Die approbierte Originalversion dieser Dissertation ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
VIENNA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

DISSERTATION

Untersuchung des Alterungsvorganges von abreinigbaren Staubfiltermedien bei zeitgesteuerter Abreinigung

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften unter Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wilhelm Höflinger
E166
Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und techn. Biowissenschaften

Eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Technische Chemie

von

Dipl.-Ing. Josef Schuberth
Matrikelnummer: 0215435
Obere Straße 35, 3553 Schiltern

Wien, am

Inhalt

1 Einleitung 7

2 Problemstellung 9

3 Grundlagen der Abreinigungsfiltration 10

4 Filtermittelprüfung in Filterprüfständen 13

4.1 Historische Entwicklung der Prüfprozeduren 14

4.2 Filtermittelprüfstände 14

4.2.1 Filtermittelprüfstand Typ 1 14

4.2.2 Filtermittelprüfstand Typ 2 15

4.2.3 Filtermittelprüfstand der BTU Cottbus 17

4.2.4 Filtermittelprüfstand nach JIS Z 8909-1 17

4.3 Standardprüfbedingungen nach VDI 3926 18

4.4 Langzeitfiltrationsverhalten (Alterung) 19

4.4.1 Chemische Alterung 19

4.4.2 Mechanische Alterung 20

4.4.3 Alterung durch irreversible Filtermedienverstopfung 21

4.5 Prüfprozeduren in den Normen 21

4.5.1 Prüfbedingungen nach VDI 3926 (2004) 21

4.5.2 Prüfbedingungen nach ISO/CD 11057 22

4.6 Wissenschaftliche Erkenntnisse zur Alterung 23

5 Alterungskammer 28

5.1 Aufbau der Alterungskammer 28

5.1.1 Bestandteile der Alterungskammer 29

5.2 Inbetriebnahme und Qualifizierung der Alterungskammer 33

5.2.1 Überprüfen des Dosiervolumenstroms 33

5.2.2 Rohgasstaubkonzentrationsbestimmung 34

5.2.3 Überprüfung der Druckmessung während der Dichtigkeitsprüfung 37
5.2.4 Überprüfung der Prüffilterdruckverlustmessung 37
6 Standarddurchführungsprozedur bei den Alterungsversuchen 38
7 VDI 3926 Typ 2 Filtermittelprüfstand 40
7.1 Generelle Funktionsweise des Filtermittelprüfstands 40
7.1.1 Staubdosierungseinrichtung 41
7.1.2 Gasvolumenstrom 42
7.1.3 Prüffiltereinspannung 42
7.1.4 Abreinigungssystem 42
7.2 Durchführung der VDI 3926 Filtermittelprüfungen 42
7.2.1 Teststaub 42
7.2.2 Versuchsbedingungen 43
7.2.3 Durchführungsprozedur der Filtermittelprüfung am VDI 3926 Typ 2 43
7.3 Parameter zur Kennzeichnung des Filtrationsverhaltens am VDI 3926 Typ 2 Prüfstand 46
7.3.1 Reingaskonzentration 46
7.3.2 Reststaubmasse 47
7.3.3 Restdruckverlust und Zykluszeit 47
7.3.4 Luftdurchlässigkeit 48
8 Bildanalytische Charakterisierung der Oberflächenstruktur 49
8.1 Parameter zur Charakterisierung der Oberflächenstruktur mittels Bildanalyse 51
8.1.1 Porentiefenmessung 51
8.1.2 Bestimmung der Porenflächenverteilung und der Inhomogenitätskenngrößen . 62
8.1.3 Oberflächenporositätsbestimmung 75
8.1.4 Modellpore 77
9 Ergebnisse der Alterungsversuche und deren Interpretation mit Hilfe der Ergebnisse der Bildanalyse 78

