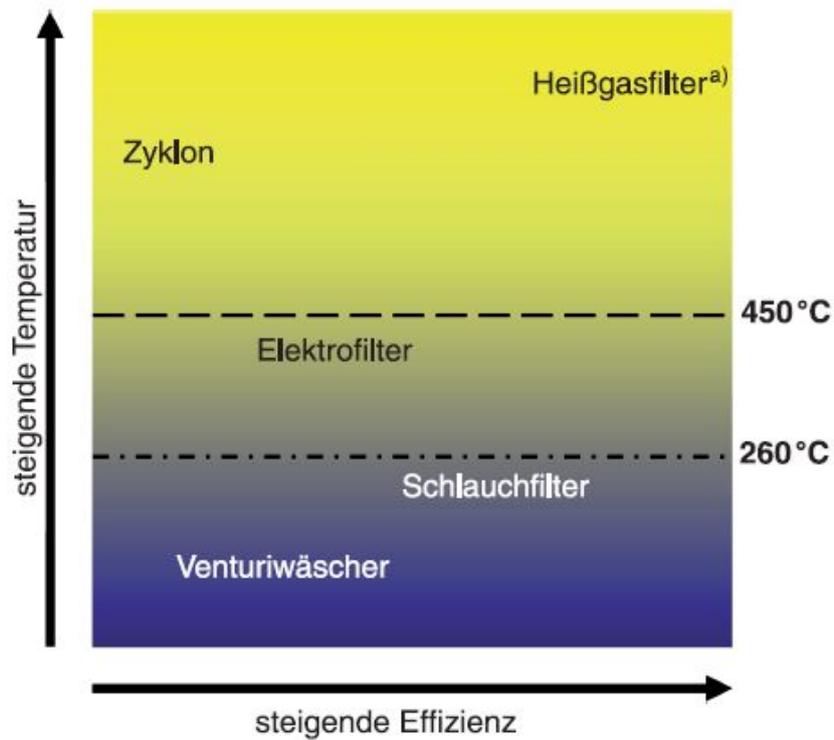


Abbildung 1.6: Temperaturbereiche bei denen Abscheider eingesetzt werden [VDI 3677, 2012]

lichkeit zur Untersuchung von Filtermitteln auch in einem Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 200°C mit einem Filtermittelprüfstand zu ermöglichen. Bei der Untersuchung ist voranging das Langzeitverhalten von abreinigbaren Staubfiltermitteln von Interesse und ob dieses sich mit steigender Temperatur signifikant ändert.

# Kapitel 2

## Zielsetzung

Um die Auswirkung der Gas-Temperatur auf die Staubfiltration bei Temperaturen zwischen Raumtemperatur und 150°C zu untersuchen, soll ein Prüfstand zur Alterung von textilen Filtermitteln gemäß DIN ISO 11057 [2012] aufgebaut werden. Eine Erweiterung mit einer Heizung soll die Möglichkeit bieten Versuche bei höheren Temperaturen durchzuführen.

Zuerst soll eine Literaturstudie von bestehenden Normen und Arbeiten durchgeführt werden, welche sich bereits mit dieser oder ähnlicher Problemstellungen befasst haben.

Anschließend soll ein Filtermittel-Prüfstand aufgebaut werden. Dieser soll mit einer Möglichkeit zur Beheizung und Regelung der Temperatur des Rohgases ausgestattet werden.

Eine Software zur Steuerung und zum Auslesen der Messdaten soll erstellt werden. Sämtliche Sensoren und der Staubdosierer sollen kalibriert werden.

Anschließend soll die Funktionsfähigkeit des heisgastauglichen Prüfstandes zur normgerechten Prüfung von Filtermitteln überprüft werden. Hierzu soll ein auf DIN ISO 11057 [2012] aufbauender Versuch durchgeführt werden.

Dazu soll eine vollständige Alterung bei Raumtemperatur, sowie mehrere Abreinigungszyklen bei unterschiedlichen Temperaturen bis 150°C durchgeführt werden.

Die erhaltenen Druckverlustverläufen sollen mit einer Modellgleichung für die ideale Oberflächenfiltration verglichen werden.

Es soll festgestellt werden ob die Modellgleichung geeignet ist Vorhersagen über das Filtrationsverhalten bei höheren Temperaturen aus Messdaten bei Raumtemperatur zu machen.

# Kapitel 3

## Grundlagen der Staubabscheidung

Das Ziel der Staubabscheidung ist die Trennung einer meist festen Phase von einer Trägervgasphase in welcher diese feste Phase dispergiert ist.

Staubabscheidung ist nicht nur aus Umweltschutzüberlegungen wichtig, sondern kann oft auch aus arbeitshygienischen, sicherheitstechnischen, produktionstechnischen oder qualitätssichernden Gründen relevant sein (Stieß [1994]).

Beispiele für wichtige Anwendungen der Staubabscheidung sind zum Beispiel:

- Reinraumtechnik z.B. in der Pharmazie
- Verhinderung der Schädigung von Pumpen oder Motoren durch Staub
- Verhindern von explosionsfähigen Staubkonzentrationen
- Einhaltung gesetzlicher Staubemissionsgrenzwerte

### 3.1 Grundbegriffe

Das *Rohgas* ist das mit Staub beladene Gas welches zu reinigen ist. Es besitzt den Staubgehalt  $c_{Roh}$ .

Der *Staubgehalt*  $c$  ist die Masse an Staub im Gas dispergiert bezogen auf das trockene Gasvolumen im Normalzustand. Er wird oft in  $g/m^3$  angegeben und entspricht somit einer Massenkonzentration.

Der Staub enthält Partikeln mit verschiedenen Partikelgrößen  $x$  deren Verteilung durch die Partikelgrößenverteilungsdichte  $q_{Roh}(x)$  charakterisiert wird.

Analog dazu ist das *Reingas* das gereinigte Gas nach dem Abscheider. Es besitzt den Staubgehalt  $c_{Rein}$  mit der Partikelgrößenverteilungsdichte  $q_{Rein}(x)$ .

Der *Gesamtentstaubungsgrad*  $E$  (Gl. 3.1) ist eine Größe für die Wirksamkeit eines Entstaubers. Er gibt den Massenanteil des abgeschiedenen Staubes in Relation zur Rohgaskonzentration an.

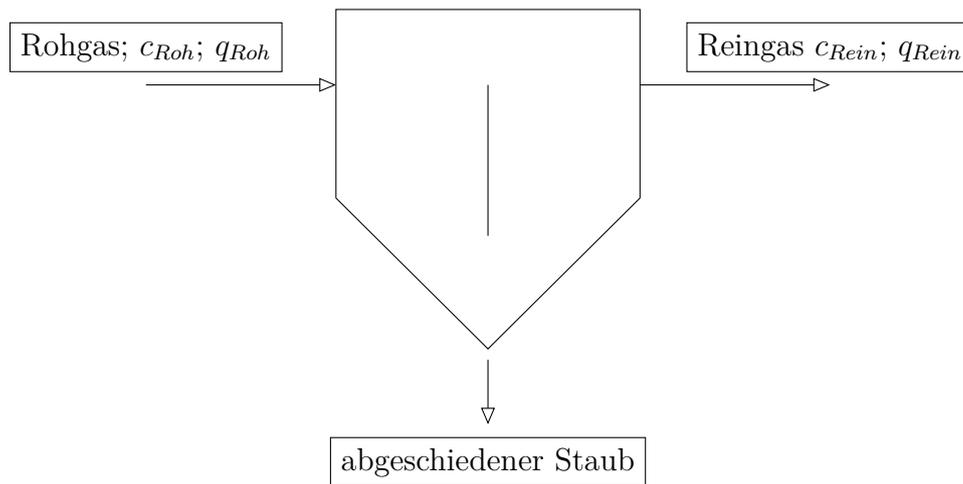


Abbildung 3.1: Grundschemata des Staubabscheidens

Analog dazu kann auch ein Gesamtentsaubungsgrad mit den Anzahlkonzentrationen gebildet werden, welcher vor allem beim Thema Feinstaub relevant ist. Beim Feinstaub gibt es nur sehr geringe Staubmassen, aber eine sehr große Anzahl an kleinsten Partikeln deren Abscheidung aufgrund ihrer Lungengängigkeit wichtiger ist als die von größeren Partikeln.

$$E = \frac{c_{Roh} - c_{Rein}}{c_{Roh}} \quad (3.1)$$

Der *Fraktionsabscheidegrad*  $T(x)$  (Gl. 3.2) ist ein Maß für die Fähigkeit des Abscheiders bestimmte Partikelgrößenfraktionen abzuscheiden. Speziell bei lungengängigen Staubfraktionen kann eine gesonderte Betrachtung von Bedeutung sein.

$$T(x) = E \cdot \frac{q_{Rein}(x)}{q_{Roh}(x)} \quad (3.2)$$

## 3.2 Abscheidemechanismen

Nach Stieß [1994] lassen sich die Abscheidemechanismen von verschiedenen Staubabscheidern auf acht Grundtypen zurückführen:

- Siebeffekt
- Schwerkraftabscheidung
- Fliehkraftabscheidung
- Umlenkabscheidung
- Sperreffekt

- Trägheitseffekt
- Elektrodifusiver Effekt
- Molekulardifusiver Effekt

Für die Abscheidung in filternden Abscheidern sind hauptsächlich die letzten vier Effekte aus der Liste von Bedeutung.

### 3.2.1 Trägheitseffekt

Durch Umlenkung der Strömung sind manche träge Partikeln nicht in der Lage der Strömung zu folgen und kollidieren somit mit der Kollektorfläche, zum Beispiel einer Faser, und bleiben, wenn eine Haftbedingung erfüllt ist, dort haften. (siehe Abbildung 3.2)

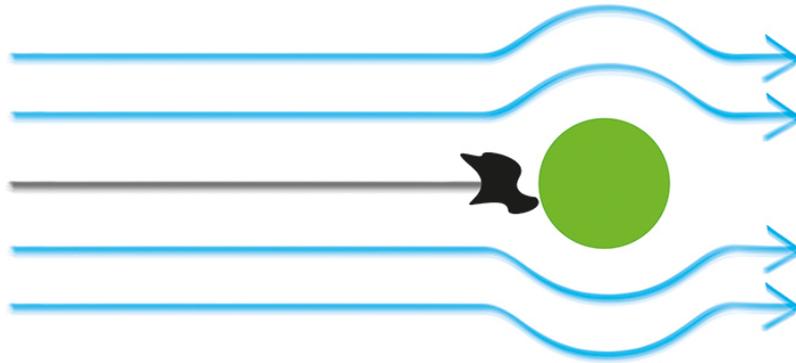


Abbildung 3.2: Funktionsweise des Trägheitseffektes [UNIFIL AG, 2017]

### 3.2.2 Sperreffekt

Ähnlich dem Trägheitseffektes wird beim Sperreffekt die Strömung umgelenkt, die Bewegung der Massenschwerpunkte der Partikeln führt zwar am Kollektor vorbei, dennoch kollidieren die Partikeln mit dem Abscheider aufgrund ihrer räumlichen Ausdehnung und haften an ihm durch Adhäsion. (siehe Abbildung 3.3)

### 3.2.3 Elektrodifusiver Effekt

Geladene Partikel können durch elektrische Felder von den Bahnlinien der Gasströmung zum Abscheider (z.B. Faseroberfläche) gelenkt werden. (siehe Abbildung 3.4)

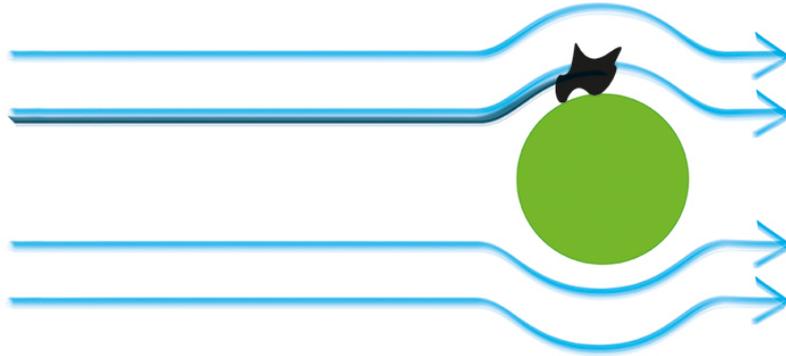


Abbildung 3.3: Funktionsweise des Sperreffektes [UNIFIL AG, 2017]

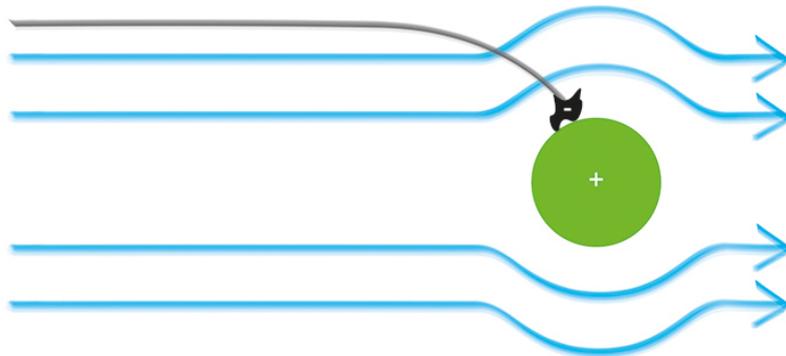


Abbildung 3.4: Funktionsweise des elektrodifusiven Effektes [UNIFIL AG, 2017]

### 3.2.4 Molekulardiffusiver Effekt

Für kleinste Partikel kann auch der molekulardiffusive Effekt eine Rolle spielen. Durch die Brownsche Molekularbewegung schwankt die Bahn der Partikel statistisch um die Bahnlinien der Strömung. Dabei ist es möglich das Partikel mit dem Abscheider in Berührung kommen und haften bleiben. (siehe Abbildung 3.5)

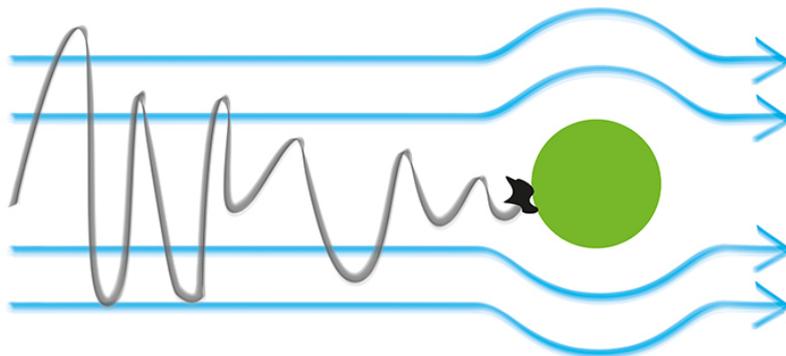


Abbildung 3.5: Funktionsweise des molekulardifusiven Effektes [UNIFIL AG, 2017]

### 3.2.5 Überlagerung der Abscheidemechanismen

Die vorgestellten Mechanismen wirken sich je nach Partikelgröße unterschiedlich auf das Abscheideverhalten eines Abscheiders aus.

In Abbildung 3.6 sind der reine Diffusions-, Sperr- und Trägheits-Effekt dargestellt, sowie strichliert ihre Überlagerung in einem realen Abscheider.

Während Sperr- und Trägheitseffekt bei kleinen Partikelgrößen nur geringe Trennwirkung haben, ist es für den molekulardiffusiven Effekt umgekehrt.

Bei der Überlagerung der Effekte kann es sein, dass sich ein Minimum bildet, dieses wird MPPS Most Penetrating Particle Size genannt, also jene Partikelgröße, die die größte Durchtrittswahrscheinlichkeit für den Abscheider aufweist.

In Abbildung 1.4 sind verschiedene Trennkurven von realen Abscheidern zu sehen. Man kann in dieser Abbildung deutlich erkennen welche Abscheider nur auf Trägheits- und Sperrereffekt basieren, und bei welchen auch andere Effekte eine Rolle spielen.

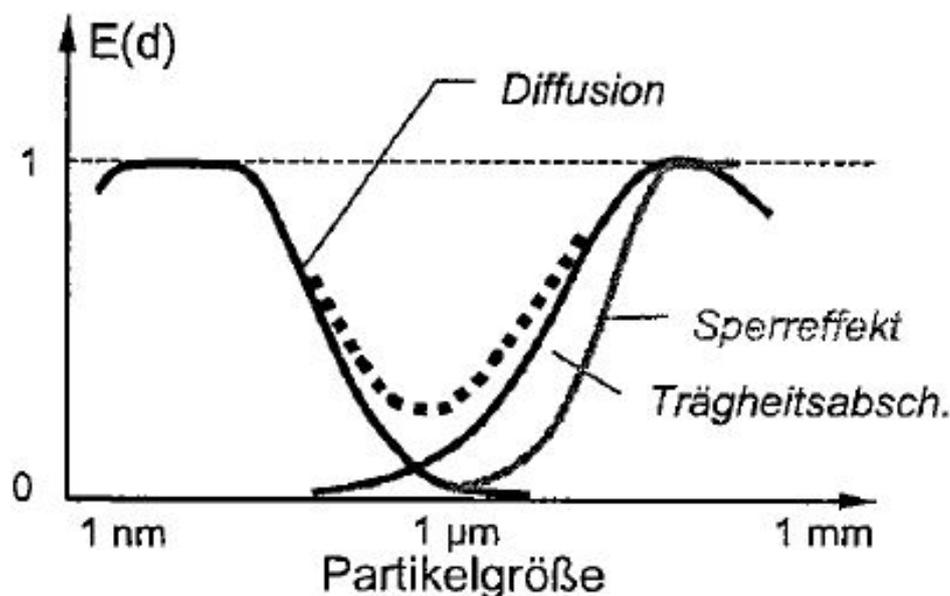


Abbildung 3.6: Überlagerung der Abscheidemechanismen; Abscheidewahrscheinlichkeit  $E(d)$  über der Partikelgröße  $d$  [Kasper u. a., 2003]

Wie in Abbildung 3.7 zu sehen ist, wirkt sich eine Veränderung der Filtrationsgeschwindigkeit in Form einer Verschiebung der Trennkurven aus, es kann also sinnvoll sein, je nach Problemstellung, die Geschwindigkeit zu erhöhen oder zu senken.

In Abbildung 3.8 sind die Einzelfaserauftreffgrade  $\eta$  (Wahrscheinlichkeit das ein Partikel auf einer Faser auftrifft und somit abgeschieden wird) bei einer Überlagerung von Diffusions- und Sperrereffekt dargestellt.

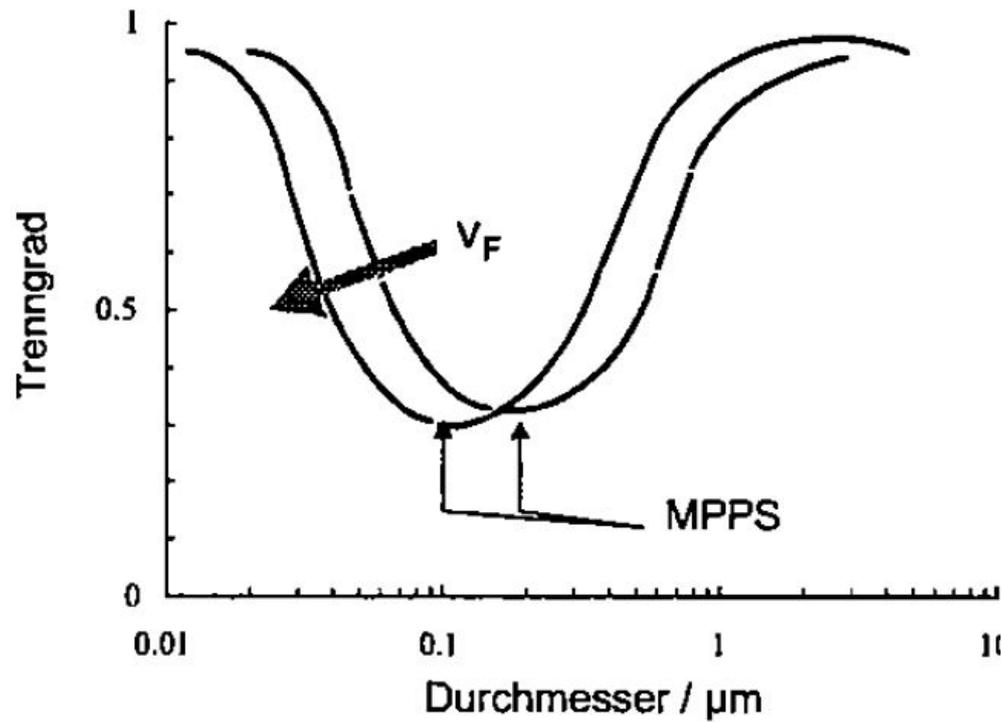


Abbildung 3.7: Einfluss der Filtrationsgeschwindigkeit ( $v_F$ ) auf die Partikelabscheidung [Kasper u. a., 2003]

Während eine Temperaturerhöhung praktisch keinen Einfluss auf die Abscheidung von größeren Partikeln hat, zeigt sich, dass im Bereich der Diffusion eine Erhöhung der Temperatur einen besseren Abscheidegrad bewirkt.