9.1 Alterungsversuche und Interpretation der Ergebnisse 78
9.1.1 Ergebnis einer Filtermittelprüfung nach ISO Normentwurf 78
9.1.2 Detaillierte Untersuchung des Alterungsdruckverlustverlaufs 80
9.1.3 Festlegung eines Alterungskennwerts zur Charakterisierung des Druckverlustverhaltens während der zeitgesteuerten Alterung 86
9.2 Zusammenfassung der Ergebnisse des Kapitels 12 92
10 Interpretation von Alterungsergebnissen verschiedener Filtermedien mithilfe der Inhomogenitätsbestimmung 92
10.1 Ergebnis der bildanalytischen Untersuchungen 93
10.2 Ergebnis der Alterungsversuche 100
10.3 Zusammenfassung der Ergebnisse des Kapitels 10 100
11 Interpretation der Filtrationsergebnisse von P84/PPS Mischfaserfilzen mithilfe der Bildanalyse 101
11.1 Ergebnisse der bildanalytischen Untersuchungen 101
11.2 Ergebnisse der Filterprüfungen am VDI 3926 Typ 2 Filtermittelprüfstand 103
11.3 Vergleich der Alterungsergebnisse von P84/PPS-Mischfaserfilzen 105
11.4 Zusammenfassung der Ergebnisse des Kapitels 11 107
12 Auswirkung der Faserfeinheit auf die Filtrationseigenschaften 107
12.1 Vergleich von Mischfasernadelfilzen aus P84 2,2 dtex und P84 1,0 dtex Fasern 108
12.1.1 Ergebnisse der Bildanalyse 108
12.1.2 Ergebnisse der Filterprüfungen am VDI 3926 Typ 2 Filtermittelprüfstand 110
12.2 Vergleich von P84-Nadelfilzen unterschiedlicher Faserfeinheit und Verfestigung 113
12.2.1 Ergebnisse der bildanalytischen Untersuchungen 114
12.2.2 Ergebnisse der Filterprüfung am VDI 3926 Typ 2 Filtermittelprüfstand 115
12.3 Vergleich von industriell eingesetzten P84 Feinfaserfiltermedien unterschiedlicher Hersteller 116
12.3.1 Ergebnis der bildanalytischen Untersuchungen 116
12.4 Zusammenfassung der Ergebnisse des Kapitels 12 119

13 Untersuchung der Faserverbundstabilität (Faserlockerung) an der Filtermitteloberfläche 119

13.1 Untersuchung der Faserlockerung bei Beanspruchung mittels Alterungskammer . 119

13.2 Untersuchung der Faserlockerung nach längerer Einsatzzeit des Filtermediums im Entstaubungsfilter eines Zementwerks 120

13.2.1 Durchführung der Untersuchung 120

13.2.2 Faserlockerungsuntersuchung an einem wassergestrahlten Filtermedium aus P84 auf Glasgewebe (V877) 121

13.2.3 Faserlockerungsuntersuchung an einem wassergestrahlten Filtermedium aus P84 auf P84 Gewebe (V878) 123

13.2.4 Faserlockerungsuntersuchung an einem Nadelfilz aus P84 auf P84 Gewebe (TAN 1939) 124

13.2.5 Faserlockerungsuntersuchung an einem P84-PET Mischfilz 124

13.3 Zusammenfassung der Ergebnisse des Kapitels 13 125

14 Zusammenfassung 126

15 Ausblick 127

16 Veröffentlichungs- und Präsentationsliste 128

17 Literatur 130

Danksagung

Der Firma Evonik Fibers (Lenzing) danke ich für die Finanzierung des Forschungsprojekts und für die Projektbesprechungen, durch welche ich eine praxisnahe Sichtweise der Problemstellungen bekam.

Der Firma Palas GmbH (Karlsruhe) danke ich für die Bereitstellung der Alterungskammer und die Unterstützung bei den Diskussionen nach Konferenzpräsentationen.

Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wilhelm Höflinger danke ich für die Zuweisung des interessanten Themas und die Hilfestellungen aufgrund seines Erfahrungsschatzes.

Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schmidt danke ich für die Übernahme der Gutachter- und Zweitprüfertätigkeit bei meiner Dissertation.

Herrn Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerd Mauschitz danke ich für die Diskussionsbereitschaft, für die kritische Hilfe beim Abfassen meiner Dissertation

Meinen Diplomarbeitern Frau Dipl.-Ing. (FH) Elviera Musits, Herrn Dipl.-Ing. Phillip Schneeweiß und Frau Edith Unterberger danke ich für die Mitarbeit an dem Projekt.

Je remercie ma femme et ma fille pour tout le soutien et le courage qu'elles m'ont donnés.

1 Einleitung

Aufgrund des ständig steigenden Gesundheits- und Umweltbewußtseins der Gesellschaften in den höher entwickelten Ländern ist eine stetige Verschärfung der Grenzwerte und Auflagen für die Luftreinhaltung im öffentlichen Bereich feststellbar. Da diese Maßnahmen einen höheren Stand der Technik bedingen, kann eine stetige Verbesserung der Technologie festgestellt werden.
Ein wichtiges Teilgebiet der Luftreinhaltung ist die Entstaubung. Auf dem Teilgebiet der Entstaubungstechnik sind medizinische, biologische, ökologische und wirtschaftliche Erkenntnisse die entscheidende Triebkraft für technische Verbesserungen. Die Medizin hat die öffentliche Meinung vor allem durch Langzeitstudien, welche die toxikologischen Auswirkungen von Stäuben auf den menschlichen Organismus beschreiben, beeinflußt. Ökologische und ökonomische Überlegungen führten in den letzten Jahrzehnten dazu, dass Abfälle nicht mehr deponiert werden, sondern vorher einer thermischen Verwertung, welche meist in der Nähe der Emittenten situiert ist zugeführt werden. Vor allem die örtliche Situierung von Müllverbrennungsanlagen in der Nähe von oder in Ballungsräumen führte dazu, dass stark reduzierte Emissionsgrenzwerte vorgeschrieben wurden um gesundheitliche Auswirkungen zu reduzieren und die öffentliche Toleranz für solche Anlagen zu erhöhen.
Weiters kann festgestellt werden, dass sich das öffentliche und medizinische Interesse immer weiter in Richtung des Staubfeinanteils verschiebt. Diese Tendenz hängt mit der in Abb. 1 dargestellten Abhängigkeit des anatomischen Staubabscheidegrades vom aerodynamischen Partikeldurchmesser zusammen.

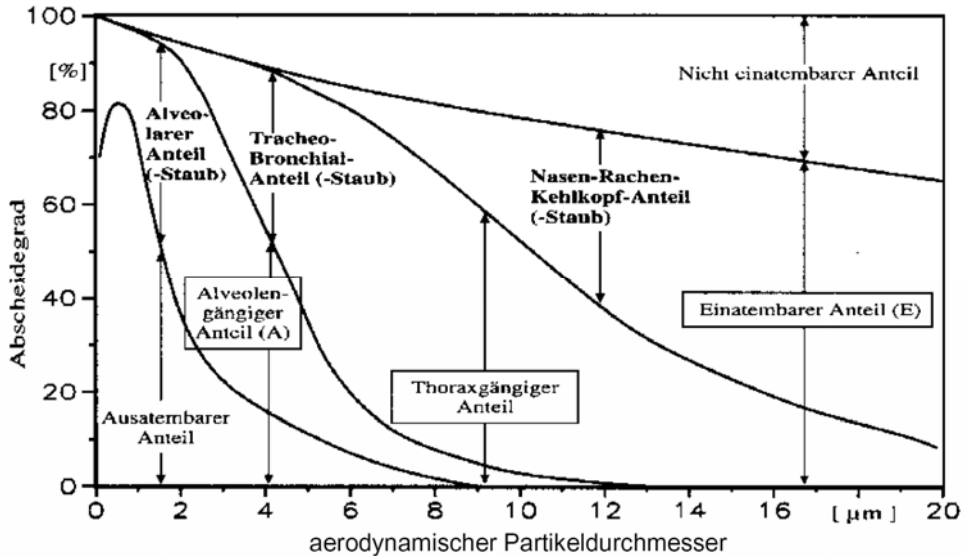


Abb. 1 Partikelabscheidung im menschlichen Atemtrakt [1]