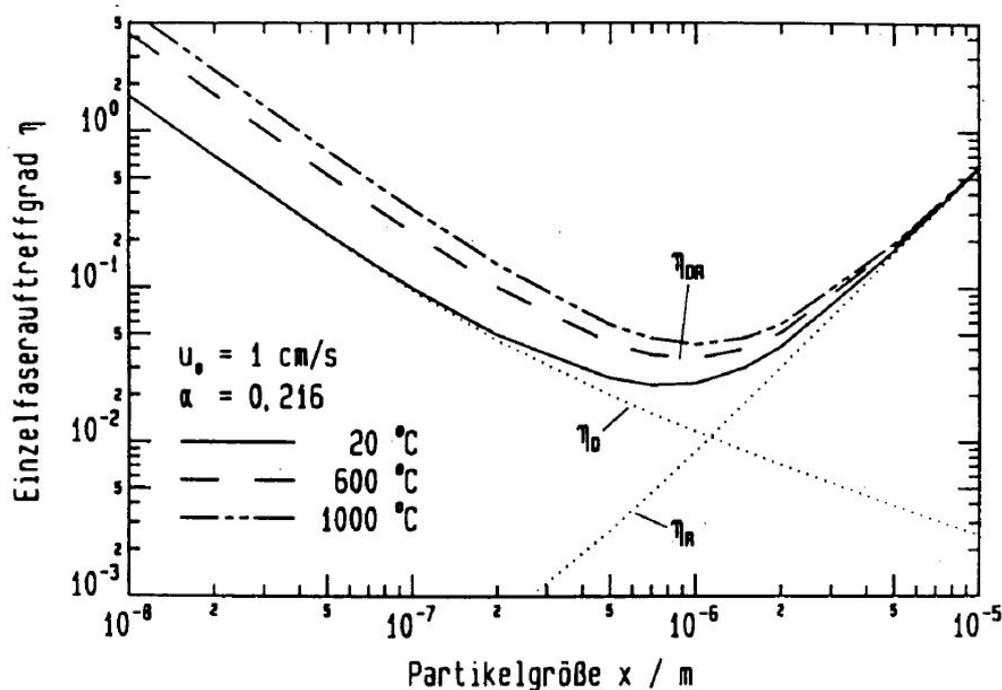


Abbildung 3.8: Einfluss der Temperatur auf die Partikelabscheidung; berechnete Einzelfaserauftreffgrade  $\eta_{DR}$  bei der Überlagerung von Diffusions-  $\eta_D$  und Sperreffekt  $\eta_R$  [Kasper u. a., 2003]

### 3.3 Grundlagen der Staub-Filtration

Bei der Filtration von Staub wird das mit Partikeln beladene Gas durch eine semi-permeable Schicht geleitet. Ziel dieses Vorganges ist es die Partikeln in der porösen Schicht, oder auch direkt auf der porösen Schicht abzuscheiden und somit ein Reingas zu erhalten in dem möglichst wenige Partikeln vorhanden sind.

Wird innerhalb der porösen Schicht abgeschieden, spricht man von Tiefenfiltration. Findet die Abscheidung jedoch auf der äußeren Oberfläche des Filtermediums statt, spricht man von Oberflächen- bzw. Kuchenfiltration.

Nach der Art des hauptsächlich vorliegenden Filtrationsmechanismus spricht man bei reinen Tiefenfiltern von Speicherfiltern, bei hauptsächlichlicher Kuchenfiltration spricht man von Oberflächenfiltern. Werden diese periodisch abgereinigt so spricht man von Abreinigungsfiltern.

In weiterer Folge wird nur mehr von Abreinigungsfiltern gesprochen da Speicherfilter in dieser Arbeit nicht untersucht wurden.

### 3.3.1 Abreinigungsfiltration

Bei der Abreinigungsfiltration wird der durch die Kuchenfiltration gebildete Kuchen periodisch wieder entfernt und so der Druckverlust wieder reduziert. Die Abreinigung kann z.B. mittels eines Druckluftpulses entgegen der Filtrationsrichtung erfolgen, diese Methode wurde auch in dieser Arbeit verwendet.

Die Abreinigung wird entweder nach einer bestimmten Zeit, oder nach Erreichen eines vorgegebenen maximalen Druckverlustes (Abreinigungsdruckverlust) ausgelöst.

#### Zeitgesteuerte Abreinigung

In Abbildung 3.9 ist beispielhaft der Verlauf einer zeitgesteuerten Abreinigungsfiltration bei konstanter Staubkonzentration zu sehen. Ausgehend vom Druckverlust über das unbestaubte Filtermittel  $\Delta p_0$  (Leerdrukverlust) steigt der Druckverlust an bis das Ende des definierten Zeitintervalles erreicht ist und eine Abreinigung ausgelöst wird.

Durch die Abreinigung sinkt der Druckverlust ab auf den sogenannten Restdruckverlust  $\Delta p_R$  welcher höher ist als  $\Delta p_0$ , weil die Abreinigung i.d.R. nicht vollständig verläuft. Auch der maximale Druckverlust vor der Abreinigung  $\Delta p_A$  wird durch die unvollständige Abreinigung i.d.R. immer weiter steigen.

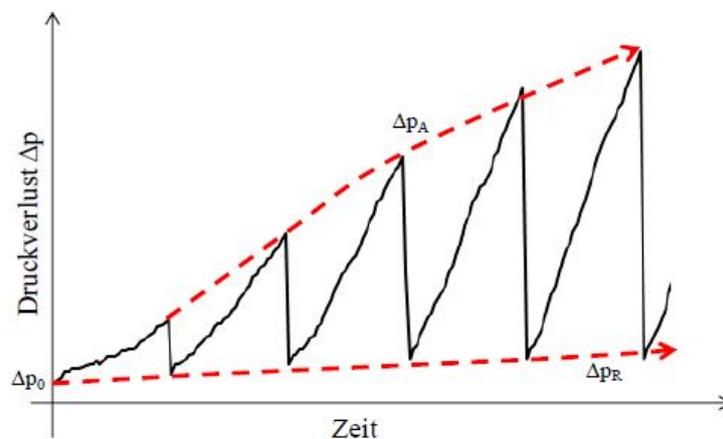


Abbildung 3.9: Zeitlicher Druckverlustverlauf einer Filtration bei zeitgesteuerter Abreinigung [Stecher, 2014]

#### Druckgesteuerte Abreinigung

Wird jedoch bis zu einem vorgegebenen maximalen Druckverlust (Abreinigungsdruckverlust) filtriert und dann abgereinigt, spricht man von einer druckgesteuerten Filtration. Ein Beispiel für einen möglichen zeitlichen Druckverlustverlauf bei einer

zeitgesteuerten Abreinigung ist in Abbildung 3.10 zu sehen.

Ausgehend von einem Druckverlust über das unbestaubte Filtermittel  $\Delta p_0$  wird bis zum maximalen Druckverlust  $\Delta p_A$  filtriert, welcher über alle Zyklen konstant ist.

Durch unvollständige Abreinigung wird i.d.R. der Restdruckverlust nach der Abreinigung  $\Delta p_R$  kontinuierlich steigen, während die Zyklusdauer, die Zeitspanne zwischen zwei Abreinigungen, kontinuierlich sinken wird.

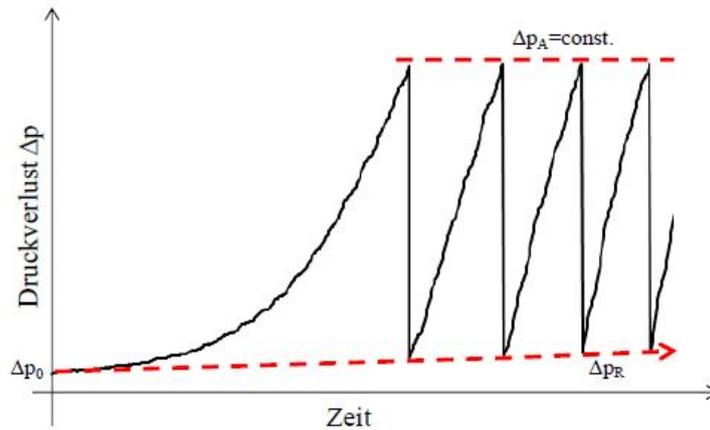


Abbildung 3.10: Zeitlicher Druckverlustverlauf einer Filtration bei druckgesteuerter Abreinigung [Stecher, 2014]

### 3.3.2 Mechanismen bei der Abreinigungsfiltration

Während im Laufe eines Zyklus bei der Abreinigungsfiltration oft die Kuchenfiltration vorzuherrschen scheint, gibt es noch andere Phänomene die einen Beitrag zur Filtration leisten, bzw. bei manchen Filtrationsverfahren sogar vorherrschen können, die Tiefenfiltration und Patchycleaning

#### Kuchenfiltration

Bei der Kuchenfiltration werden Partikeln auf der gesamten Kuchenfläche abgeschieden. Die Filterfläche bleibt über die ganze Filtrationsdauer konstant und es ergibt sich ein linearer Anstieg des Druckverlustes, wie in Abbildung 3.11 in der ersten Spalte von links zu sehen ist.

#### Tiefenfiltration

Im Gegensatz zur Kuchenfiltration ist bei der Tiefenfiltration die gesamte innere Oberfläche des Filtermediums für die Filtration verantwortlich. Die effektive Filterfläche sinkt somit im zeitlichen Verlauf der Filtration durch das Verstopfen von

Kanälen im Inneren des Filtermediums.

Durch die immer kleiner werdende verfügbare Filterfläche ergibt sich ein exponentieller Anstieg des Druckverlustes, wie in Abbildung 3.11 in der zweiten Spalte von links zu sehen ist.

Die Tiefenfiltration geht im Laufe eines Zyklus nach Verstopfen der größten Kanäle in eine Oberflächenfiltration über, wie in Abbildung 3.11 in der rechten Spalte zu sehen ist.

### **Patchycleaning**

Im Laufe der Filtration kann es nach mehreren Zyklen zu irreversiblen Verstopfungen im Inneren des Filtermediums, welche nicht durch die Abreinigung beseitigt werden können, und zur unvollständigen Abreinigung des Filterkuchens an der Filteroberfläche kommen.

Durch die unvollständige Abreinigung gibt es am Beginn des Zyklus Strömungswege die leichter zu durchströmen sind als die mit Partikeln blockierte Wege des nur teilweise abgereinigten Bereich des Filtermediums. Es steht zu Beginn eines Filtrationszyklus durch nur teilweise abgereinigtes Filtermittel also weniger effektive Filterfläche zur Verfügung.

Die Partikeln gehen im den weg des geringsten Strömungswiderstandes, deshalb bildet sich zunächst bevorzugt Filterkuchen an besser abgereinigten Teilstücken des Filtermittels bis das Filtermedium wieder gleichmäßig bestaubt ist und wieder die gesamte äußere Filterfläche zur Verfügung steht.

In Abbildung 3.11 ist in der dritten Spalte von links der Druckverlustverlauf bei Patchycleaning zu sehen.

Welche Mechanismen überwiegend vorherrschen hängt im wesentlichen von der Staubart, dem Filtermedium, der Anströmgeschwindigkeit, der Abreinigungsintensität und der Anzahl der durchlaufenen Zyklen ab. [Laminger u. a., 2017]

### **3.3.3 Filtergleichung**

Die Filtergleichung 3.3 von Stieß [1994] beschreibt einen Zusammenhang zwischen mehreren für die Filtration relevanten Größen.

Dazu zählen Reingasvolumenstrom, Kuchendicke, Filterfläche, Druckdifferenz und verschiedene Durchströmungseigenschaften.

Sie ist nur unter einigen Voraussetzungen gültig:

- Zusammensetzung des Staubes ist sowohl zeitlich als auch örtlich konstant
- Kein Feststoff gelangt ins Reingas

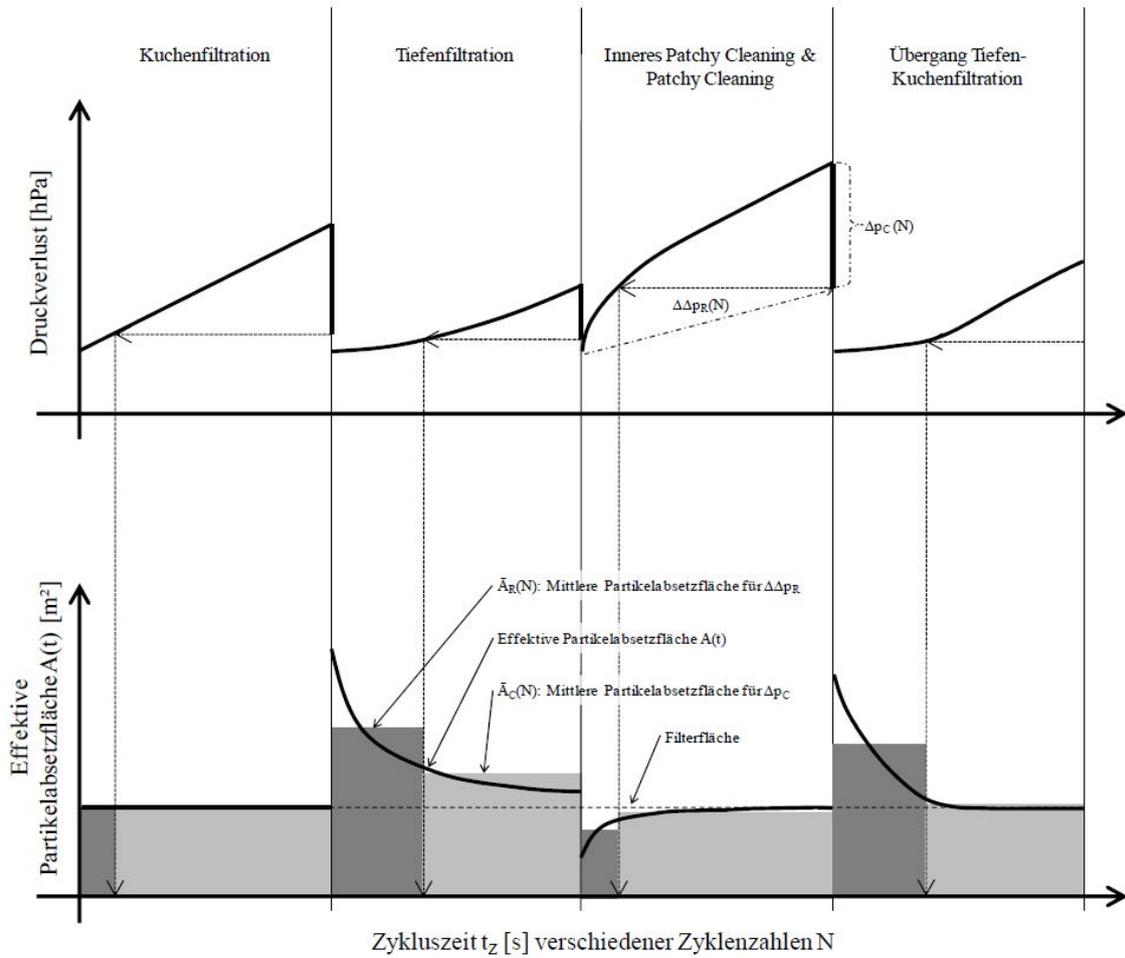


Abbildung 3.11: Verlauf des Druckverlustes und der Partikelabsatzfläche innerhalb eines Zyklus bei verschiedenen Filtrationsmechanismen [Stecher, 2014]

- Feststoff wird durch Oberflächenfiltration auf dem Filtermittel bzw. auf der bereits abgeschiedenen Staub-Schicht angelagert
- Filtermittel und Kuchen werden zäh durchströmt (Reynoldszahl klein)

In Gleichung 3.3 wird der Druckverlust  $\Delta p_{(t)}$  zum Zeitpunkt  $t$  mit der Filterfläche  $A$ , der dynamischen Viskosität  $\eta$ , dem Volumen an Fluid das die Schicht bereits durchströmt hat  $V$ , dem spezifischen Kuchenwiderstand  $\alpha_m$ , dem Filtermittelwiderstand  $\beta$ , sowie dem Verhältnis von Kuchenmasse zu Filtratvolumen  $\kappa_m$  berechnet.

$$\Delta p_{(t)} = \frac{\eta}{A} \cdot \left( \frac{\alpha_m \kappa_m}{A} V_{(t)} + \beta \right) \cdot \frac{dV}{dt} \quad (3.3)$$

Nach Integration bei konstantem Volumenstrom  $\dot{V}$  ergibt sich die Filtergleichung 3.4, welche für die Auswertungen in dieser Arbeit verwendet wurde.

$$\Delta p_{(t)} = \eta \cdot \alpha_m \cdot \kappa_m \cdot \left( \frac{\dot{V}}{A} \right)^2 \cdot t + \eta \cdot \beta \cdot \frac{\dot{V}}{A} \quad (3.4)$$

Da bei der Staubfiltration, besonders am Anfang eines Zyklus, keine reine Kuchenfiltration vorliegt, kann die Gleichung nur für den linearen Bereich nach Tiefenfiltration und Patchycleaning verwendet werden.

Der Druckverlust vor der Kuchenfiltration ist also nicht mit dieser Gleichung beschreibbar.

Mit der beschriebenen Gleichung kann  $\beta$  nicht sinnvoll zum Zeitpunkt  $t=0$  ausgewertet werden, da sich der Filtermittelwiderstand  $\beta$  durch Tiefenfiltration zeitlich ändert, und diese Tiefenfiltration auch noch durch Kuchenfiltration und Patchycleaning überlagert wird.

### 3.3.4 Filtration bei höheren Temperaturen

Laut Heidenreich [2013] spricht man von Heißgasfiltration ab einer Temperatur von etwa 260°C. Diese erhöhte Temperatur kann sich in mehrererlei Hinsicht auf die Filtration auswirken.

Zum einen ist bei der Wahl des Filtermittels darauf zu achten, dass es eine ausreichende Temperaturbeständigkeit aufweist.

Dadurch sind zum Beispiel Nadelfilze aus konventioneller Kunstfaser nicht mehr verwendbar. Es werden also hauptsächlich Keramiken und Metallgittergewebe eingesetzt. [Kasper u. a., 2003]

Aufgrund der Ausdehnung von Gasen bei steigender Temperatur, ist für den selben Massenstrom an Gas ein höherer Volumenstrom zu filtrieren. Bei gleich bleibender

Filterfläche und erhöhtem Volumenstrom ist mit einem höherem Druckverlust über das Filtermedium zu rechnen, und somit können sich wesentlich kürzere Zyklusdauern ergeben.

Die Viskosität von Gasen ist ebenfalls von der Temperatur abhängig. Im Gegensatz zu den newtonschen Flüssigkeiten steigt die Viskosität von Gasen mit steigender Temperatur an.

Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Diffusion, führt der Diffusionseffekt bei erhöhten Temperaturen zu höheren Trenngraden. (Abbildung 3.8)

Bei höheren Temperaturen kann es auch zu Änderungen der Partikeleigenschaften kommen.[Heidenreich, 2013] Die Partikel können beispielsweise Erweichen oder im Filterkuchen zu sintern beginnen, was zu Verbackungen führen kann. Die Standzeit des Filtermediums kann durch diese Effekte erheblich reduziert werden.

### 3.4 Alterung von Filtermitteln

Unter der Alterung von abreinigbaren Filtermedien wird im Allgemeinen die irreversible Veränderung der Filtrationseigenschaften eines Filtermediums im Zuge des industriellen Langzeitbetriebes verstanden. Dabei wird zwischen chemischer und mechanischer Alterung, sowie Alterung durch irreversible Verstopfung des Filtermediums unterschieden. Diese meist in Kombination auftretenden Mechanismen beschränken die Standzeit eines industriell eingesetzten Filtermediums. [Stecher, 2014]

Von chemischer Alterung wird gesprochen wenn das Filtermittel aufgrund von Chemikalien oder Wärme irreversibel geschädigt wird.

Von mechanischer Alterung wenn das Filtermittel von mechanischen Krafteinwirkungen, wie beispielsweise bei der Abreinigung mit Druckluftstoß, geschädigt wird.

Um das Langzeit-Betriebsverhalten von Filtermitteln im industriellen Betrieb abschätzen zu können wurde mit der VDI 3926 [2004] ein Prozess zur künstlichen Alterung im Labor entwickelt und durch die [DIN ISO 11057, 2012] noch einmal verbessert.

Bei der Alterung nach DIN ISO 11057 [2012] wird ein Filtermittel in einer Laborapparatur mit konstanten Volumenstrom und konstanter Partikelkonzentration bestaubt.

Zuerst werden 30 Zyklen im druckgesteuerten Betrieb bis 1000 Pa Druckverlust über die filternde Schicht durchgeführt.

Danach beginnt die eigentliche Alterung mit 2500 zeitgesteuerten Zyklen zu je 20 Sekunden.

Abschließend werden noch einmal 30 Zyklen im druckgesteuerten Betrieb bis 1000 Pa Druckverlust durchgeführt um sie mit den Zyklen vor der Alterung vergleichen zu können.

Anhand des Verlaufes der Restdruckverluste nach der Abreinigung können Abschätzungen über die Lebensdauer eines Filtermittels gemacht werden.

Neben diesen genormten Filtermittelprüfungen gibt es auch wissenschaftliche Arbeiten in denen die Alterung von Filtermitteln untersucht wurde.

Zwei Arbeiten zu diesem Thema stammen von Schubert [2010] und von Stecher [2014].

Schubert [2010] hat bei Alterungen mit einer Alterungskammer (Abbildung 3.12) Parametervariationen durchgeführt. Er hat damit unter anderem den Einfluss der Abreinigungsintensität bei der zeitgesteuerten Filtration untersucht.

Stecher [2014] hat untersucht, zu welchem Zeitpunkt welche Filtrationsmechanismen vorherrschend sind, und hat anschließend ein Modell zur Beschreibung des Druck-

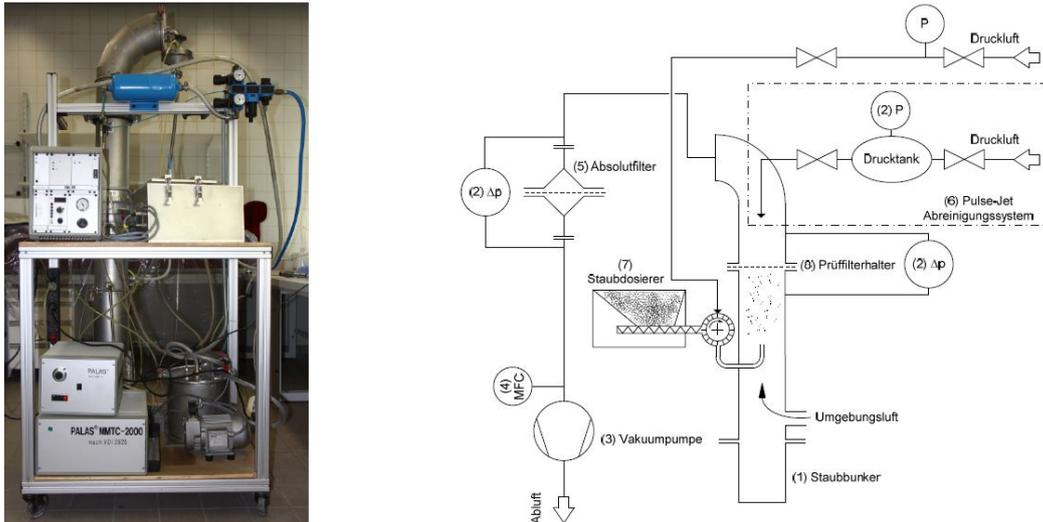


Abbildung 3.12: Alterungskammer an der TU-Wien; links Photographie, rechts schematischer Aufbau [Stecher, 2014]

verlustverlaufes bei zeit- und druck-gesteuerter Abreinigungsfiltration entwickelt. Er konnte zeigen das mit seinem Modell eine Hochrechnung eines Druckverlustverlaufes bei geringer Filtrationsgeschwindigkeit und langer Versuchszeit auf Basis von kurzzeitigen Versuchen mit höherer Filtrationsgeschwindigkeit möglich ist.