Feinstäube mit aerodynamischem Durchmesser < 10 µm werden vermehrt im Bronchial- bzw. Alveolar-Bereich abgeschieden und stellen deshalb meist ein größeres toxikologisches Risiko dar, welches u. a. durch die erleichterte Aufnahme in die Blutbahn begründet werden kann.
Die angesprochenen Entwicklungen führen zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Staubabscheider. Durch die niedrigeren Grenzwerte und die größere Beachtung des Feinstaubanteils werden in der Industrie vermehrt filternde Abscheider eingesetzt, da diese vergleichsmäßig hohe Fraktionsabscheidegrade auch im Feinstaubbereich besitzen (Abb. 2).

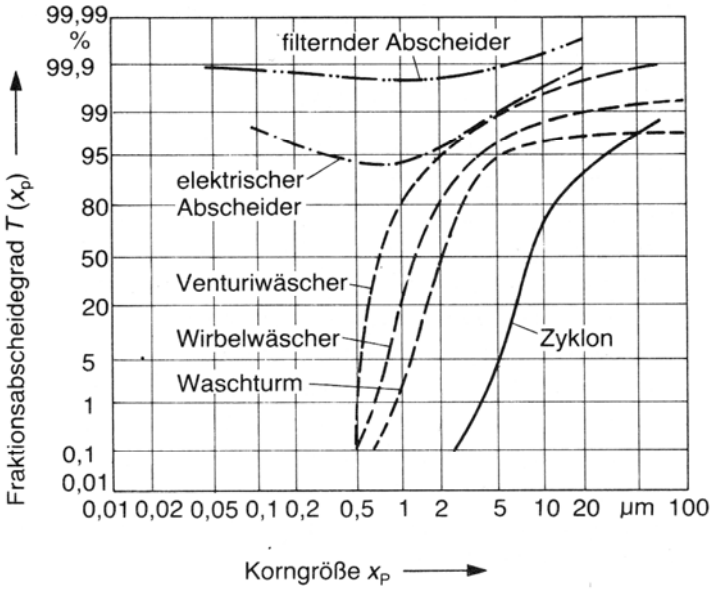


Abb. 2 Fraktionsabscheidegrad abhängig von der Korngröße [2]

Wenn im zu reinigenden Gasstrom große Mengen an Staub in der Größenordnung von einigen g/m^3 vorhanden sind, werden Abreinigungsfilter eingesetzt. Abreinigungsfilter besitzen im Vergleich zu Elektroentstaubern und Zyklonen den Vorteil, dass sie größere Fraktionsabscheidegrade vor allem im Feinstaubbereich besitzen. Im Vergleich mit Naßentstaubern (z.B. Venturiwäschern) besitzen Abreinigungsfilter einen niedrigeren spezifischen Energiebedarf und besitzen weiters den Vorteil, dass kein kontaminiertes Waschmittel aufbereitet bzw. entsorgt werden muss. Diese Vorteile wiegen zumeist beim Neubau von Anlagen die, je nach eingesetzter Technologie, manchmal höheren Investitionskosten der Abreinigungsfilter auf, sodass der Marktanteil der Abreinigungsfilter stets zunimmt. Vor allem im Bereich ökologisch sensibler Anwendungen wie der zuvor angesprochenen Müllverbrennungsanlagen sind Abreinigungsfilter klarer Marktführer. Die Tendenz zu niedrigeren Grenzwerten bei Auflagen für neue Anlagen stärkt nicht nur die Dominanz der Abreinigungsfilter sondern bedingt ebenfalls Anpassungen der Konkurrenztechnologien, wie z.B. der vermehrte Einsatz von Hybridfiltern (Elektroentstauber mit nachgeschaltetem Abreinigungsfilter). Der Trend zu niedrigeren Grenzwerten ist auch der Hauptgrund für die ständigen Innovationen und Verbesserungen bei Abreinigungsfiltern sowohl von Seiten der Anlagenbauer, als auch von Seiten der Filtermittel- und Faserhersteller.

Abreinigungsfilter besitzen einen hohen Stand der Technik, weshalb sie bei vielen Entstaubungsprozessen zum Einsatz kommen. Industrielle Abreinigungsfilter werden meist aufgrund von empirischen Erfahrungen ausgelegt. Zur Wahl des richtigen Filtermediums werden Filtermittelprüfungen an Teststänlden durchgeführt und die textiltechnischen Eigenschaften der Filtermedien ermittelt. Die Wahl des richtigen Filtermediums ist ein Schlüsselschritt zu einer langfristig erfolgreichen Abreinigungsfiltration. Um diesen Vorgang zu verbessern, muß sowohl die Filtermittelprüfung als auch die Bestimmung der für die Filtration maßgeblichen Oberflächeneigenschaften mittels Bildanalyse verbessert werden. Bei den Filtermittelprüfungen sollen vor allem Daten ermittelt werden, welche Aussagen über die Filtrationseigenschaften von Filtermedien im Langzeitbetrieb zulassen, denn Filtermedien werden in der Praxis meist 2-4 Jahre eingesetzt und das Ergebnis einer Filtermittelprüfung sollte ebenfalls für diesen Zeitrahmen repräsentativ sein. In den neueren Normvorschriften[3,4,5,6,7] zur Filtermittelprüfung wird deshalb eine Alterungsphase vorgeschlagen.

Die vorliegende Arbeit wird mit der Absicht in Angriff genommen Filtermedien hinsichtlich ihrer Filtrationseigenschaften mit besonderem Augenmerk auf den Langzeitbetrieb zu verbessern. Hierfür ist eine detaillierte Kenntnis des Alterungsvorganges erforderlich. Für die nähere Untersuchung des Alterungsvorganges soll eine neukonzipierte Alterungskammer zur Anwendung kommen.
Des Weiteren soll im Rahmen dieser Arbeit die lichtoptische Bildanalysemethode der oberflächennahen Filtermedienstrukturen, welche von Koschutnig [8] und Rud [9] beschrieben wurde, weiterentwickelt werden, denn das Filtrationsverhalten von Abreinigungsfiltermedien wird maßgeblich durch die oberflächennahen Strukturen beeinflußt. Besonderes Augenmerk soll hierbei auf die Automatisierung der bildanalytischen Methode gelegt werden. Die lichtoptischen Parameter sollen um Parameter erweitert werden, welche die Inhomogenität der Filtermitteloberfläche näher beschreiben.