# Kapitel 4

## Versuchsaufbau

### 4.1 Übersicht

Um Alterungsversuche bei höheren Temperaturen im Labormaßstab durchzuführen wurde angelehnt an die VDI 3926 [2004] Richtlinie (Abbildung 4.2) ein Filtermittel-Prüfstand aufgebaut.

Ein Bild des im Rahmen dieser Diplomarbeit aufgebauten Filtermittel-Prüfstandes ist in Abbildung 4.1 zu sehen.

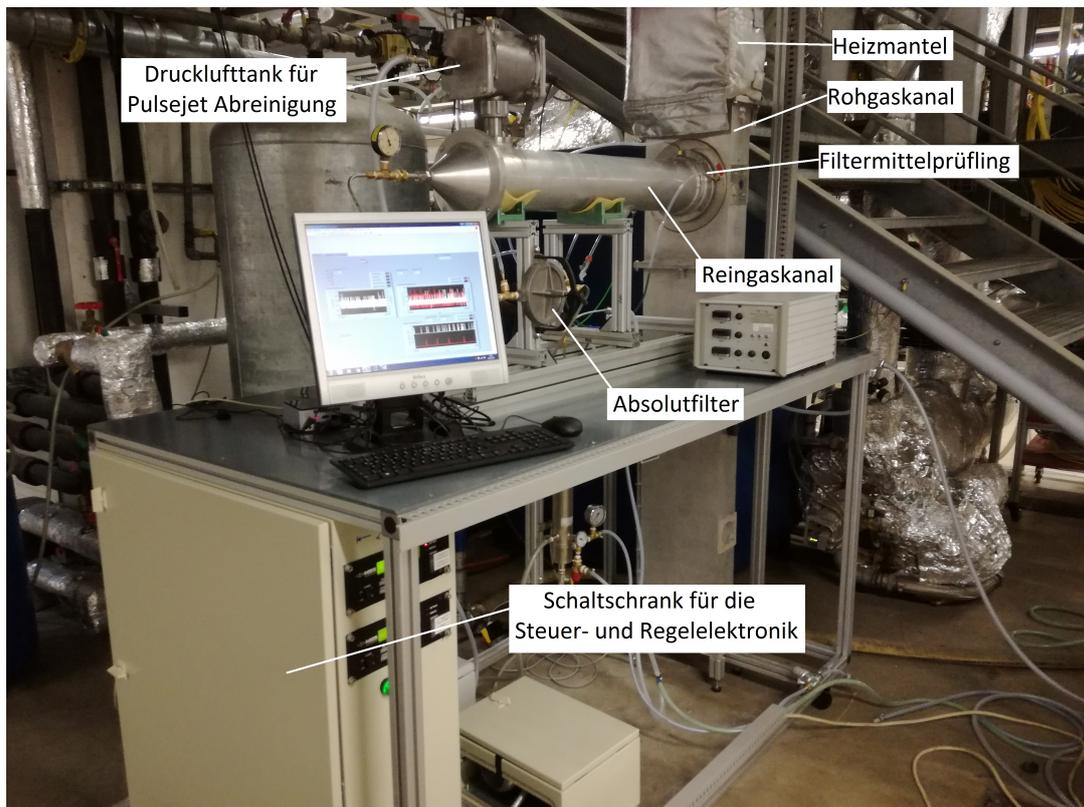


Abbildung 4.1: Prüfstand für textile Filtermittelprüfung bei erhöhten Trägergastemperaturen

Bei dieser Apparatur wird am oberen Ende des vertikalen Rohgaskanals mittels eines Staubdosierers der verwendete Prüfstaub kontinuierlich eingeblasen.

Der Staub fällt im ca. 4 Meter hohen Rohgaskanal hinab, wodurch er ausreichend mit dem Trägergas, welches aus Druckluft aus dem Staubdosierer und Umgebungsluft besteht, vermischt wird.

Anschließend wird am Prüffilter das Aerosol filtriert, wodurch sich an diesem ein Staubkuchen bildet, welcher periodisch, durch das Öffnen des mit dem Drucklufttank verbundenen Magnetventils, abgereinigt werden kann.

Der Druckabfall über den Prüffilter wird sekundlich, mit einem Differenzdruckaufnehmer gemessen, um das Filtrationsverhalten auswerten zu können.

Das gereinigte Gas wird zum Schutz der Pumpe anschließend durch einen Absolutfilter geleitet, wo ein Großteil der im Gas verbliebenen Partikel aus dem Aerosol entfernt werden.

Es wurde ein Heizmantel um den Rohgaskanal, angebracht, um auch Heißgasmessungen durchführen zu können.

Ein Thermoelement unmittelbar vor dem Prüffilter misst kontinuierlich die Gastemperatur.

Auf die photometrische Staub-Konzentrationsüberwachung gemäß VDI 3926 [2004] wurde verzichtet, und durch eine gravimetrische Bestimmung der Konzentration am Prüffilter vor jedem Versuch ersetzt.

Weiters ist ein Gaskühler vorgesehen, da die Pumpe nur mit Temperaturen unter 60°C betrieben werden darf.

Eine zweite Differenzdruckmessung über den Absolutfilter wurde verbaut, um diesen zu überwachen und zu wissen, wann das Filtermittel ausgetauscht werden muss.

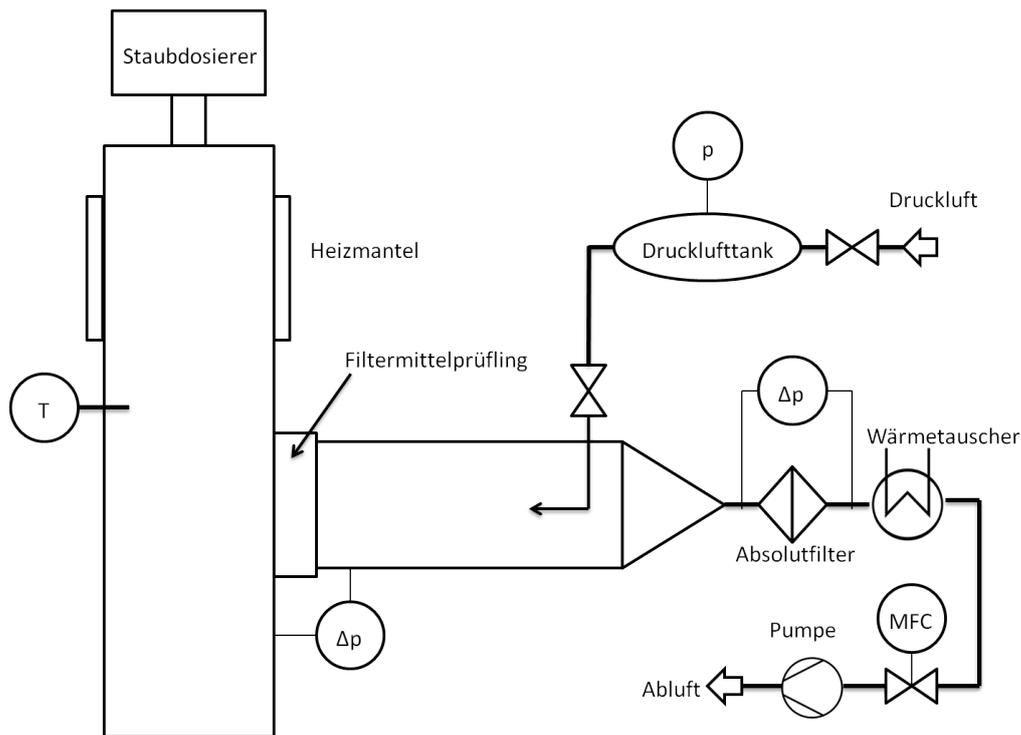


Abbildung 4.2: Aufbau der Filtermittelprüfapparatur angelehnt an [VDI 3926, 2004]

## 4.2 Anlagenteile

### 4.2.1 Roh- und Rein-Gasraum

#### Rohgaskanal

Der vertikale Rohgaskanal (Abbildung 4.3) besitzt einen rechteckigen 300x120 mm Querschnitt und ist im gesamten 4200 mm hoch.

Der Kanal besteht aus drei Hauptelementen. Am Kopf des Rohgaskanals befindet sich eine Rohrfortsetzung an deren Spitze sich die Eingänge für Staub und Luft befinden.

Das oberste und längste Element des Rohgaskanals dient dazu die Staubdispersion zu vergleichmäßigen.

An diesem Element ist auch der Heizmantel angebracht.

Das mittlere und auch kürzeste Element enthält die Anschlussstelle an welcher der Filtermittelprüfling und der horizontale Reingaskanal angebracht werden.

Das unterste Element dient als Staubkammer für den bei der Abreinigung abgeworfenen Staub.

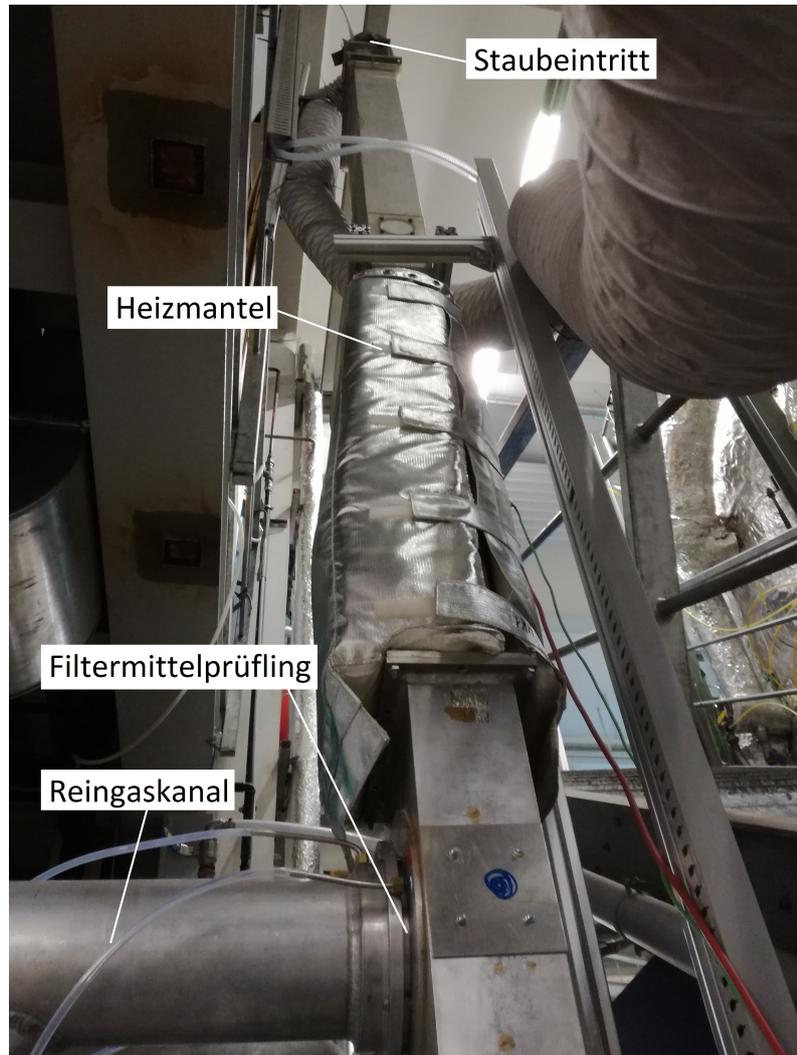


Abbildung 4.3: Mittleres und Oberes Element des Rohgaskanals mit angebrachten Heizmantel

## Reingaskanal

Der horizontale Reingaskanal (Abbildung 4.4) hat einen Kreisquerschnitt mit einem Innendurchmesser von 150 mm und eine Länge von 1100 mm.

Der Kanal hat einen Zugangsstutzen für isokinetische Probenahme, sowie eine Anschlussstelle zwecks Anbringung der Druckluftabreinigung.

Am Ende des Kanals verengt ein kegelförmiges Anschlussstück den Durchmesser auf 10 mm um das Absaugen des Reingasvolumenstromes mit Hilfe eines Saugzuggebläses zu gewährleisten.

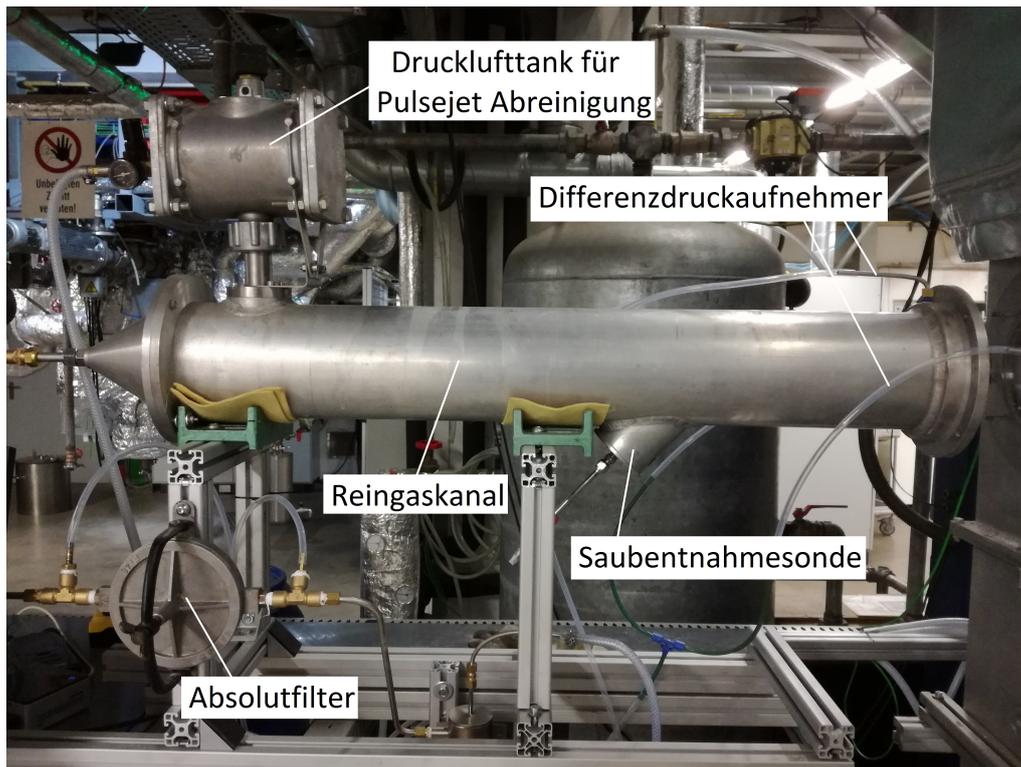


Abbildung 4.4: Reingaskanal mit Drucklufttank

### 4.2.2 Heizsystem

Das angebrachte Heizsystem, von der Firma Filtec, besteht aus drei unabhängig voneinander regelbaren Heizmänteln und einem Steuerungskasten (Abbildung 4.5).

Ein Element ist am oberen Teil des vertikalen Rohgaskanals anzubringen, eines am mittleren Teil und eines am horizontalen Reingaskanal.

In Abbildung 4.6 ist der Heizmantel am vertikalen Rohgaskanal zu sehen.



Abbildung 4.5: Steuerkasten für die Beheizung der Anlage



Abbildung 4.6: Heizmantel angebracht am vertikalen Rohgaskanal

### 4.2.3 Filtermittelhalter

Der Filtermittelhalter (Abbildung 4.7) besteht aus 5 Teilen:

1. Haltering
2. Gitter (optional)
3. Distanzring mit Rückhaltestäben
4. Zusatzdistanzring (optional)
5. Schraubverschluss



Abbildung 4.7: V.l.n.r Haltering, Gitter, Distanzring mit Rückhaltestäben, Zusatzdistanzring und Schraubverschluss

Der Filtermittelprüfling wird in den Haltering eingelegt. Anschließend werden die anderen Teile des Filtermittelhalters in der oben genannten Reihenfolge angeordnet und mit dem Schraubverschluss fest verspannt.

Alle Metall-Metall-Verbindungen müssen vor Verwendung mit Schliiffett geschmiert werden.

Der Durchmesser der Filterfläche ergibt sich aus dem Innendurchmesser des Halterings zu 140mm.

#### 4.2.4 Staubdosierer

Als Staubdosierer wird ein BEG 1000D von PALAS-GmbH [2017] eingesetzt. Aus einem, an der Unterseite offenen, Staubbehälter mit einem langsam drehenden Rührwerk fällt Staub auf das darunterliegenden Förderband.

Das Band fördert den Prüfstaub weiter zu einer schnell drehenden Bürste welche den Staub mit Druckluft dispergiert.

Anschließend wird das Staubaerosol über einen Venturi-Injektor angesaugt und in die Versuchsapparatur geblasen.

Eine photographische Darstellung des Staubdosierers findet sich in Abbildung 4.9. Abbildung 4.8 zeigt das Funktionsprinzip des Staubdosierers.

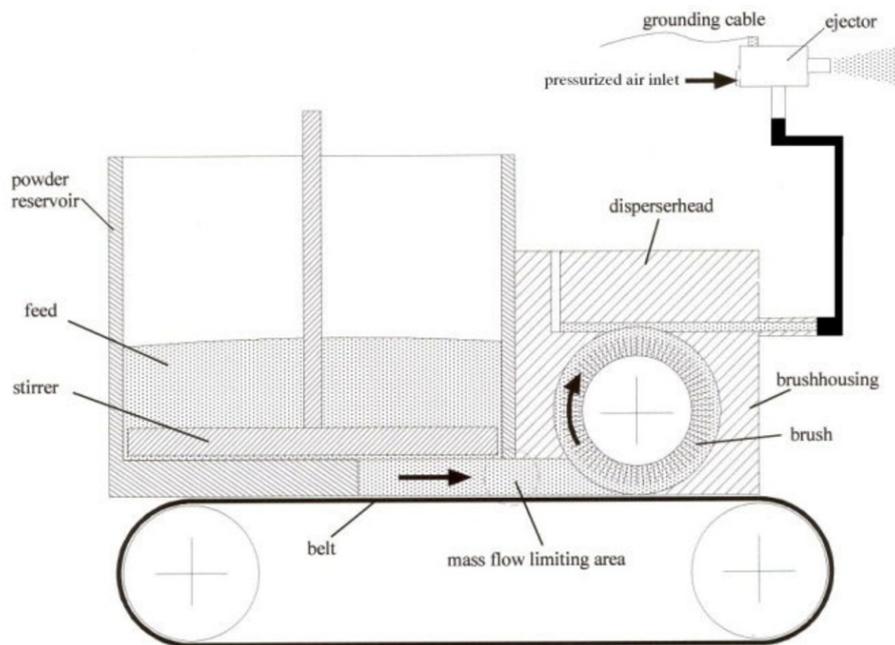


Abbildung 4.8: Funktionsprinzip des Staubdosierers BEG 1000D [PALAS-GmbH, 2017]

#### 4.2.5 Druckluftabreinigung

Die Druckluftabreinigung besteht aus einem Drucklufttank, einem Magnetventil zur Auslösung des Druckluftstoßes, sowie einer in Richtung des Filtermittels ausgerichteten Düse.

Ein Drosselventil ermöglicht es Druckluft zwischen 1 und 6 bar, für die Abreinigung, bereitzustellen.

Der 5l Tank, das Magnetventil, sowie das Drosselventil mit Manometer sind in Abbildung 4.10 zu sehen.



Abbildung 4.9: Staubdosierer BEG 1000D der Firma Palas

Im Betrieb wird das Magnetventil von der Steuerung für 60ms geöffnet um einen Druckluftimpuls auszulösen.

Dieser dient dazu den am Filtermedium anfiltrierten Staubkuchen abzuwerfen.

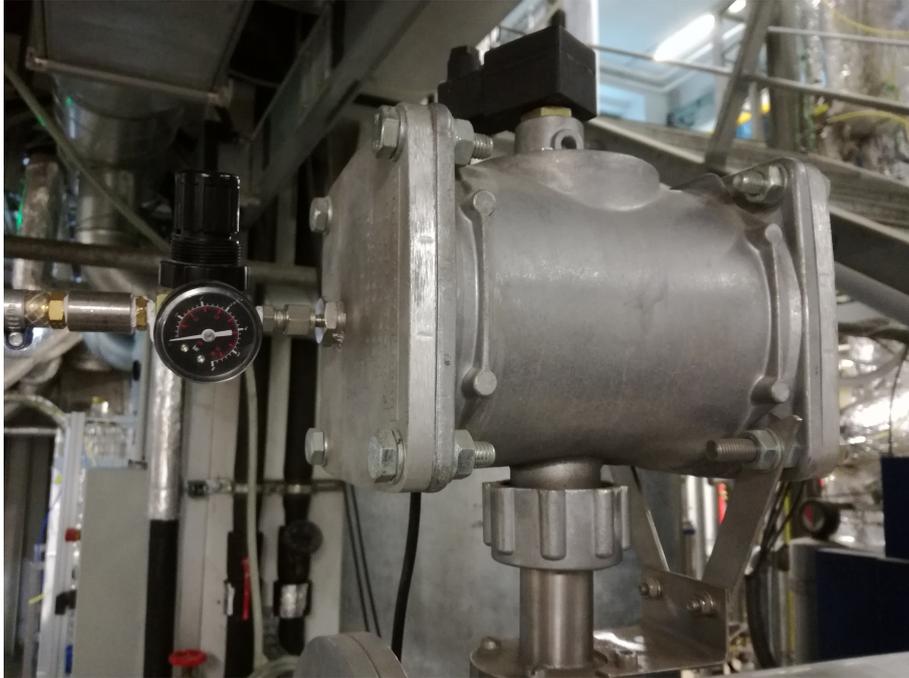


Abbildung 4.10: Drucklufttank mit Drosselventil und Manometer

#### 4.2.6 Absolutfilter

Der Absolutfilter trennt jene Staubpartikeln ab, welche durch das Prüffiltermedium in das Reingas gelangt sind, um einerseits gravimetrisch die mittlere Reingasstaubkonzentration bestimmen zu können, und andererseits das Saugzuggebläse vor Verunreinigung zu schützen.

Der Filter besteht aus einer Haltevorrichtung (Abbildung 4.11) und einem Cellulose-Filterpapier mit 125mm Durchmesser der Firma Schleicher und Schuell mit einer Porenweite von  $4 - 12\mu\text{m}$ .

#### 4.2.7 Gaskühler

Der Gaskühler wurde von der Firma M&C hergestellt. Er besteht aus einer Hohlzylinder durch welchen ein dünnes Rohr spiralförmig gewunden hindurchgeführt wird. Der Gaskühler ist in Abbildung 4.12 zu sehen. Er ist im Reingasstrom unmittelbar vor den Massflowcontrollern eingebaut, um diese vor zu hohen Temperaturen zu schützen.

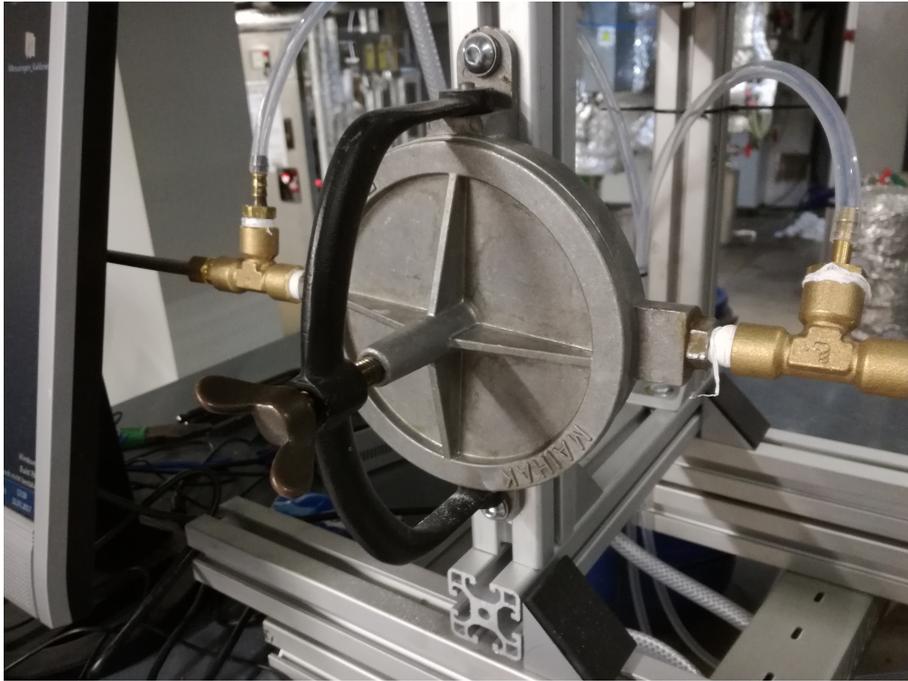


Abbildung 4.11: Absolutfilter im eingebauten Zustand

Die Kühlflüssigkeit wird durch das spiralförmige Rohr geleitet. Somit wird das Gas, welches durch die zylindrische Kammer geleitet wird, im Gegenstrom gekühlt. Als Kühlflüssigkeit kommt Wasser aus der Hauswasserleitung zum Einsatz.

#### 4.2.8 Pumpe

Bei der Pumpe (Abbildung 4.13) zur Erzeugung des Trägergasstromes handelt es sich um eine 0,21 kW Drehschieberpumpe der Firma Becker mit der Kennnummer VT 4.4.

Die Drehschieberpumpe ist trockenlaufend und luftgekühlt. Sie enthält einen integrierten Ansaugfilter um die Pumpe vor Verunreinigung zu schützen.

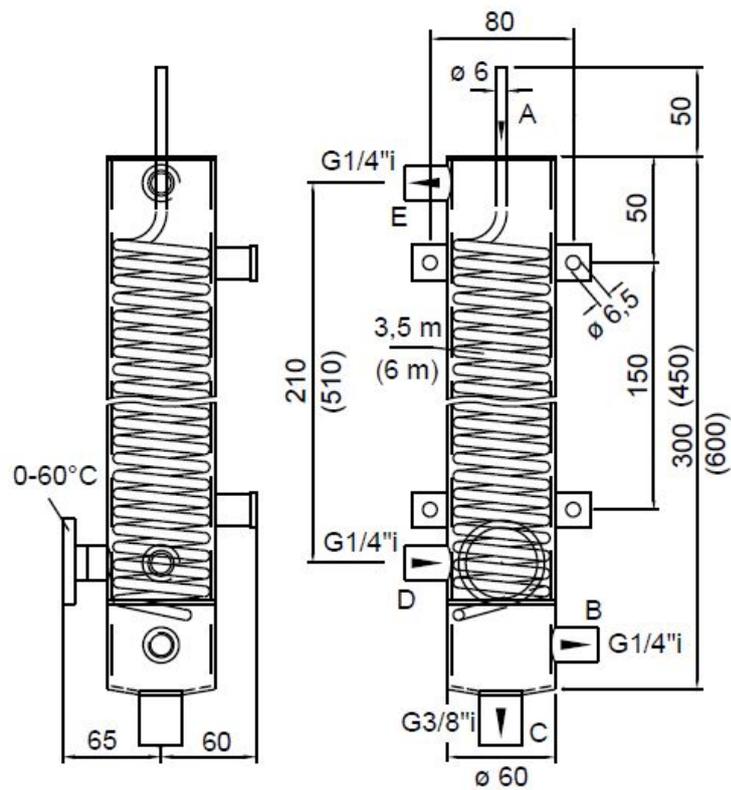


Abbildung 4.12: Gaskühler Modell LGC-1 der Firma M&C [M&C, 2006]



Abbildung 4.13: Drehschieberpumpe VT 4.4 mit 2,1 kW

## 4.3 Messung und Steuerung

### 4.3.1 Software

Die Steuerung, Überwachung und Messdatenerfassung wurde auf einem Windows-Computer mit dem Programm LabView [National-Instruments, 2016] realisiert. Das Programm zeichnet sämtliche relevanten Messdaten (Druckverluste, Temperatur und Volumenströme) und Prozessgrößen (Zyklusanzahl, Betriebsweise, etc.) auf und speichert diese in einer Tabelle ab.

Weiters werden die Daten visuell aufbereitet und zur manuellen Prozessüberwachung am Bildschirm dargestellt, wie in Abbildung 4.14 zu sehen.

Außerdem ist das Programm in der Lage den Druckluftstoß zur Staubabreinigung, abhängig von der Betriebsart, korrekt auszulösen.

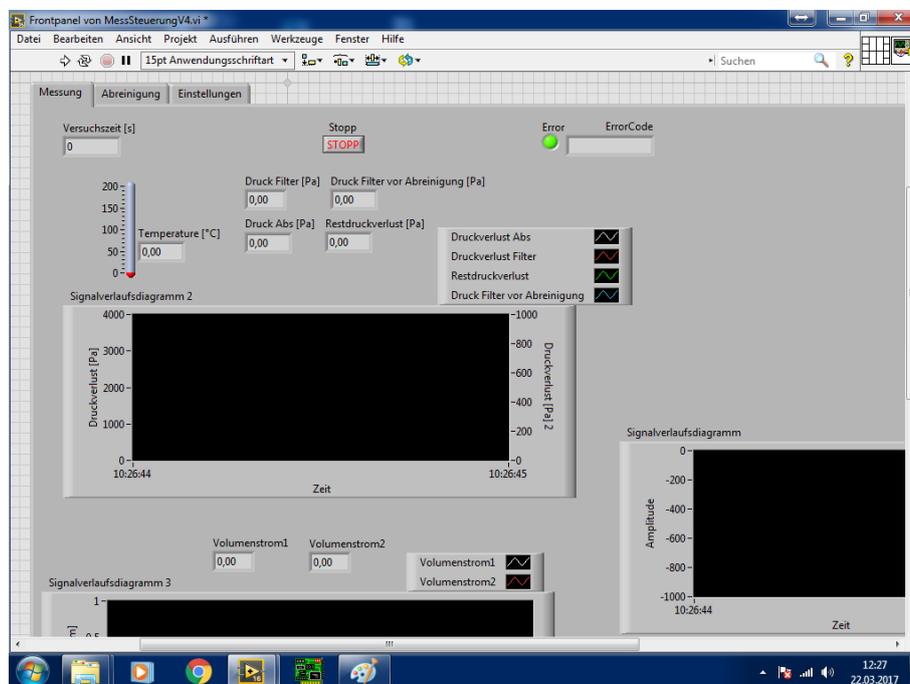


Abbildung 4.14: Visuelles Interface zur Darstellung der Messdaten in Echtzeit während Messungen

### 4.3.2 Messkarte

Zur Aufzeichnung der Messsignale bzw. zum Ansteuern der Druckluftabreinigung wurde eine Messkarte der Firma Meilhaus Electronics vom Bautyp Redlab 1208LS (Abbildung 4.15) verwendet.

Die Messkarte verfügt sowohl über analoge, als auch digitale, Ein- und Ausgänge und wird mit einem USB-Kabel an den Rechner angeschlossen.

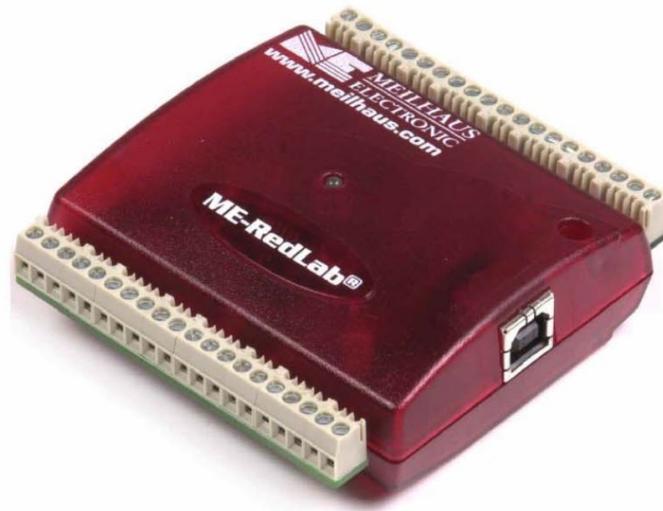


Abbildung 4.15: USB-Messkarte Redlab 1208LS [Meilhaus, 2014]

### 4.3.3 Volumenstromregelung

Die Regelung der Volumenströme, sowohl für den partikelbeladenen Rohgasstrom, als auch für den Druckluftstrom, welchen der Staubdosierer benötigt, werden mit Massflowcontroller (Abbildung 4.16) geregelt.

Die Massflowcontroller (MFC) des Types 1559A-200L-SV der Firma MKS-Instruments sind an eine Mess- und Steuereinheit mit der Produktbezeichnung PR4000F (Abbildung 4.17) angeschlossen.

Messsignale werden aus der Rückseite der Steuereinheit entnommen und mithilfe der Messkarte auch in den PC eingelesen.

Das Messprinzip basiert darauf, dass die Energiemenge, die man zum Aufrechterhalten eines bestimmten Temperaturprofils entlang einer Röhre benötigt, welche laminar durchströmt wird, aus der Massenflussrate resultiert. Hierzu wird der Massenstrom zuvor aufgeteilt zwischen Sensorröhre und einem Bypass. Bei den MFC befinden sich auf der Sensorröhre Widerstandsheizelemente. Ihre Temperaturen sind so festgesetzt, dass Spannungsänderungen an den Sensoren die lineare Funktion der Abweichungen im Durchfluss sind.

### 4.3.4 Differenzdruckaufnehmer

Die Aufzeichnung des Differenzdruckes über das Prüffiltermedium erfolgt mithilfe einer Differenzdruckmessdose der Firma Gems-Sensors und hat einen Messbereich von 1.000 Pascal.

Für die Messung über den Absolutfilter ist eine Druckmessdose der Firma Kalinsky-Sensor-Elektronik mit einem Messbereich bis 10.000 Pascal im Einsatz.



Abbildung 4.16: Massflowcontroller Type 1559A-200L-SV von MKS-Instruments



Abbildung 4.17: Steuer- und Regelungseinheit PR4000F für MKS Massflowcontroller

Beide Druckaufnehmer sind in Abbildung 4.18 zu sehen.

Die Drucksensoren basieren auf einem piezoresistiven Messprinzip. Sie enthalten eine Membran mit aufgetragenen elektrischen Widerständen. Über eine druckabhängige Verformung der Membran und der darauf eindiffundierten verformungsabhängigen Widerständen kommt es zur Ausbildung einer Widerstandsänderung aus welcher die Druckdifferenz zwischen den beiden Seiten der Membran berechenbar ist.

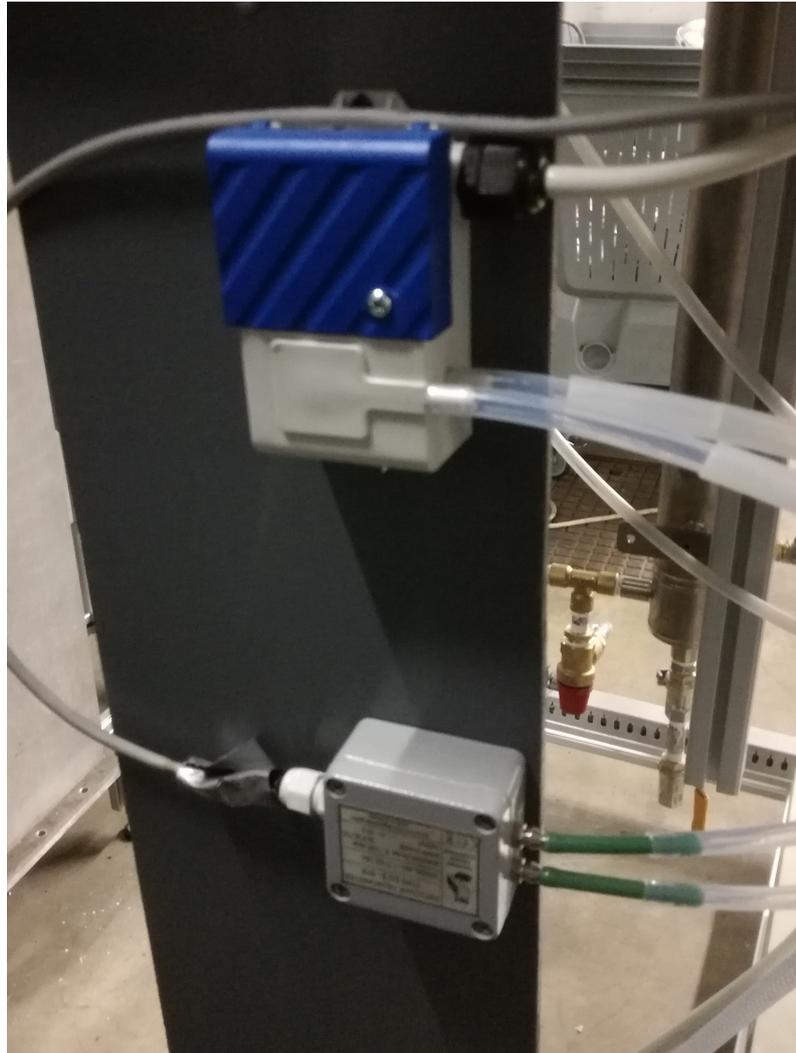


Abbildung 4.18: Differenzdruckaufnehmer Oben: Differenzdruckaufnehmer [Gems-Sensors] Unten: Differenzdruckaufnehmer [Kalinsky-Sensor-Elektronik]

### 4.3.5 Temperaturmessung

Die Temperaturmessung erfolgt mithilfe eines Thermoelementes vom Typ-K sowie eines Temperaturgebers von RS-Components mit der Modellbezeichnung 300TX (Abbildung 4.20).

Des Weiteren mussten noch mehrere ohmsche Widerstände eingebaut werden, über welchen die Spannungsmessung erfolgen konnte.

Mithilfe dieser Bauelemente ist es möglich Rohgastemperaturen zwischen 0 und 200°C zu erfassen.

Dazu wurde das Thermoelement etwa 5cm vom Filtermittelprüfling entfernt im Inneren des vertikalen Rohgaskanals (Abbildung 4.19) angebracht.

Für die Regelung der Heizmäntel ist diese Temperaturmessung im Rohgaskanal nicht relevant. Diese besitzen intern selbst einen Sensor und Regeln sich auf eine einstellbare Temperatur an der Oberfläche der Heizmäntel ein.

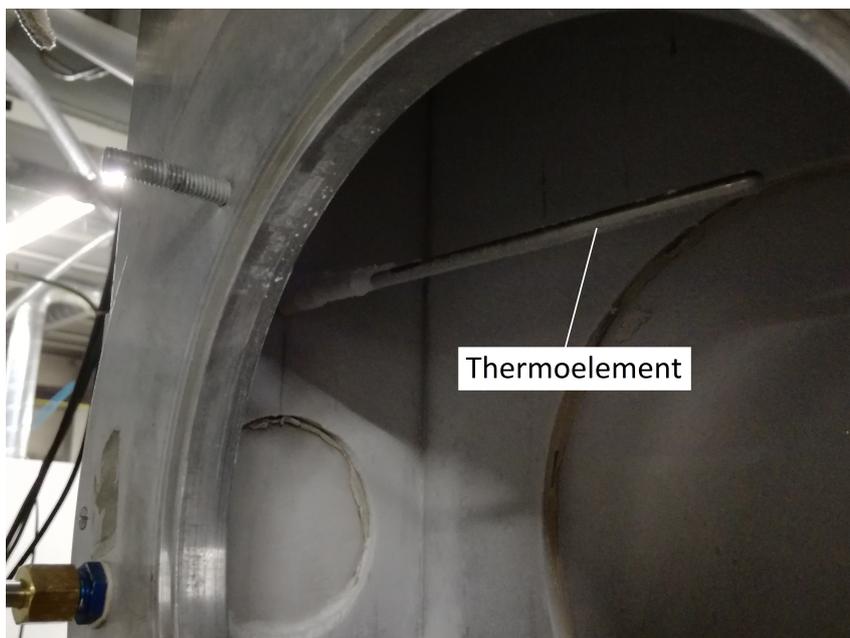


Abbildung 4.19: Thermoelement vom Typ-K im Inneren des Rohgaskanals

### 4.3.6 Steuerung der Abreinigung des Filtermittelprüfstandes

Für die Abreinigung wird ein 24V Magnetventil für 60 ms geöffnet.

Um dies zu ermöglichen, wurde aufgrund des geringen Steuerstromes der Messkarte eine sog. Treiberschaltung [Mikrocontroller-NET] verwendet, wie sie in Abbildung 4.21 zu sehen ist.



Abbildung 4.20: Schematisches Bild für den Temperaturreger 300TX [RS-Components, 2017]

Die Treiberschaltung ermöglicht es, durch Einsatz eines Mosfet, mithilfe von kleinen Spannungen von unter 5 Volt größere Spannungen, wie in diesem Fall 24 Volt, ohne Schaltstrom zu schalten.

Dies ist aufgrund der niedrigen verfügbaren Ströme der USB-Messkarte notwendig.

es lassen sich so Schaltzeiten von wenigen Millisekunden erzielen, womit die erforderliche 60ms Ventilöffnungszeit realisiert werden kann.

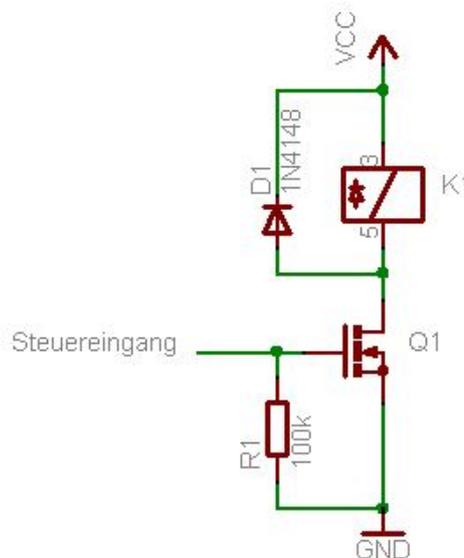


Abbildung 4.21: Treiberschaltung [Mikrocontroller-NET]

## 4.4 Teststaub und Filtermittel

Als Teststaub wurde der in DIN ISO 11057 [2012] vorgegebene Teststaub Pural NF [Standard-Groups] verwendet.

Als Filtermittel kam in allen Versuchen ein kalandriertes Polyimid-Nadelfiltz zum Einsatz.

### 4.4.1 Pural NF

Bei Pural NF handelt es sich um ein Pulver mit Hauptbestandteil Boehmite, einem Aluminiumoxidhydroxid Mineral. Laut Laserbeugungs-Messungen von Stecher [2014] ergaben sich die in Tabelle 4.1 angegebenen volumenbezogenen Partikelkenngrößen.

Die Partikelgrößenverteilung von Pural NF ist in Abbildung 4.22 dargestellt.

$d_{10,3}$	$\mu m$	1,6
$d_{50,3}$	$\mu m$	8,6
$d_{90,3}$	$\mu m$	32

Tabelle 4.1: Eigenschaften von Pural NF [Stecher, 2014]

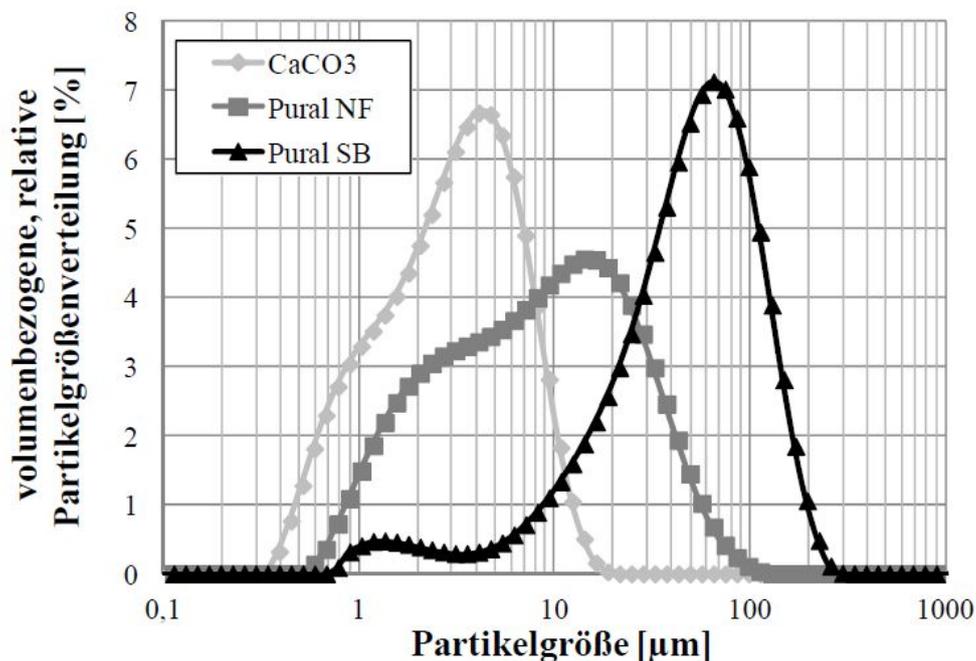


Abbildung 4.22: Volumengewichtete Partikelgrößenverteilung verschiedener Teststäube [Stecher, 2014]

## 4.4.2 Filtermittel

Als Filtermittel wurde für alle durchgeführten Versuche ein Polyimid - Nadelfilzfiltermedium mit kalandrierter Anströmseite verwendet, wie sie auch industriell eingesetzt werden. Die Eigenschaften sind aus Tabelle 4.2 zu entnehmen.