2 Problemstellung

Die Alterung von abreinigbaren Staubfiltermedien dient dazu das Filtermedium vor einer filtrationstechnischen Untersuchung in möglichst kurzer Zeit in einen einer langen Betriebszeit entsprechenden Zustand zu bringen. Dadurch können verschiedene Filtermedien nicht nur in ihrem Anfangszustand, sondern auch nach längerer Abnützung verglichen werden.
Die Arbeit wird mit der Absicht in Angriff genommen den Alterungsverlauf im Detail zu untersuchen, um die Ursachen für die Verstopfungsentstehung besser verstehen zu können. Damit die vergleichsweise aufwendigen VDI 3926 Testapparaturen nicht für langzeitige Alterungstests blockiert werden, soll eine vereinfachte Filtrationsapparatur, welche ausschließlich für Alterungstests verwendet werden soll (Alterungskammer), entwickelt und verwendet werden. Die Anwendbarkeit dieser Alterungskammer soll anhand von Alterungsergebnissen demonstriert werden.
Mit Hilfe dieser Apparatur soll untersucht werden wie sich verschiedene Zykluszeiten, insbesondere Zeiten von mehr als 20 Sekunden auf den Alterungsprozess auswirken. Da auch andere Parameter wie die Filtrationsgeschwindigkeit und die Abreinigungsbedingungen (z.B: die Ventilöffnungszeit bei der Abreinigungsdüse) Einfluss auf das Alterungsverhalten haben, werden auch diese in die Untersuchung einbezogen. Anhand der Untersuchungsergebnisse sollen die für den Alterungsvorgang maßgeblichen Verstopfungsmechanismen aufgeklärt werden. Weiters soll eine optimierte Alterungsprozedur zur vergleichenden Beurteilung von Filtermedien vorgeschlagen werden.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Gegenüberstellung dieser Filterprüfungsergebnisse mit Ergebnissen der Oberflächenstrukturanalyse. Hierbei soll aufbauend auf den bisher vorhandenen Kenntnisstand und auf den am Institut entwickelten Bildanalysemethoden [8, 9] die Oberflächenstruktur der Filtermedien analysiert werden. Um die Streuung der Bildanalyseergebnisse zu erniedrigen ist es notwendig eine repräsentative Probennahmemethode zu entwickeln, hierfür soll ein Mikroskop mit motorisiertem Objekttisch und Softwarepaket zur Anwendung kommen, welches von der Firma Olympus vertrieben wird.
Da bisher die Thresholdsetzung visuell anhand der erkennbaren Faserumrisse erfolgte, waren die Ergebnisse von der subjektiven Wahrnehmung der Untersuchungsperson abhängig. Dieses Problem soll durch eine nicht subjektive automatisierte Thresholdbestimmungsmethode beseitigt werden.

Die automatisierte Thresholdsetzung soll auf verschiedene Filtermedien angewendet werden und anhand der Bildanalyseergebnisse sollen die Alterungs- und Filtrationsergebnisse dieser Filtermedien erklärt und interpretiert werden.

Es soll anhand von verschiedenen Versuchsreihen ermittelt werden ob die automatisierte Bildanalysemethode und die Alterungsmethode für eine vergleichende Beurteilung verschiedener Filtermedien verwendet werden kann. Anhand der Ergebnisse sollen Rückschlüsse bezüglich einer Verbesserung der Oberflächenstruktur und damit der Filtrationseigenschaften der Filtermedien gezogen werden.

3 Grundlagen der Abreinigungsfiltration

Als Abreinigungsfiltration wird eine Filtration mit periodischer Regenerierung des mit Partikeln beladenen Filtermediums bezeichnet. Die periodische Regenerierung erfolgt z.B. pneumatisch mittels Druckstoß, Rütteln bzw. Vibrieren. Während der Abreinigung werden die Staubpartikel weitestgehend entfernt und die nachfolgende Filtration beginnt wiederum bei einem geringeren Druckverlust (Abb. 3).