Das für den 140mm Filtermittelhalter zurecht geschnittene Filz ist in Abbildung 4.23 zu sehen.

Flächenmasse	$g/m^2$	520
Luftdurchlässigkeit bei 200 Pa	$l/(dm^2min)$	150
Ausrüstung	thermofixiert	kalandrierte Anströmseite

Tabelle 4.2: Eigenschaften des Polyimid-Nadelfilzes [Stecher, 2014]



Abbildung 4.23: Bestaubtes Nadelfilz nach dem Einsatz im Prüfstand

## 4.5 Kalibrierung und Anfahrverhalten

### 4.5.1 Kalibrierung des Staubdosierers

Der Staubdosierer (Kapitel 4.2.4) besitzt zwei Möglichkeiten der Einstellung. Ein Potentiometer zur Einstellung der Bandgeschwindigkeit, und ein Manometer mit Drosselventil zur Einstellung des treibenden Druckluftstromes.

Das Drosselventil wurde weit geöffnet, und somit vollständig überbrückt. Die Regelung des Gasvolumenstromes wurde stattdessen von einem Massflowcontroller übernommen. Es wurde an diesem 20 Norm l/min für alle Arbeitspunkte eingestellt.

Zur Kalibrierung der Potentiometer Einstellung und somit des Staubmassenstromes wurde ein Arbeitspunkt gewählt, d.h. ein entsprechender Luftvolumenstrom mithilfe der Pumpe durch die Apparatur gesaugt und eine bestimmte Gastemperatur mithilfe des Heizmantels eingestellt.

Anschließend wurde eine Potentiometereinstellung gewählt und der Staubdosierer eingeschaltet und die Filtration somit gestartet.

In der Messdatenerfassung wurde qualitativ festgestellt, ab welchem Zeitpunkt Kuchenfiltration vorliegt, also ein linearer Anstieg des Druckabfalles festzustellen war. Bei Erreichen dieses Zeitpunktes wurde die Messung unterbrochen und das Filtermittel samt Filtermittelhalter abgewogen.

Danach wurde die Filtration für 10-20 Minuten fortgesetzt und das Filtermittel abermals abgewogen.

Aus der Differenz der Massen und mithilfe der Messdauer wurde der Massenstrom an Teststaub, welcher sich am Filter absetzt, bestimmt.

Dies wurde für weitere Potentiometereinstellungen wiederholt und so eine Kalibrierkurve für einen Arbeitspunkt bestimmt.

Für jeden neuen Arbeitspunkt ist es notwendig eine neue Kalibrierkurve aufzuzeichnen, und es empfiehlt sich auch die durch die Kalibrierkurve gewonnene Einstellung vor dem Start jeder neuen Versuchsserie noch einmal experimentell zu überprüfen.

In Abbildung 4.24 sind die im Laufe dieser Arbeit gewonnenen Kalibrierkurven zu sehen. Manche davon bestehen nur aus wenigen Punkten, da es nur von Interesse war den Punkt 0,15 g/min zu erreichen, da dieser Massenstrom bei der vorhandenen Filterfläche den Vorgaben der DIN ISO 11057 [2012] genügt.

Bei den Messungen die in Abbildung 4.24 mit einem Stern gekennzeichnet sind, wurde der Norm-Volumenstrom (Volumenstrom bei Normalbedingungen:  $T=0^{\circ}\text{C}$   $p=101325\text{ PA}$ ) reduziert, um am Filtermedium auch bei höheren Gastemperaturen den gleichen realen Volumenstrom wie bei Raumtemperatur zu erhalten.

Während die Kurven bei denen der Norm-Volumenstrom nicht reduziert wurde

gleichen, benötigen die Einstellungen mit reduziertem Norm-Volumenstrom (Gleichung 6.1) eine viel höhere Bandgeschwindigkeit.

Eine Erklärung hierfür ist, dass bei den erhöhten Temperaturen es durch den Kamineffekt einen zusätzlichen Auftrieb im vertikalen Rohgaskanal gibt.

Dieser könnte dazu führen, dass etwas Staub im oberen Teil des Rohgaskanals aus der Apparatur entweicht, als dies bei den nicht reduzierten Norm-Volumenströmen der Fall ist und dadurch eine größere Staubmenge vom Dosierer bereitgestellt werden muss, um die erforderlichen Massenströme zu erreichen.

Bei der Messung mit gleichem Norm-Volumenstrom scheint sich dieser Effekt durch den, durch die erhöhte Temperatur bedingten erhöhten realen Volumenstrom auszugleichen.

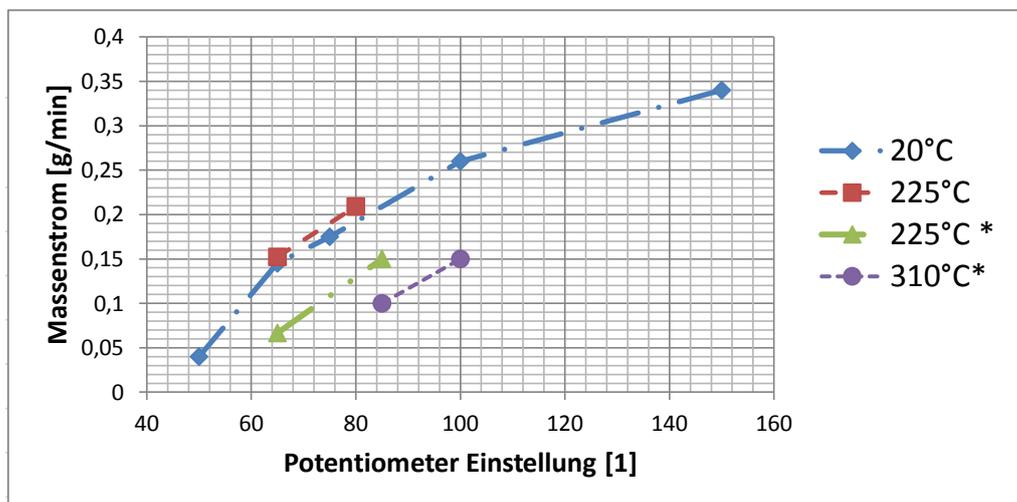


Abbildung 4.24: Kalibrierpunkte für Raumtemperatur (20°C) sowie für die Heizmantel Temperaturen 225°C und 310°C. Stern symbolisiert Anpassung des Volumenstromes an die Temperatur vor dem Filtermedium

#### 4.5.2 Temperaturentwicklung beim Anfahren des Prüfstandes

Aufgrund der großen Masse des Rohgaskanals, sowie der Beheizung nur eines kleinen Abschnittes von diesem, kommt es zu einer erheblichen Anlaufzeit für Experimente bei höheren Temperaturen.

Die Anlaufzeit wurde für zwei Heizmantel Temperaturen, 225°C und 310°C, beim gleichen normalisierten Volumenstrom ermittelt.

Zur Bestimmung wurde am Massflowcontroller 30 l/min eingestellt und die Apparatur ohne Einschalten des Staubdosierers in Betrieb genommen.

Die Temperatur wurde währenddessen jede Sekunde von der Messsoftware am Messpunkt unmittelbar vor dem Filtermittel aufgezeichnet.

Es zeigte sich, dass die Einstellung einer bestimmten Temperatur am Heizmantel ungefähr einer Gastemperatur entspricht die halb so hoch ist. Für eine Heizmantel Temperatur von  $225^{\circ}\text{C}$  ergab sich eine Gastemperatur von ca.  $115^{\circ}\text{C}$  (Abbildung 4.25), und für eine Heizmantel Temperatur von  $310^{\circ}\text{C}$  ergab sich eine Gastemperatur von ca.  $145^{\circ}\text{C}$  (Abbildung 4.26).

Es zeigte sich, dass eine Aufheizzeit von einer bis zwei Stunden eingeplant werden muss, um die notwendige Gastemperatur zu erreichen.

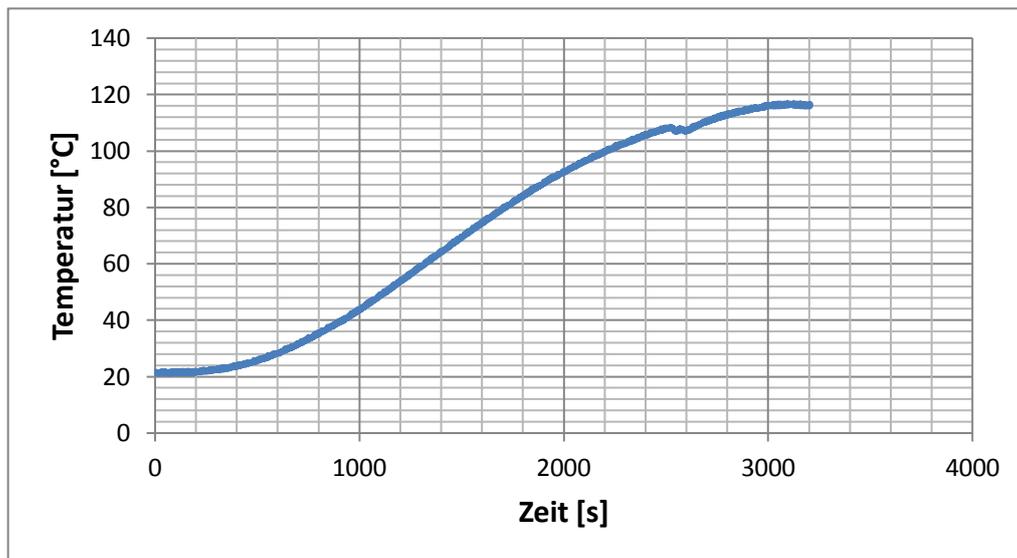


Abbildung 4.25: Temperaturverlauf beim Anfahren der Apparatur mit  $225^{\circ}\text{C}$  Heizmanteltemperatur und  $30\text{ l/min}$  Luftvolumenstrom

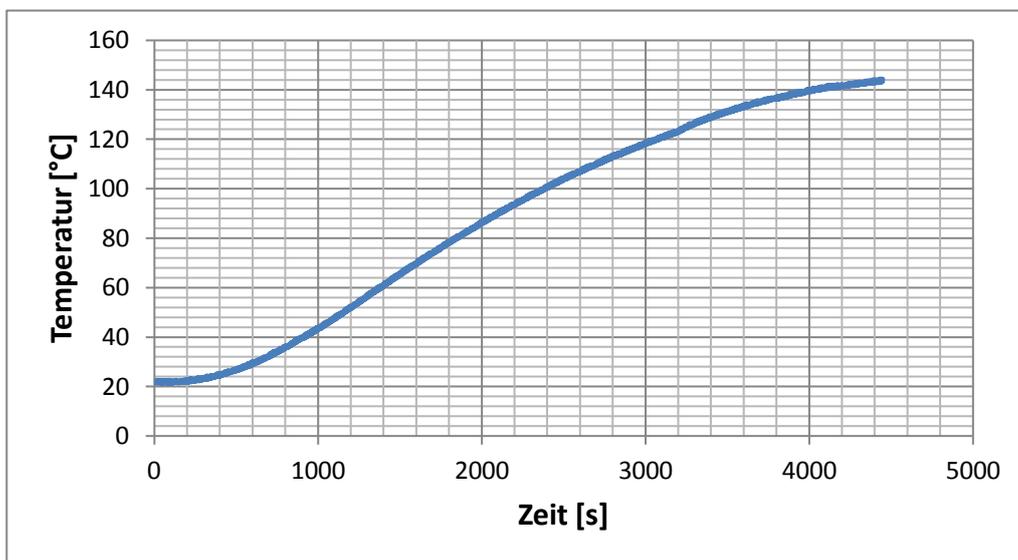


Abbildung 4.26: Temperaturverlauf beim Anfahren der Apparatur mit 310°C Heizmanteltemperatur und 30 l/min Luftvolumenstrom

# Kapitel 5

## Alterungsversuch bei Raumtemperatur

Bevor Versuche mit erhöhter Temperatur durchgeführt wurden, sollte die Funktionalität der Anlage bei Raumtemperatur überprüft werden. Angelehnt an DIN ISO 11057 [2012] und [VDI 3926, 2004] sollte dazu bei Raumtemperatur ein kompletter Alterungsversuch mit über 2500 Abreinigungszyklen durchgeführt werden.

### 5.1 Versuchsdurchführung

Zur Durchführung eines Alterungsversuches muss zuerst die Anlage auf die richtigen Versuchsparameter eingestellt werden.

Hierfür gibt die Norm Werte vor, welche in Tabelle 5.1 zu finden sind. Filtermittelanströmgeschwindigkeit und Rohgasstaubkonzentration sind nicht direkt einstellbar, sondern müssen über den Trägergasvolumenstrom und über den Massenstrom an Teststaub eingestellt werden.

Mit der Geometrie der Anlage ergeben sich für Volumenstrom und Massenstrom die Werte, welche in Tabelle 5.2 zu sehen sind.

Der Volumenstrom kann direkt an der Steuereinheit der Massflowcontroller eingestellt werden, der Massenstrom an Staub hingegen muss über die Bandgeschwindigkeit des Staubdosierers eingestellt werden.

Nach Einstellung von Tankdruck, Volumen- und Massenstrom, sowie am PC in der

Anströmgeschwindigkeit	$m/min$	2
Staubkonzentration	$g/m^3$	5
Prüfstaub	•	Pural NF
Tankdruck	bar	5
Ventilöffnungszeit	ms	60
Differenzdruck vor Abreinigung	Pa	1000
Anzahl der zeitgesteuerten Zyklen	•	2500
Abreinigungsintervall	s	20

Tabelle 5.1: Versuchsparameter für Alterungsversuche laut DIN ISO 11057 [2012]

Filterrondendurchmesser	m	0,140
Durchströmbare Filterfläche	$m^2$	0,0154
Volumenstrom an Trägergas	l/min	30,8
Staubmassenstrom	g/min	0,154

Tabelle 5.2: Berechnete Versuchsparameter für Alterungsversuche und geometrische Kennzahlen der Anlage

Steuersoftware Einstellung der Ventilöffnungsdauer und Zyklusdauer kann mit der Versuchsdurchführung begonnen werden.

Zuerst wird die Messung am PC auf Drucksteuerung geschaltet und anschließend die Datenaufzeichnung gestartet.

Nun können Pumpe und Staubdosierer eingeschaltet werden und die Messung läuft automatisch ab.

Nach Erreichen von 30 Zyklen mit druckgesteuerter Abreinigung wird im Programm auf Zeitsteuerung umgeschaltet. Dadurch werden 2500 Zyklen zu je 20 Sekunden durchlaufen.

Abschließend werden durch erneutes Umschalten auf Drucksteuerung noch einmal 30 Zyklen durchlaufen.

Die gewonnenen Daten werden in einem Textdokument abgespeichert und können problemlos mit handelsüblichen Tabellenkalkulationsprogrammen ausgewertet werden.

Die zeitlichen Druckverlustkurven wurden für alle drei Messserien in Abbildung 5.1, Abbildung 5.2 und Abbildung 5.3 dargestellt.

Bei den druckgesteuerten Zyklen in Abbildung 5.1 und 5.3 sind negative Werte für den Druckverlust zu erkennen. Diese Werte ergeben sich durch den Druckluftsimpuls, welcher einen Überdruck im Reingaskanal erzeugt um den Kuchen abzuwerfen.

Für die Auswertung wird deshalb der Wert 2 Sekunden nach der Abreinigung als Restdruckverlust aufgezeichnet, um den Einfluss des Abreinigungsimpulses zu vermeiden.

Die Druckverlustkurve für die 2500 Zyklen der zeitgesteuerten Alterung ist in Abbildung 5.2 zu sehen. Hier wurden bereits die negativen Ausschläge des Druckverlustes entfernt, um einen Trend in den Restdruckverlusten nach der Abreinigung zu erkennen.

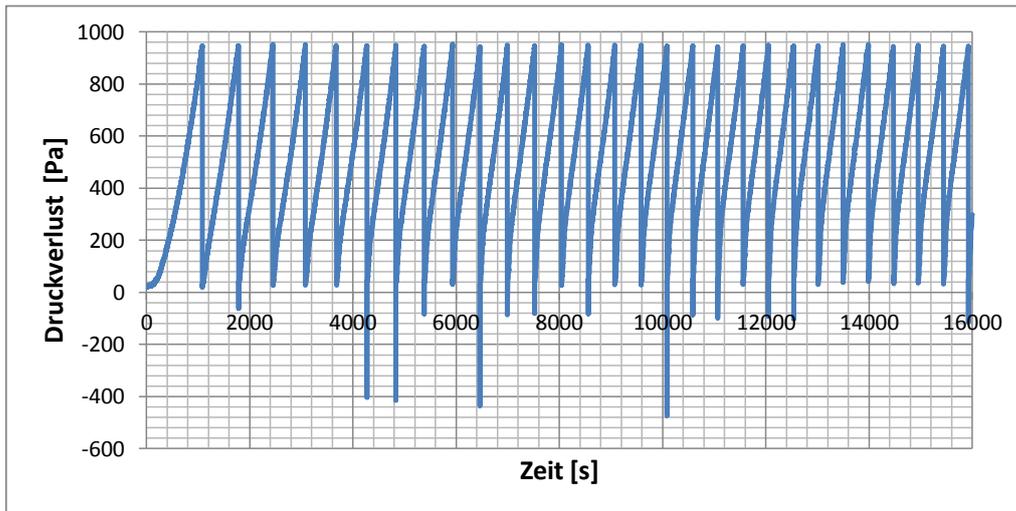


Abbildung 5.1: Zeitlicher Druckverlustverlauf für die Zyklen vor der Alterung

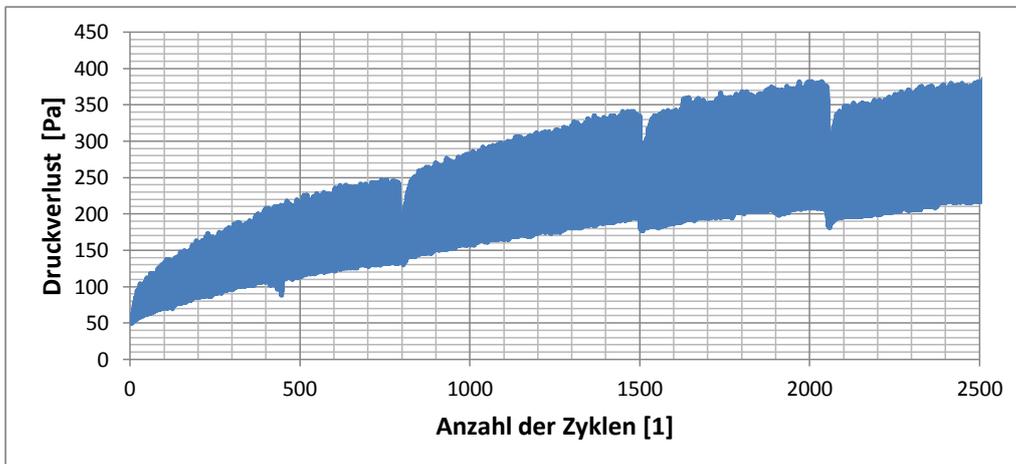


Abbildung 5.2: Druckverlust als Funktion der Zyklenzahl für die Zyklen während der Alterung

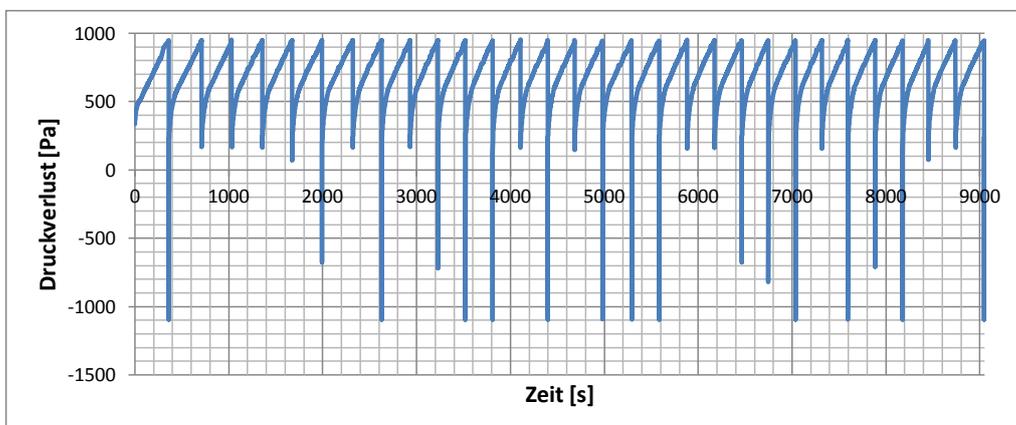


Abbildung 5.3: Zeitlicher Druckverlustverlauf für die Zyklen nach der Alterung

## 5.2 Auswertung und Darstellung der Ergebnisse

### 5.2.1 Zyklen vor der Alterung

Um einen Vergleich mit dem gealterten Zustand des Filtermittels ziehen zu können wurden 30 Zyklen mit dem neuem Filtermittel gefahren.

In diesen ersten 30 Zyklen des Versuches wurde mit druckgesteuerter Abreinigung gearbeitet, d.h. es wird bis 950 Pa (Die Normvorgabe wäre 1000 Pa, aber das Messintervall des verbauten Differenzdruckaufnehmer endet bereits bei etwa 980 Pa) filtriert, bevor die Abreinigung erfolgt und ein neuer Zyklus beginnt.

Von Interesse waren bei diesen ersten 30 Zyklen vor allem der Anstieg des Restdruckverlustes und die Abnahme der Zyklusdauer. In Abbildung 5.4 wurden beide Kennwerte für jeden Zyklus dargestellt.

Man erkennt, dass der Restdruckverlust von Zyklus zu Zyklus deutlich ansteigt. Der Anstieg ist darauf zurückzuführen, dass in einem neuen Filtermittel noch kein Staub eingelagert ist, und somit noch große Hohlräume innerhalb des Filtermittels zur Verfügung stehen, welche durch Tiefenfiltration erst befüllt werden müssen.

Der erste (sehr hohe) Wert für die Zyklusdauer ist auf die Totzeit beim Einschalten des Staubdosierers zurückzuführen. Danach sinkt die Zyklusdauer, wie zu erwarten ist, kontinuierlich ab. Die Totzeit ist jene Zeit die beim Start der Anlage benötigt wird bis eine gleichmäßige Staubkonzentration im gesamten Rohgaskanal vorhanden ist.

Die Steigung des Abfalles wird im Verlauf der Zyklen immer geringer, mit einem Ende der Abnahme ist jedoch erst dann zu rechnen, wenn das Filtermedium vollständig verstopft ist.

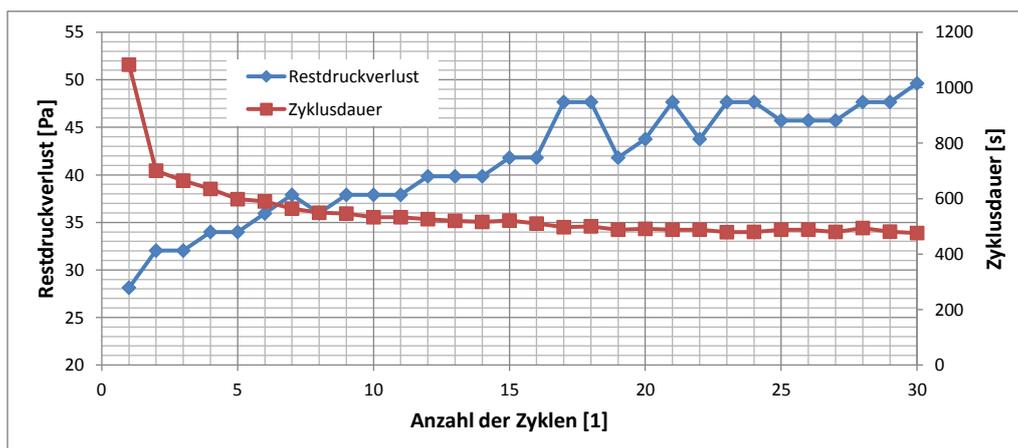


Abbildung 5.4: Restdruckverluste und Zklusdauern als Funktion der Zyklenzahl bei druckgesteuerten Betrieb vor der Alterung; bei Raumtemperatur

Wie bereits erwähnt sind am Beginn der Filtration noch viele große Hohlräume im Filtermittel frei, und es ist demnach mit Tiefenfiltration zu rechnen.

In den zeitlichen Druckverlustkurven über das Filtermittel kann man die Phase der Tiefenfiltration auch erkennen, bei dieser, wie auch in Kapitel 3.3.2 beschrieben, kommt es zuerst zu einem langsamen Anstieg des Druckverlustes, welcher in den für Kuchenfiltration kennzeichnenden linearen Anstieg übergeht. In Abbildung 5.5 ist ein Ausschnitt aus dem dritten Zyklus zu sehen, bei welchem man den Übergang zwischen Tiefen- und Kuchenfiltration im Bereich zwischen 20-40 Sekunden erkennen kann.

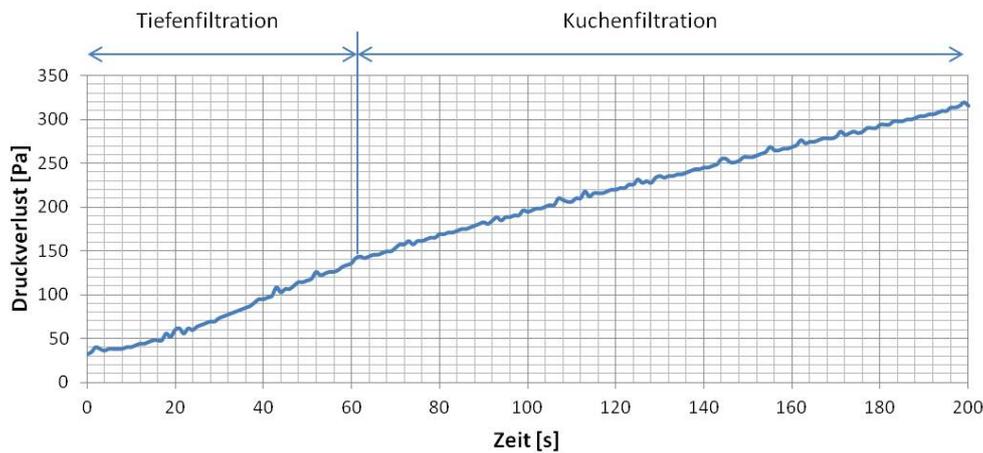


Abbildung 5.5: Zeitlicher Druckverlust über das Filtermedium beim 3. Zyklus vor der Alterung; bei Raumtemperatur

Während des letzten der 30 Zyklen kann man im zeitlichen Druckverlustverlauf (Abbildung 5.6) neben einem sehr kurzem Abschnitt Tiefenfiltration auch schon Patchycleaning beobachten.

Beim Patchycleaning, also unvollständiger Abreinigung, gibt es für das Aerosol bevorzugte Wege durch das Filtermittel was zu einer kleineren wirksamen Filterfläche führt bis wieder alle Wege gleichmäßig verstopft sind und es zur Kuchenfiltration kommt.

Im Diagramm ist das Patchycleaning durch einen schnellen Anstieg des Druckverlustes vorm linearen Anstieg der Kuchenfiltration zwischen 20-60 Sekunden gekennzeichnet.

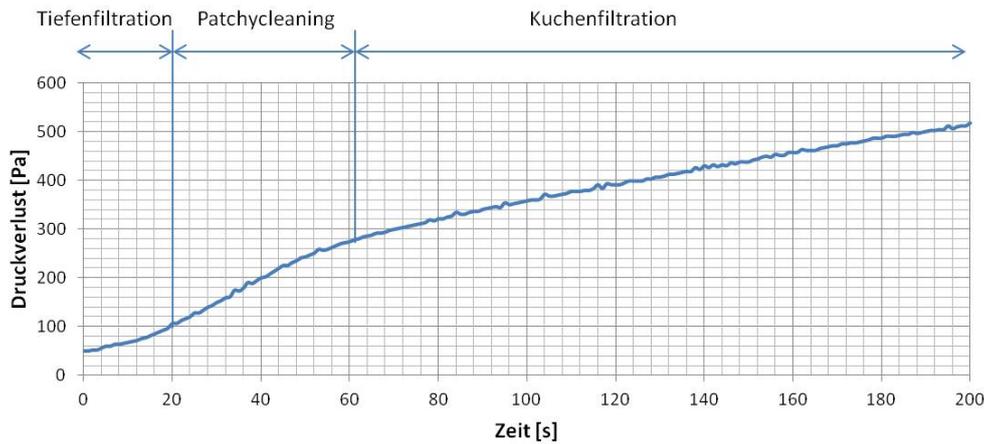


Abbildung 5.6: Zeitlicher Druckverlust über das Filtermedium beim 30. Zyklus vor der Alterung; bei Raumtemperatur

## 5.2.2 Alterung des Filtermittels

Nach den ersten 30 Zyklen wird auf eine zeitgesteuerte Abreinigung umgeschaltet. Es wird nun 2500 mal alle 20 Sekunden abgereinigt. Dies führt zu einer häufigen wechselnden mechanischen Beanspruchung des Filtermittels, aber lässt dem Filtrationsvorgang genügend Zeit um ausreichend Staub anzufiltrieren um einen Kuchen zu bilden. Dadurch soll eine dem industriellen Einsatz ähnliche Abnutzung des Filtermittels erreicht werden.

Abbildung 5.7 zeigt die Restdruckverluste nach den Abreinigungen, bzw. die Druckverlust unmittelbar vor den Abreinigungen des Filtermittels.

Beide Kurven weisen ein streng monoton steigendes Verhalten auf, wobei die Kurven mit zunehmender Zykluszahl immer weiter abflachen.

Die drei Zacken im maximalen Druckverlustverlauf sind auf Unterbrechungen der Filtration und erneutes Anfahren zurückzuführen. Der Staubkanal weist bei einem erneutem Start eine gewisse Totzeit bis zum Erreichen voller Staubkonzentration am Filter auf, wodurch es anfangs zu kleineren Druckverlusten kommt.

Nach den ersten beiden Neustarts wurden die maximalen Werte vor dem Neustart nach einigen Zyklen wieder erreicht. Beim letzten Neustart hingegen konnten die Werte erst gegen Ende des Experiments wieder erreicht werden.

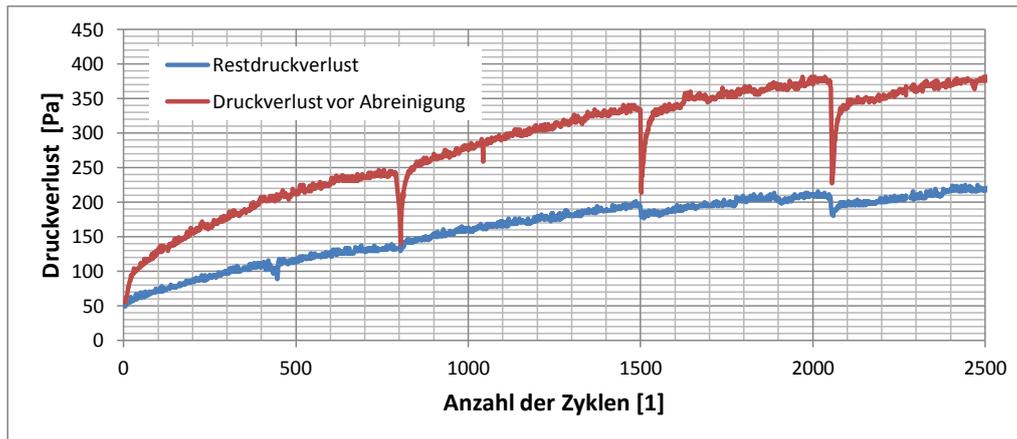


Abbildung 5.7: Maximaler Druckverlust vor der Abreinigung und Restdruckverlust nach der Abreinigung als Funktion der Zyklenzahl bei der Alterung; bei Raumtemperatur

### 5.2.3 Zyklen nach der Alterung

Um einen Vergleich mit dem neuwertigen Filtermittel machen zu können, wurden nach der Alterung erneut 30 Zyklen mit druckgesteuerter Abreinigung bis 950 Pa durchlaufen.

In Abbildung 5.8 wurde wie zuvor für die Zyklen vor der Alterung Zyklusdauer und Restdruckverlust über der Anzahl der durchlaufenen Zyklen aufgetragen.

Der Restdruckverlust blieb über alle 30 Zyklen annähernd konstant, was auch zu erwarten ist, da das Filtermittel bereits über 2500 Zyklen durchlaufen hat und 30 weitere keinen großen Einfluss haben sollten.

Am Ende der Zyklen vor der Alterung hatte der Druckverlust in etwa einen Wert von 50 Pa. Dieser ist durch die Alterung auf das fast Fünffache, auf Werte rund um 240 Pa angestiegen.

Die Zyklusdauer blieb ebenfalls über die 30 Zyklen relativ konstant und hat sich mit Werten rund um 300 Sekunden nicht ganz halbiert im Vergleich zu vor der Alterung.

In Abbildung 5.9 wurde wie bei den Zyklen vor der Alterung der zeitliche Verlauf des Druckverlustes über das Filtermedium für den 3. und den 30. Zyklus dargestellt. Am Beginn der Zyklen ist keine Tiefenfiltration mehr zu erkennen. Der Druckverlust steigt sofort stark an und geht nach etwa 60 Sekunden in einen linearen Anstieg über, es liegt also Patchycleaning mit anschließender Kuchenfiltration vor.

Weiters ist zu erkennen, dass sich 3. und 30. Zyklus fast gar nicht mehr unterscheiden. Wie am Anfang des Kapitels bereits erwähnt wurde ist das auch zu erwarten, da das Filtermittel bereits über 2500 Zyklen zuvor durchlaufen hat.

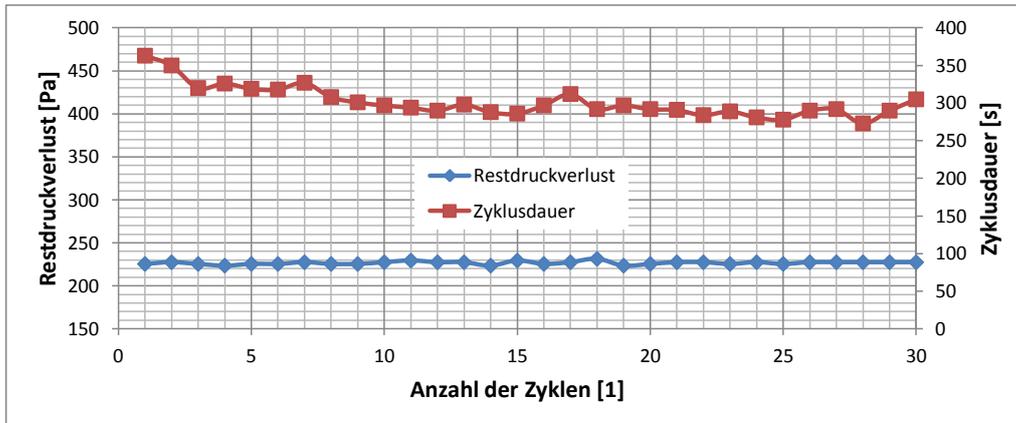


Abbildung 5.8: Restdruckverluste und Zklusdauern als Funktion der Zyklenzahl bei Druckgesteuerten Betrieb nach der Alterung; bei Raumtemperatur

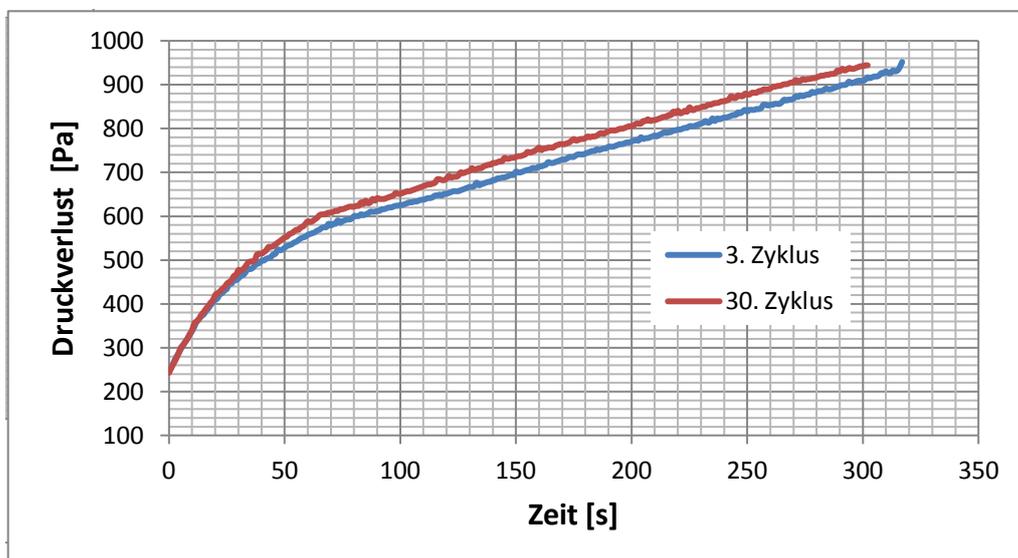


Abbildung 5.9: Zeitlicher Druckverlustverlauf beim 3. und beim 30. Zyklus nach der Alterung; bei Raumtemperatur

# Kapitel 6

## Auswirkung der Trägergastemperatur auf die Alterung von abreinigbaren textilen Filtermitteln

Um die Auswirkung der Temperatur auf die Alterung von Filtermitteln zu untersuchen wurden mehrere Versuche mit Parametervariation durchgeführt.

So wurde zuerst eine Serie bei gleichem Trägergasmassenstrom wie bei der kalten Alterung, aber mit erhöhter Temperatur, durchgeführt und mit den Zyklen vor der Alterung aus dem Versuch aus Kapitel 5.2.1 verglichen.

Anschließend wurden zwei weitere Versuche mit dem gleichen Volumenstrom über das Filtermedium, aber mit unterschiedlicher Gastemperatur, durchgeführt.

### 6.1 Filtermittelalterung bei erhöhter Trägergastemperatur und konstanten Trägergasmassenstrom

Um die Auswirkung der Temperatur auf die Alterung zu untersuchen, wurden analog zum Beginn eines Alterungsversuches 30 Zyklen mit druckgesteuerter Abreinigung und neuem Filtermittel durchgeführt.

Anders als beim Alterungsversuch wurde nun zusätzlich der Heizmantel eingeschaltet und auf eine Manteltemperatur von 225°C gestellt. Diese Einstellung ergab eine Trägergastemperatur von etwa 120°C (siehe Kapitel 4.5.2).

Der Massflowcontroller misst den Massenstrom, gibt diesen aber in Form eines Volumenstromes bei Normalbedingungen an. Um den gleichen Massenstrom wie beim Alterungsversuch zu erhalten, muss der selbe Normvolumenstrom eingestellt werden ( $\dot{V} = 30,8$  Norm l/min).

Es ist aber zu beachten, dass die erhöhte Trägergastemperatur bei gleichem Massenstrom wie beim Alterungsversuch in einen höheren realen Volumenstrom über das Filtermittel resultiert.

Der so erhaltene zeitliche Druckverlustverlauf ist in Abbildung 6.1 zu sehen. Die negativen Werte am Ende eines Zyklus sind, wie auch zuvor beim Alterungsversuch zu sehen, durch den Druckstoß der Abreinigung bedingt.

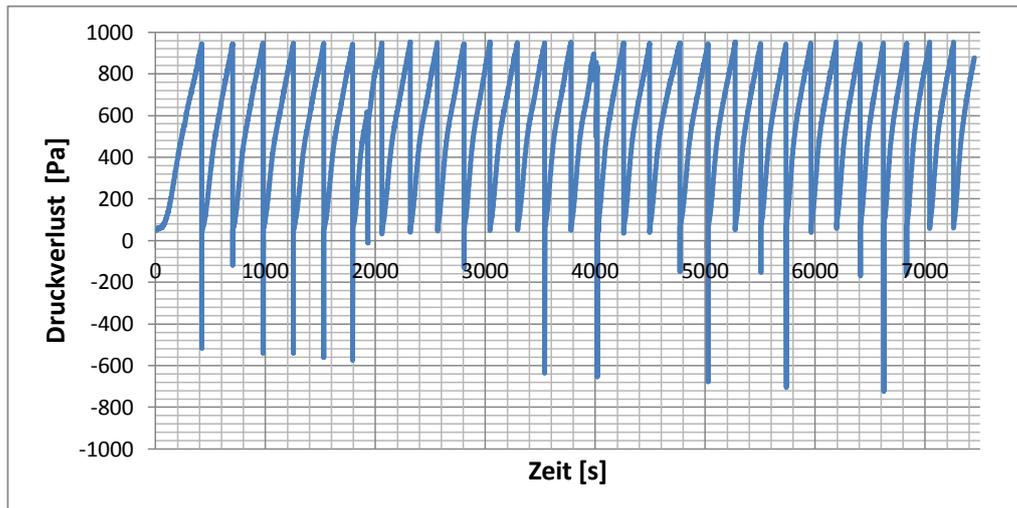


Abbildung 6.1: Zeitlicher Druckverlustverlauf über das Filtermittel für die Messung bei 120°C

Mithilfe der Daten von den Zyklen vor der Alterung aus dem vorherigen Kapitel wurden die Auswertungen 6.2 und 6.3 erstellt.

Im Vergleich zu den Zyklen bei Raumtemperatur, kann man in Abbildung 6.2 sofort erkennen, dass der Restdruckverlust bei Gastemperatur 120°C wesentlich höher als bei Raumtemperatur ist.

Für die Zyklusdauer verhält es sich umgekehrt, sie ist bei 120°C nur annähernd halb so lang wie bei Raumtemperatur (Abbildung 6.3).

Eine wahrscheinliche Erklärung für den erhöhten Restdruckverlust ist der durch die Temperatur erhöhte Volumenstrom durch das Filtermedium. Mit der idealen Gasgleichung kann man vereinfacht mit Gleichung 6.1 den Normalvolumenstrom umrechnen auf den tatsächlichen Volumenstrom durch das Filtermedium.

Man sieht das der reale Volumenstrom ca. 40% über dem des Normvolumenstromes liegt.

$$\dot{V}_{120^{\circ}C} = \dot{V}_{Normal} \cdot \frac{273,15 + 120}{273,15} = 30,8 \cdot \frac{393,15}{273,15} = 44,3l/min \quad (6.1)$$

Sieht man sich die Filtergleichung 3.4 aus dem Kapitel 3.3.3 an, erkennt man, dass der Volumenstrom quadratisch in die Gleichung des Druckverlustes eingeht, was den

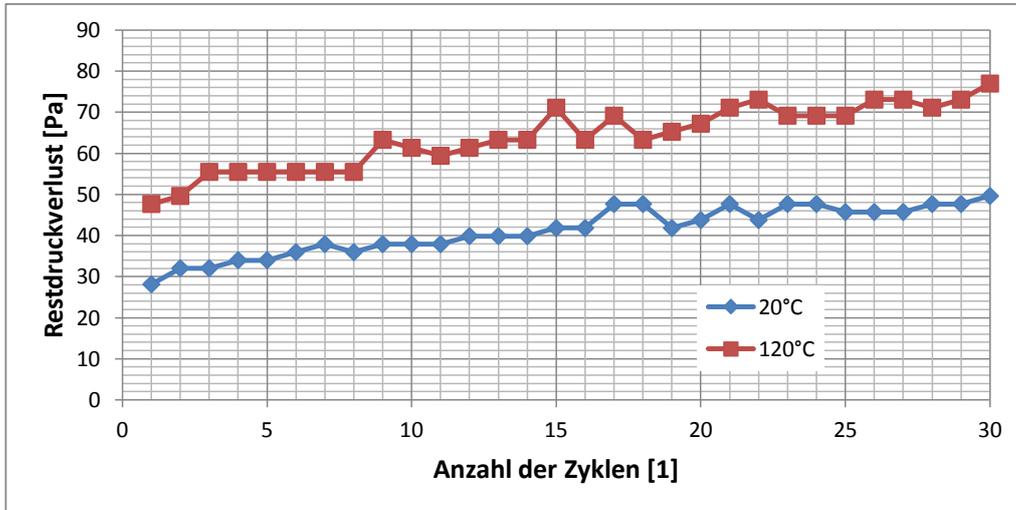


Abbildung 6.2: Restdruckverluste als Funktion der Zyklenzahl; bei Raumtemperatur (20°C) und bei 120°C

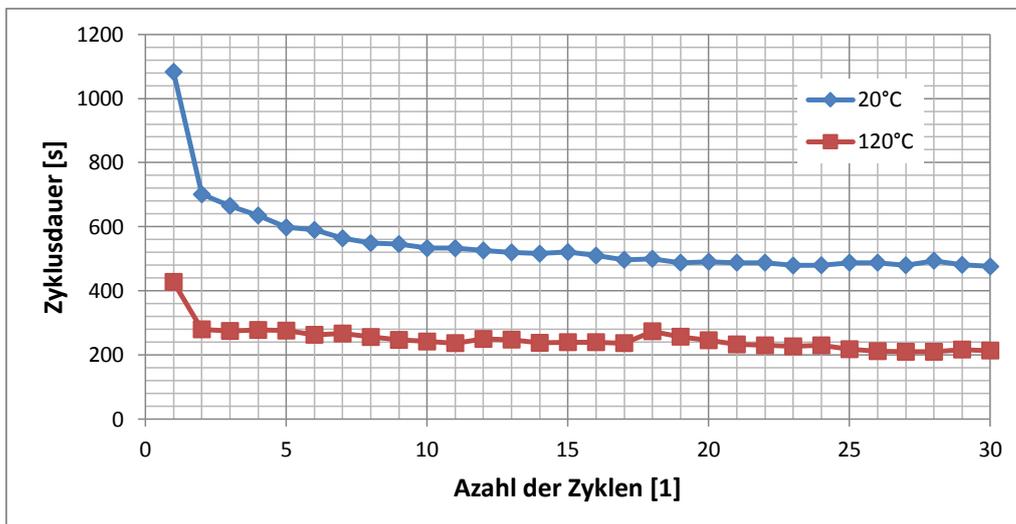


Abbildung 6.3: Zyklusdauer als Funktion der Zyklenzahl; bei Raumtemperatur (20°C) und bei 120°C

erhöhten Druckverlust bei 120°C erklären würde.

Mithilfe der Filtergleichung 3.4 kann man auch den spezifischen Filterkuchenwiderstand  $\alpha_m$  sowohl für den kalten (20°C) als auch für den heißen (120°C) Versuch ermitteln, und somit Änderungen in den Kucheneigenschaften bei der erhöhten Temperatur untersuchen.

Es ist jedoch zu beachten, dass die Filtergleichung nur für die im Kapitel 3.3.3 angegebenen Bedingungen gültig ist.

Um dennoch verwertbare Ergebnisse aus den Messdaten zu bekommen, wurde nur der Bereich der Kuchenfiltration zur Auswertung herangezogen. Es wurden also in etwa die ersten 20 Sekunden eines Zyklus nicht ausgewertet.

In Tabelle 6.1 sind die experimentell bestimmten spezifischen Kuchenwiderstände  $\alpha_m$  für ausgewählte Zyklen aus heißer und kalter Versuchsführung exemplarisch angeführt.

Während sich die Werte zwar unterscheiden, befinden sie sich dennoch alle in einem engen Intervall. Besonders bei den 30. Zyklen, welche am vertrauenswürdigsten sind, da nur mehr geringe Tiefenfiltration erkennbar ist, gibt es nur einen Unterschied von etwa 10% zwischen kalter und warmer Messung.

Neben möglichen Messungenauigkeiten könnte vor allem die Einstellung des korrekten Staubmassenstroms, welche bedingt durch die Messauflösung der verwendeten Waage, zu Fehlern führen.

Trärgasttemperatur	20°C	120°C
Volumenstrom [l/min]	33,06	44,11
dynamische Viskosität [ $10^{-5}$ Pa s]	1,823	2,271
3. Zyklus $\alpha_m$ [ $10^{10}$ m/kg]	1,259	1,555
15. Zyklus $\alpha_m$ [ $10^{10}$ m/kg]	1,425	1,598
30. Zyklus $\alpha_m$ [ $10^{10}$ m/kg]	1,457	1,695

Tabelle 6.1: Spezifischer Filterwiderstand  $\alpha_m$  [m/kg] ausgewählter Zyklen bei Raumtemperatur und bei 120°C

Aufgrund der ähnlichen  $\alpha_m$  Werte, scheint es im vorliegenden Fall möglich zu sein, gute Abschätzungen über den Druckverlust bei höheren Temperaturen mithilfe der Filtergleichung 3.4 und einer Messung bei Raumtemperatur machen zu können.

## 6.2 Filtermittelalterung bei erhöhter Trägergastemperatur und konstanten Volumenstrom

Wie man in der Filtrationsgleichung 3.4 erkennen kann, ist der Druckverlust über das Filtermittel quadratisch vom Volumenstrom abhängig.

Um mögliche andere beeinflussende Faktoren oder Phänomene besser beobachten zu können, wurden Alterungsversuche bei höherer Temperatur, aber bei annähernd gleichem Volumenstrom über das Filtermedium, durchgeführt.

Dazu wurde der durch die Heizung erhöhte Trägergasvolumenstrom durch Herunterregeln mittels Massflowcontrollers kompensiert (Der benötigte Volumenstrom wurde mit dem idealen Gasgesetz analog zu Gleichung 6.1 berechnet).

Es wurden druckgesteuerte Zyklen bei einer Manteltemperatur von 225°C, welche in eine Gastemperatur von 110°C resultierte, sowie bei einer Manteltemperatur von 310°C, welche in 145°C Gastemperatur resultierte, durchgeführt. Eine Übersicht über die Prozessgrößen zeigt Tabelle 6.2.

Manteltemperatur [°C]	Trägergastemperatur [°C]	$\dot{V}$ [l/min]	Norm- $\dot{V}$ [Norm l/min]
20	20	33,06	30,80
225	110	30,86	22
310	145	30,69	20

Tabelle 6.2: Ausgewählte Prozessgrößen bei den Filtermittelalterungen mit kompensiertem Volumenstrom

Mit diesen Einstellungen wurden die Druckverlustverläufe aus Abbildung 6.4 und Abbildung 6.5 experimentell gewonnen.

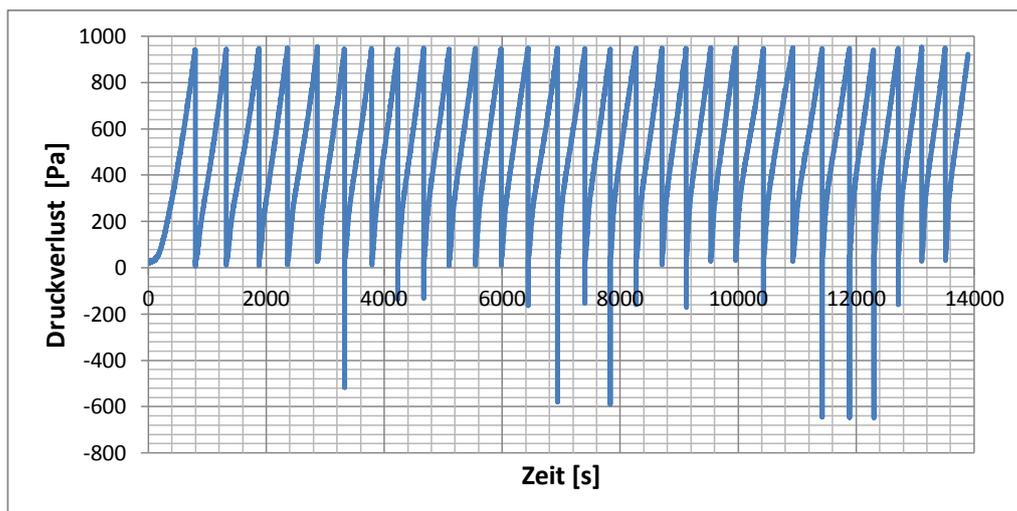


Abbildung 6.4: Zeitlicher Druckverlustverlauf über das Filtermittel für die Messung bei 110°C und kompensiertem Volumenstrom

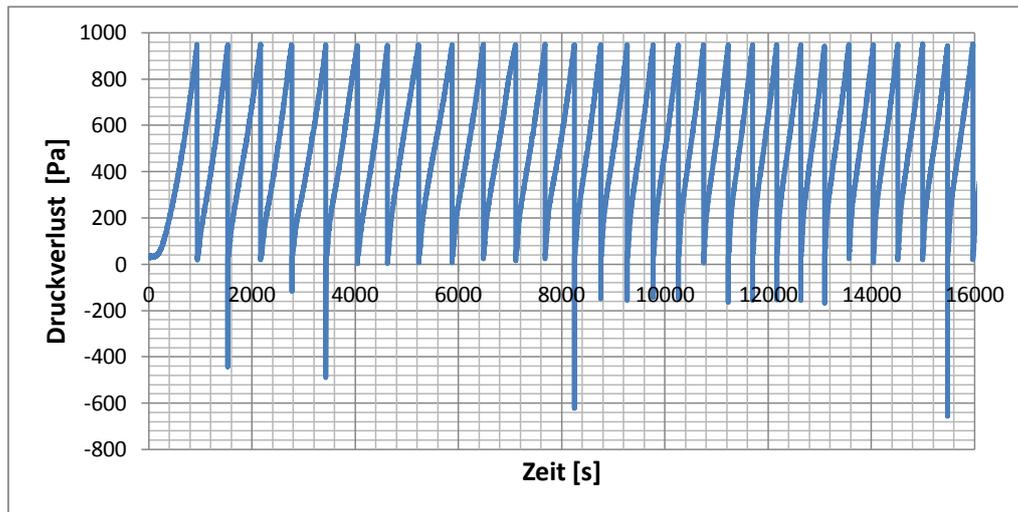


Abbildung 6.5: Zeitlicher Druckverlustverlauf über das Filtermittel für die Messung bei 145°C und kompensiertem Volumenstrom

Die aus den Rohdaten gewonnenen Restdruckverluste und Zyklusdauern sind in Abbildung 6.6 und Abbildung 6.7 gemeinsam mit den Daten aus den Zyklen vor der Alterung bei Raumtemperatur zu sehen. Wie zu erkennen ist, zeigen die Kurven einen sehr ähnlichen Verlauf.

Während es zwar im Diagramm so aussieht, als ob der Restdruckverlust mit steigender Temperatur sinken würde, würde man durch Gleichung 3.4 und der durch die Temperatur erhöhten Viskosität eher mit dem Gegenteil rechnen.

Es ist jedoch zu bedenken, dass die Werte alle knapp beisammen liegen und der Volumenstrom bei 20°C etwas höher liegt.

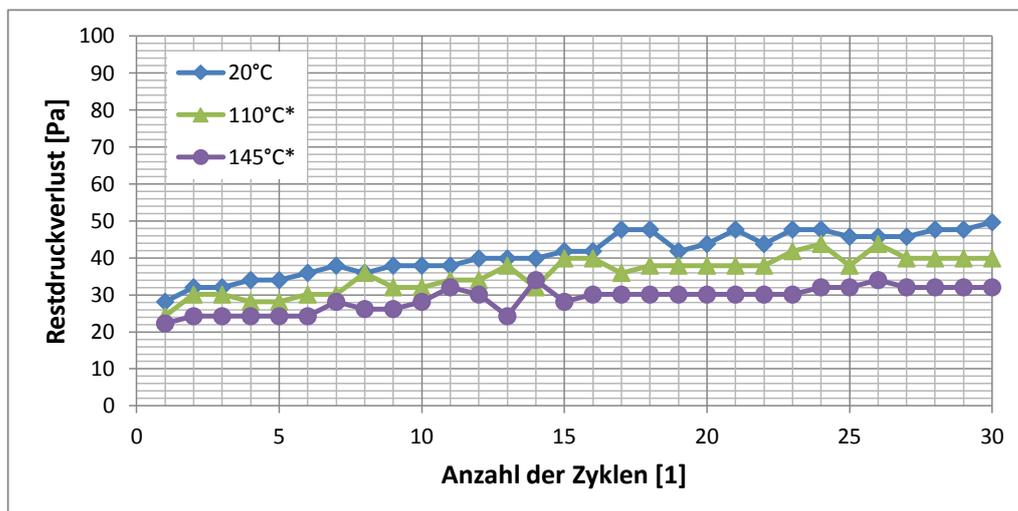


Abbildung 6.6: Restdruckverluste als Funktion der Zyklenzahl; bei Raumtemperatur (20°C); bei 110°C  $\dot{V}$  kompensiert; und bei 145 °C  $\dot{V}$  kompensiert

Bei den spezifischen Kuchenwiderständen  $\alpha_m$  für ausgewählte Zyklen, welche in Tabelle 6.3 zu finden sind, kann man wieder, mit Ausnahme der Messungen bei

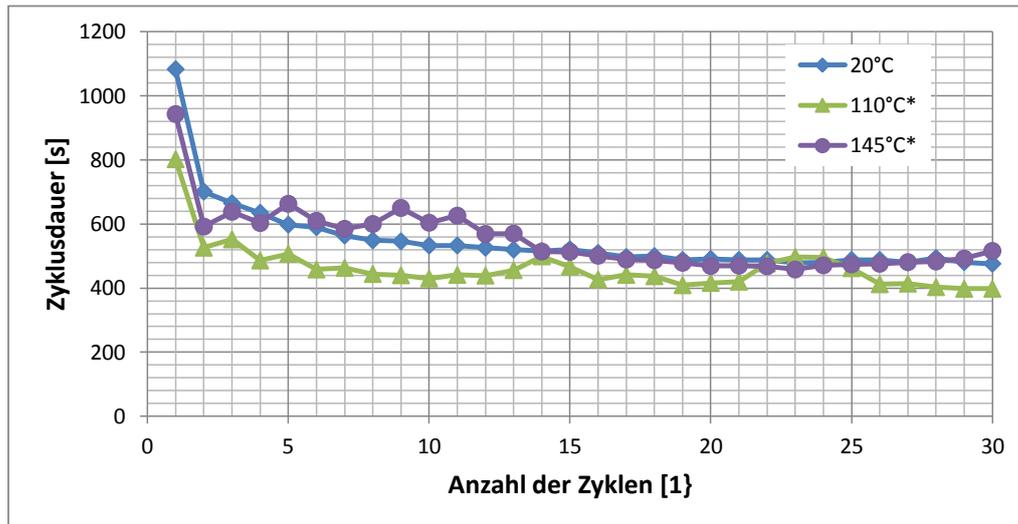


Abbildung 6.7: Zyklusdauer als Funktion der Zyklenzahl; bei Raumtemperatur (20°C); bei 110°C  $\dot{V}$  kompensiert; und bei 145 °C  $\dot{V}$  kompensiert

145°C, nur geringe Abweichungen feststellen.

Man sieht außerdem, dass es zu Schwankungen der  $\alpha_m$  Werte innerhalb der Zyklen des selben Experimentes kommt, welche in einer ähnlichen Größenordnung wie die Abweichungen zwischen den verschiedenen Temperaturen sind.

Bei den größeren Abweichungen bei der 145°C Messung kann es nicht ausgeschlossen werden, dass sich die Eigenschaften des Kuchens tatsächlich verändert haben.

Eine plausible Erklärung wäre, dass es durch die erhöhte Temperatur aufgrund des Kamineffektes zu einem möglichen Rückstrom innerhalb des Rohgaskanals und damit zu einer Aufteilung des Staubes kommt, so wird der Feinanteil bei erhöhter Temperatur bevorzugt nach oben transportiert.

Dies würde zu einem Kuchen mit größeren Körnern führen, welcher dann natürlich leichter durchströmt werden kann, und der damit auch einen geringeren Kuchenwiderstand  $\alpha_m$  aufweisen würde.

Weiters ist zu beachten, dass es zwischen der Temperaturmessstelle und dem Filtermittel ca. 10cm Abstand gibt, welcher zu Abweichungen in der tatsächlichen Temperatur am Filtermittel bzw. den dadurch berechneten Volumenstrom führen kann.

Trärgastemperatur	20°C	110°C*	145°C*
Volumenstrom [l/min]	33,06	30,86	30,69
dynamische Viskosität [ $10^{-5}$ Pa s]	1,823	2,236	2,390
3. Zyklus $\alpha_m$ [ $10^{10}$ m/kg]	1,259	1,288	1,072
15. Zyklus $\alpha_m$ [ $10^{10}$ m/kg]	1,425	1,369	1,246
30. Zyklus $\alpha_m$ [ $10^{10}$ m/kg]	1,457	1,538	1,175

Tabelle 6.3: Spezifischer Filterwiderstand  $\alpha_m$  [m/kg] ausgewählter Zyklen bei Raumtemperatur; bei 110°C  $\dot{V}$  kompensiert; und bei 145 °C  $\dot{V}$  kompensiert

### 6.3 Einfluss des Volumenstromes auf die Temperatur im Rohgaskanal sowie auf den Filterkuchenwiderstand

In den experimentellen Versuchen dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass eine Manteltemperatur von 225°C einmal zu einer Gastemperatur von 110°C bei ca. 31 l/min und einmal zu 120°C bei ca. 44 l/min geführt hat.

Beim höheren Normal-Volumenstrom kam es zur höheren Gastemperatur. Dies widerspricht am ersten Blick der Logik, da eine kürzere Verweilzeit innerhalb des Bereiches des Heizmantels zu einer niedrigeren Temperatur führen müsste.

Eine Erklärung hierfür liefert der bereits in Kapitel 6.2 erwähnte mögliche Trägergasrückstrom im vertikalen Rohgaskanal.

Dieser würde dazu führen, dass der sehr heiße wandnahe Strom bevorzugt nach oben ausgeblasen wird, und nur in der Mitte des vertikalen Rohgaskanals ein kälterer Gasstrom beim Filtermedium ankommt.

Ein leicht niedrigerer Filterwiderstand  $\alpha_m$  beim niedrigeren Norm-Volumenstrom (siehe Tabelle 6.4) würde dies ebenso bekräftigen, da es wie in Kapitel 6.2 bereits erwähnt, zu einer Entmischung gekommen sein kann.

Trägergastemperatur	120°C	110°C*
Volumenstrom [l/min]	44,11	30,86
dynamische Viskosität [ $10^{-5}$ Pa s]	2,271	2,236
3. Zyklus $\alpha_m$ [ $10^{10}$ m/kg]	1,555	1,288
15. Zyklus $\alpha_m$ [ $10^{10}$ m/kg]	1,598	1,369
30. Zyklus $\alpha_m$ [ $10^{10}$ m/kg]	1,685	1,538

Tabelle 6.4: Spezifischer Filterwiderstand  $\alpha_m$  [m/kg] ausgewählter Zyklen bei 120°C und bei 110°C  $\dot{V}$  kompensiert

# Kapitel 7

## Ausblick

### 7.1 Volumenstromregelung und Massenstromeinstellung

Im Laufe der Versuche hat sich gezeigt, dass eine genauere Einstellung des Massenstromes an Staub, einen großen Einfluss auf den Druckverlust hat, wünschenswert wäre.

Der genaueren Einstellung des Massenstromes steht aber vor allem die Art der Volumenstromregelung im Weg.

Derzeit wird am Frequenzumrichter der Pumpe zuerst bei geöffneten Massflowcontroller ein Volumenstrom eingestellt der ca. 20% größer als benötigt ist, und dieser wird dann vom Massflowcontroller auf den exakten Wert herunter geregelt.

Die 20% Überhöhung am Frequenzumrichter wird benötigt, da im Laufe der Filtration eine immer größere Pumpenleistung nötig ist, um den Volumenstrom bei steigendem Druckabfall über das Filtermedium konstant zu halten.

Bei Kalibrierungen des Staubdosierers kann aber dadurch nur über geringe Zeiträume filtriert werden, da die eingestellte Pumpenleistung irgendwann nicht mehr ausreicht um den Volumenstrom konstant halten zu können.

Die Pumpenleistung kann aber auch nicht höher eingestellt werden, da es vorkommen kann, dass der Massflowcontroller den Volumenstrom nicht mehr herunter regeln kann.

Somit ist die Genauigkeit der Kalibration durch die Volumenstromregelung unnötig begrenzt.

Als Verbesserung wäre es möglich den Frequenzumrichter der Pumpe direkt über einen analog Ausgang der Messkarte anzusteuern.

Der Massflowcontroller kann dann zur Messung des Volumenstromes für die Regelung der Pumpe verwendet werden.

## 7.2 Bypass Volumenstrom

Sieht man sich die Versuche zur Temperaturabhängigkeit an kann man erkennen, dass bei beiden Versuchen mit einer Manteltemperatur von 225°C sich unterschiedliche Gastemperaturen ergaben.

Beim hohen Volumenstrom waren es ca. 120°C beim niedrigen Volumenstrom 110°C. Es ergibt sich also ein auf den ersten Blick unlogisches Bild, bei einem niedrigeren Volumenstrom kommt das Gas länger mit dem Heizmantel in Berührung und müsste demnach eine höhere Temperatur erreichen, das Gegenteil ist aber der Fall.

Eine sehr wahrscheinliche Erklärung dafür ist, dass es im Rohgaskanal durch den Kamineffekt zu einer Rückströmung nach oben kommt .

Dies würde auch erklären warum bei den Versuchen mit niedrigerem Massenstrom an Gas eine viel höhere Einstellung am Staubdosierer benötigt wird (siehe Abbildung 4.24).

Existiert dieser Rückstrom, könnte es bei höheren Temperaturen auch zu einer Abtrennung des Feinanteils im Teststaub kommen, da dieser bevorzugt nach oben aus dem Rohgaskanal ausgetragen werden könnte.

Weiters liegt die Vermutung nahe mit einem höheren Volumenstrom höherer Gastemperaturen erreichen zu können wenn es zu keinem Rückstrom mehr kommt.

Es ist also sehr empfehlenswert den Volumenstrom durch den vertikalen Rohgaskanal zu erhöhen, ohne den Volumenstrom über das Filtermedium zu beeinflussen.

Eine Lösung hierfür wäre, wie in DIN ISO 11057 [2012] zusätzlich einen Hilfsstrom zu verwenden, wie in Abbildung 7.1 zu sehen ist.

Die Anschlussstelle für diesen ist im Rohgaskanal bereits vorhanden, würde aber nicht in Betrieb genommen, da vermutet wurde, dass das Filtersystem dieses Stromes nicht genügend Temperaturbeständigkeit aufweist. Eine temperaturbeständige Nachrüstung wäre jedoch empfehlenswert.

Eine temperaturbeständige Nachrüstung wäre jedoch empfehlenswert.

## 7.3 Quality Of Life Changes

Zusätzlich zu den größeren oben erwähnten Änderungen, haben sich im Laufe der Arbeit aber auch ein paar kleinere Probleme bzw. unnötige Unannehmlichkeiten zu erkennen gegeben.

Der Staubdosierer muss derzeit per Hand im Stockwerk über der Anlage ein- bzw. ausgeschaltet werden.

Die Möglichkeit den Dosierer von unten ein- und auszuschalten würde die Kalibrierung weniger hektisch und genauer machen.

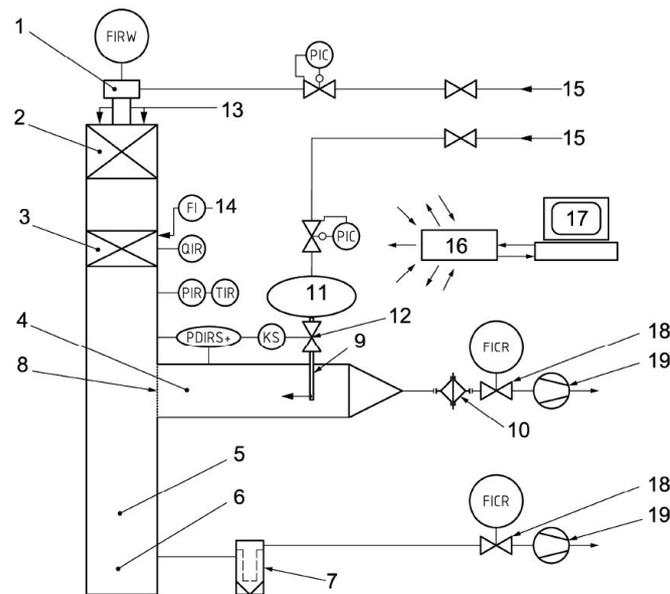


Abbildung 7.1: Versuchsaufbau nach DIN ISO 11057 [2012]; Details sind aus der Prüfnorm zu entnehmen

Derzeit ist es nur möglich am Ende einer Alterung automatisch die Abreinigung abzuschalten.

Eine Möglichkeit über den PC den Strom von Pumpe, Heizmantel und Staubdosierer automatisch nach Beendigung eines Versuches zu unterbrechen würde es möglich machen auch Versuche durchzuführen die zu Zeiten enden an denen niemand vor Ort verfügbar ist, um die Anlage abzuschalten.

Manchmal kann es vorkommen, dass das Filtermittel durch den Druckluftstoß der Abreinigung aus der Einspannung gerissen wird.

Es wäre also zweckmäßig, dass die Steuereinheit dies erkennt, eine Benachrichtigung sendet und die Messung unterbricht.

## 7.4 Potential für zukünftige Forschung

Durch die Erneuerung des Filtermittelprüfstandes und der Ausstattung mit einem Heizmantel ist es in Zukunft möglich Alterungsexperimente bei Temperaturen von bis zu 150°C durchzuführen.

Auf den ersten Versuchen, die im Zuge dieser Arbeit durchgeführt wurden, aufbauend können mehrere komplette Alterungen bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt werden, um zu überprüfen ob die Kuchenwiderstände  $\alpha_m$  wirklich von der Trägergastemperatur unabhängig sind.

Weiters können auch Versuche mit anderen Filtermitteln oder Teststäuben mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung durchgeführt werden, um die besten Filtermit-

tel für unterschiedliche Anwendungsfälle zu finden.

Es kann experimentell untersucht werden ob das von Stecher [2014] entwickelte Modell zur Beschreibung der Staubfiltration auch bei erhöhten Temperaturen gültig ist, bzw. wie dieses zu adaptieren wäre.

Es kann also gesagt werden, dass sich durch den verbesserten Filtermittelprüfstand viele neue Möglichkeiten zur Erforschung von Filtermitteln für den industriellen Einsatz ergeben.

# Kapitel 8

## Zusammenfassung

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein umfassende Literaturstudie zum Thema Filtration bei höheren Temperaturen durchgeführt.

Mit dem gewonnenen Wissen wurde ein Konzept ausgearbeitet für einen Filtermittelprüfstand, bei dem auch bei Temperaturen von bis zu 150°C gearbeitet werden kann.

Es wurden vorhandene Teile eines alten Prüfstandes zur Filtermittelalterung untersucht und nach Möglichkeit wieder verwendet. Fehlende Bauteile wurden zugekauft. Eine Steuer- und Mess-Software wurde mithilfe von Labview erstellt und alle Geräte und Sensoren kalibriert.

Es wurde anschließend gezeigt, dass es möglich ist auf dem Prüfstand Alterungsversuche durchzuführen, indem ein Alterungsprozess nach DIN ISO 11057 [2012] vollständig durchlaufen wurde.

Weiters wurden erste Versuche zum Einfluss der Temperatur auf das Filtrationsverhalten durchgeführt.

Es wurde festgestellt, dass eine Erhöhung der Temperatur bei unveränderten Massenstrom an Gas zu einer Erhöhung des Druckverlustes führt, und diese Erhöhung näherungsweise mithilfe der Filtergleichung 3.4 beschrieben werden kann.

Messungen bei verschiedenen Temperaturen mit konstantem Volumenstrom wurden durchgeführt, die Ergebnisse dieser Versuche lagen aber zu nah beieinander um verlässliche Aussagen mit nur jeweils einer Versuchsserie machen zu können.

Es hat sich gezeigt, dass es vermutlich einen internen Rückstrom durch den bei höheren Temperaturen auftretenden Kamineffekt im Rohgaskanal gibt und dieser für weitere Messungen mit einem Hilfsstrom zu beseitigen wäre.

Die Versuche haben gezeigt, dass es möglich ist das Betriebsverhalten von Filtermitteln in Zukunft auch bei höheren Temperaturen untersuchen zu können.

# Literaturverzeichnis

- [Dietrich 2004] DIETRICH, Hans: *Der Entstauber-Markt*. 2004. – Online verfügbar auf [https://www.avronline.de/sixcms/detail.php?id=121673#.WT\\_zl0vyiUk](https://www.avronline.de/sixcms/detail.php?id=121673#.WT_zl0vyiUk)
- [DIN EN 12341 2014] *Außenluft - Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM10- oder PM2,5-Massenkonzentration des Schwebstaubes*. 2014
- [DIN EN 779 2012] *Klassifizierung von Partikel-Luftfiltern*. 2012
- [DIN ISO 11057 2012] *Prüfverfahren für die Charakterisierung des Filtrationsverhaltens abreinigbarer Filtermedien*. 2012
- [Gems-Sensors ] GEMS-SENSORS: *Datasheet: Very Low Range Differential Pressure Transmitter*. – Online verfügbar auf <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/0668/0900766b80668de1.pdf>
- [Greil 2006] GREIL, Franz: *Feinstaub am Arbeitsplatz - Die Emissionen ultrafeiner Partikel und ihre Folgen für ArbeitnehmerInnen*. 2006. – Online verfügbar auf [https://media.arbeiterkammer.at/wien/Informationen\\_zur\\_Umweltpolitik\\_170\\_Teil1.pdf](https://media.arbeiterkammer.at/wien/Informationen_zur_Umweltpolitik_170_Teil1.pdf)
- [Heidenreich 2013] HEIDENREICH, Steffen: Hot gas filtration – A review. In: *Fuel* 104 (2013), 83 - 94. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.07.059>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.07.059>. – ISSN 0016–2361. – 10th Japan/China Symposium on Coal and {C1} Chemistry
- [Intensiv - Filter ] *Das große Intensiv-Filter Lexikon der Entstaubung*. [http://www.intensiv-filter.com/fileadmin/user\\_upload/downloads/Lexikon\\_der\\_Entstaubung\\_Intensiv-Filter.pdf](http://www.intensiv-filter.com/fileadmin/user_upload/downloads/Lexikon_der_Entstaubung_Intensiv-Filter.pdf), . – Aufgerufen am 13.06.2017
- [Kalinsky-Sensor-Elektronik ] KALINSKY-SENSOR-ELEKTRONIK: *Datasheet: Pressure Transmitter Type DS2*. – Online verfügbar auf [http://www.drucksensorik.de/doc/ds2\\_eng.pdf](http://www.drucksensorik.de/doc/ds2_eng.pdf)
- [Kasper u. a. 2003] KASPER, Gerhard ; MEYER, Jörg ; LEHMANN, Martin: *Kurs: Filtertechnik*. Universität Karlsruhe, 2003
- [Laminger u. a. 2017] LAMINGER, Thomas ; STECHER, Markus ; MAUSCHITZ, Gerd ; HÖFLINGER, Wilhelm: Modeling the pressure drop behavior of cleanable dust

- filters during pressure-controlled operation. In: *Separation Science and Technology* (2017), 1-7. <http://dx.doi.org/10.1080/01496395.2017.1331244>. – DOI 10.1080/01496395.2017.1331244
- [M&C 2006] *Datenblatt: Gas- und Flüssigkeitskühler Serie LC LT*. [http://www.mc-techgroup.com/out/pictures/files/D\\_LTC\\_DE.pdf](http://www.mc-techgroup.com/out/pictures/files/D_LTC_DE.pdf), 2006. – Aufgerufen am 21.03.2017
- [Meilhaus 2014] MEILHAUS: *Bedienungsanleitung: Redlab 1208LS*, 2014. – Online verfügbar auf <https://www.meilhaus.de/redlab-1208.htm>
- [Mikrocontroller-NET ] *Relais mit Logik ansteuern*. [https://www.mikrocontroller.net/articles/Relais\\_mit\\_Logik\\_ansteuern](https://www.mikrocontroller.net/articles/Relais_mit_Logik_ansteuern), . – Aufgerufen am 21.03.2017
- [National-Instruments 2016] NATIONAL-INSTRUMENTS: *Labview 2016*, 2016. – Produkt-Homepage: <http://www.ni.com/labview/whatsnew/d/>
- [PALAS-GmbH 2017] *Produktseite BEG 1000D*. <http://www.palas.de/de/product/beg1000>, 2017. – Aufgerufen am 29.03.2017
- [RS-Components 2017] RS-COMPONENTS: *Bedienungsanleitung: Temperaturregeber 300TX*, 2017. – Online verfügbar auf <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/1560/0900766b81560ab4.pdf>
- [Schmidt u. Löffler 1996] SCHMIDT, Eberhard ; LÖFFLER, Friedrich: *Filternde Abscheider*. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 1996
- [Schuberth 2010] SCHUBERTH, Josef: *Untersuchung des Alterungsvorganges von abreinigbaren Staubfiltermedien bei zeitgesteuerter Abreinigung*, Technische Universität Wien, Diss., 2010
- [Standard-Groups ] *Pural NF Filter Test Dust*. <http://www.standard-groups.com/en/Others/662.html>, . – Aufgerufen am 26.04.2017
- [Stecher 2014] STECHER, Markus: *Analyse der künstlichen Filtermittelalterung bei der Abreinigungsfiltration und Modellierung der damit verbundenen Verstopfungsvorgänge*, Technische Universität Wien, Diss., 2014
- [Stieß 1994] STIESS, Martin: *Mechanische Verfahrenstechnik 2*. Springer-Verlag, 1994
- [Umweltbundesamt Deutschland ] *Schwermetall - Emissionen*. <http://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/schwermetall-emissionen#textpart-1>, . – Aufgerufen am 13.06.2017
- [Umweltbundesamt Österreich a] *Emissionstrends 1990 - 2004*. <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0574.pdf>, . – Aufgerufen am 13.06.2017

- [Umweltbundesamt Österreich b] *Staub - allgemein*. <http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/luft/luftschaedstoffe/staub/>,  
– Aufgerufen am 13.06.2017
- [UNIFIL AG 2017] *Filtereffekte*. [http://www.unifil.ch/de\\_CH/filtereffekte/p/3361](http://www.unifil.ch/de_CH/filtereffekte/p/3361), 2017. – Aufgerufen am 19.03.2017
- [VDI 3677 2012] *Filternde Abscheider - Heißgasfiltration*. Verein Deutscher Ingenieure, 2012
- [VDI 3926 2004] *Prüfung von Filtermedien für Abreinigungsfilter Standardprüfung zur vergleichenden Bewertung von abreinigbaren Filtermedien*. Verein Deutscher Ingenieure, 2004

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Korngrößenbereiche verschiedener industrieller und natürlicher Stäube [Intensiv - Filter] . . . . .	1
1.2	Abscheidegrade von Feinstaub im menschlichen Körper [Greil, 2006] .	2
1.3	$PM_{10}$ Emissionsquellen in Österreich [Umweltbundesamt Österreich, a]	3
1.4	Fraktionsabscheidegrade verschiedener Staubabscheider im Vergleich [Intensiv - Filter] . . . . .	3
1.5	Assymetrische Keramikfiltermembran für die Heisgasfiltration [Heidenreich, 2013] . . . . .	5
1.6	Temperaturbereiche bei denen Abscheider eingesetzt werden [VDI 3677, 2012] . . . . .	5
3.1	Grundschemata des Staubabscheidens . . . . .	9
3.2	Funktionsweise des Trägheitseffektes [UNIFIL AG, 2017] . . . . .	10
3.3	Funktionsweise des Sperreffektes [UNIFIL AG, 2017] . . . . .	11
3.4	Funktionsweise des elektrodifusiven Effektes [UNIFIL AG, 2017] . . .	11
3.5	Funktionsweise des molekulardifusiven Effektes [UNIFIL AG, 2017] .	11
3.6	Überlagerung der Abscheidemechanismen; Abscheidewahrscheinlichkeit $E(d)$ über der Partikelgröße $d$ [Kasper u. a., 2003] . . . . .	12
3.7	Einfluss der Filtrationsgeschwindigkeit ( $v_F$ ) auf die Partikelabscheidung [Kasper u. a., 2003] . . . . .	13
3.8	Einfluss der Temperatur auf die Partikelabscheidung; berechnete Einzelfaserauftreffgrade $\eta_{DR}$ bei der Überlagerung von Diffusions- $\eta_D$ und Sperreffekt $\eta_R$ [Kasper u. a., 2003] . . . . .	14
3.9	Zeitlicher Druckverlustverlauf einer Filtration bei zeitgesteuerter Abreinigung [Stecher, 2014] . . . . .	15
3.10	Zeitlicher Druckverlustverlauf einer Filtration bei druckgesteuerter Abreinigung [Stecher, 2014] . . . . .	16
3.11	Verlauf des Druckverlustes und der Partikelabsetzfläche innerhalb eines Zyklus bei verschiedenen Filtrationsmechanismen [Stecher, 2014] .	18
3.12	Alterungskammer an der TU-Wien; links Photographie, rechts schematischer Aufbau [Stecher, 2014] . . . . .	22
4.1	Prüfstand für textile Filtermittelprüfung bei erhöhten Trägergastemperaturen . . . . .	23
4.2	Aufbau der Filtermittelprüfapparatur angelehnt an [VDI 3926, 2004] .	25
4.3	Mittleres und Oberes Element des Rohgaskanals mit angebrachten Heizmantel . . . . .	26

4.4	Reingaskanal mit Drucklufttank . . . . .	27
4.5	Steuerkasten für die Beheizung der Anlage . . . . .	28
4.6	Heizmantel angebracht am vertikalen Rohgaskanal . . . . .	28
4.7	V.l.n.r Haltering, Gitter, Distanzring mit Rückhaltestäben, Zusatzdistanzring und Schraubverschluss . . . . .	29
4.8	Funktionsprinzip des Staubdosierers BEG 1000D [PALAS-GmbH, 2017]	30
4.9	Staubdosierer BEG 1000D der Firma Palas . . . . .	31
4.10	Drucklufttank mit Drosselventil und Manometer . . . . .	32
4.11	Absolutfilter im eingebauten Zustand . . . . .	33
4.12	Gaskühler Modell LGC-1 der Firma M&C [M&C, 2006] . . . . .	34
4.13	Drehschieberpumpe VT 4.4 mit 2,1 kW . . . . .	34
4.14	Visuelles Interface zur Darstellung der Messdaten in Echtzeit während Messungen . . . . .	35
4.15	USB-Messkarte Redlab 1208LS [Meilhaus, 2014] . . . . .	36
4.16	Massflowcontroller Type 1559A-200L-SV von MKS-Instruments . . . . .	37
4.17	Steuer- und Regelungseinheit PR4000F für MKS Massflowcontroller . . . . .	37
4.18	Differenzdruckaufnehmer Oben: Differenzdruckaufnehmer [Gems-Sensors] Unten: Differenzdruckaufnehmer [Kalinsky-Sensor-Elektronik] . . . . .	38
4.19	Thermoelement vom Typ-K im Inneren des Rohgaskanals . . . . .	39
4.20	Schematisches Bild für den Temperaturregeber 300TX [RS-Components, 2017] . . . . .	40
4.21	Treiberschaltung [Mikrocontroller-NET] . . . . .	40
4.22	Volumengewichtete Partikelgrößenverteilung verschiedener Teststäube [Stecher, 2014] . . . . .	41
4.23	Bestaubtes Nadelfilz nach dem Einsatz im Prüfstand . . . . .	42
4.24	Kalibrierpunkte für Raumtemperatur (20°C) sowie für die Heizmanteltemperaturen 225°C und 310°C. Stern symbolisiert Anpassung des Volumenstromes an die Temperatur vor dem Filtermedium . . . . .	44
4.25	Temperaturverlauf beim Anfahren der Apparatur mit 225°C Heizmanteltemperatur und 30 l/min Luftvolumenstrom . . . . .	45
4.26	Temperaturverlauf beim Anfahren der Apparatur mit 310°C Heizmanteltemperatur und 30 l/min Luftvolumenstrom . . . . .	46
5.1	Zeitlicher Druckverlustverlauf für die Zyklen vor der Alterung . . . . .	49
5.2	Druckverlust als Funktion der Zyklenzahl für die Zyklen während der Alterung . . . . .	49
5.3	Zeitlicher Druckverlustverlauf für die Zyklen nach der Alterung . . . . .	49
5.4	Restdruckverluste und Zklusdauern als Funktion der Zyklenzahl bei druckgesteuerten Betrieb vor der Alterung; bei Raumtemperatur . . . . .	50
5.5	Zeitlicher Druckverlust über das Filtermedium beim 3. Zyklus vor der Alterung; bei Raumtemperatur . . . . .	51
5.6	Zeitlicher Druckverlust über das Filtermedium beim 30. Zyklus vor der Alterung; bei Raumtemperatur . . . . .	52
5.7	Maximaler Druckverlust vor der Abreinigung und Restdruckverlust nach der Abreinigung als Funktion der Zyklenzahl bei der Alterung; bei Raumtemperatur . . . . .	53

5.8	Restdruckverluste und Zklusdauern als Funktion der Zyklenzahl bei Druckgesteuerten Betrieb nach der Alterung; bei Raumtemperatur . . . . .	54
5.9	Zeitlicher Druckverlustverlauf beim 3. und beim 30. Zyklus nach der Alterung; bei Raumtemperatur . . . . .	54
6.1	Zeitlicher Druckverlustverlauf über das Filtermittel für die Messung bei 120°C . . . . .	56
6.2	Restdruckverluste als Funktion der Zyklenzahl; bei Raumtemperatur (20°C) und bei 120°C . . . . .	57
6.3	Zyklusdauer als Funktion der Zyklenzahl; bei Raumtemperatur (20°C) und bei 120°C . . . . .	57
6.4	Zeitlicher Druckverlustverlauf über das Filtermittel für die Messung bei 110°C und kompensiertem Volumenstrom . . . . .	59
6.5	Zeitlicher Druckverlustverlauf über das Filtermittel für die Messung bei 145°C und kompensiertem Volumenstrom . . . . .	60
6.6	Restdruckverluste als Funktion der Zyklenzahl; bei Raumtemperatur (20°C); bei 110°C $\dot{V}$ kompensiert; und bei 145 °C $\dot{V}$ kompensiert . . . . .	60
6.7	Zyklusdauer als Funktion der Zyklenzahl; bei Raumtemperatur (20°C); bei 110°C $\dot{V}$ kompensiert; und bei 145 °C $\dot{V}$ kompensiert . . . . .	61
7.1	Versuchsaufbau nach DIN ISO 11057 [2012]; Details sind aus der Prüfnorm zu entnehmen . . . . .	65

# Tabellenverzeichnis

4.1	Eigenschaften von Pural NF [Stecher, 2014] . . . . .	41
4.2	Eigenschaften des Polyimid-Nadelfilzes [Stecher, 2014] . . . . .	42
5.1	Versuchsparameter für Alterungsversuche laut DIN ISO 11057 [2012]	47
5.2	Berechnete Versuchsparameter für Alterungsversuche und geometrische Kennzahlen der Anlage . . . . .	48
6.1	Spezifischer Filterwiderstand $\alpha_m$ [m/kg] ausgewählter Zyklen bei Raumtemperatur und bei 120°C . . . . .	58
6.2	Ausgewählte Prozessgrößen bei den Filtermittelalterungen mit kompensiertem Volumenstrom . . . . .	59
6.3	Spezifischer Filterwiderstand $\alpha_m$ [m/kg] ausgewählter Zyklen bei Raumtemperatur; bei 110°C $\dot{V}$ kompensiert; und bei 145 °C $\dot{V}$ kompensiert	61
6.4	Spezifischer Filterwiderstand $\alpha_m$ [m/kg] ausgewählter Zyklen bei 120°C und bei 110°C $\dot{V}$ kompensiert . . . . .	62