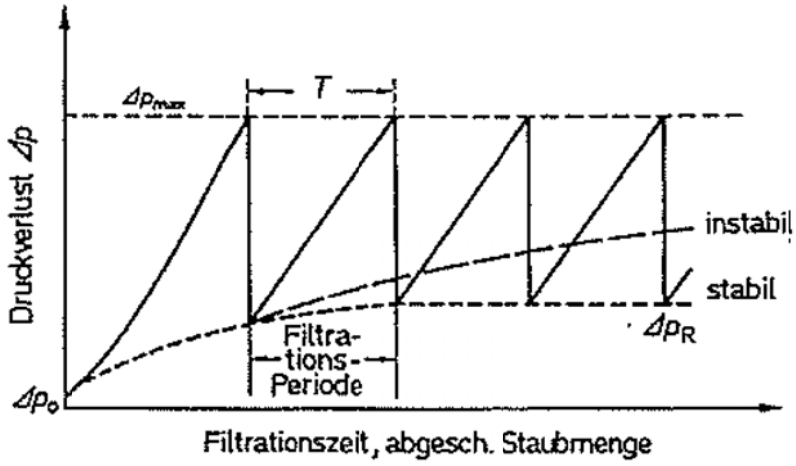


Abb. 3: Schematischer Verlauf des Druckverlustes bei druckgesteuerter Abreinigung [10]

Ein Abreinigungsfilter kann auch zeitgesteuert abgereinigt werden, dadurch ergibt sich ein zu Abb. 3 unterschiedliches zeitliches Druckverlustverhalten (Abb. 4).

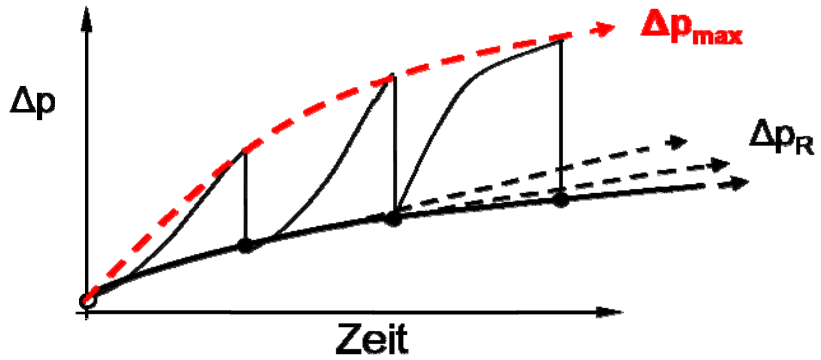


Abb. 4: Druckverlust-Zeit Verlauf bei der zeitgesteuerten Abreinigung

In Abb. 4 ist ersichtlich, dass der Abreinigungsdruckverlust Δp_{max} kontinuierlich steigt, da die Zykluszeit konstant gehalten wird. Bei der druckgesteuerten Abreinigung wird hingegen Δp_{max} konstant gehalten.

Apparativ werden die Abreinigungsfilter zumeist als Schlauchfilter mit Druckstoßabreinigung ausgeführt. Eine schematische Darstellung eines druckstoßabgereinigten Schlauchfilters zeigt Abb. 5.

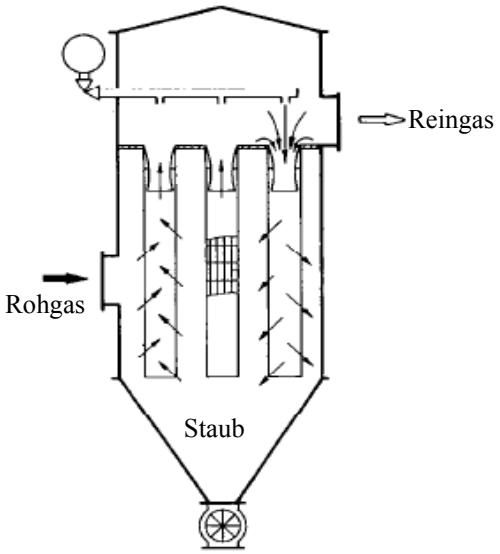


Abb. 5: Schematische Darstellung eines druckstoßabgereinigten Schlauchfilters. Links ist die Durchströmung des Filterschlauchs während der Filtration eingezeichnet, rechts die Durchströmung während der Abreinigung [2]

Um eine möglichst große Abreinigungseffizienz zu erreichen wird versucht ein Vordringen des Staubes in die Tiefe des Filtermittels zu verhindern. In der Tiefe eingelagerter Staub ist durch die zahlreichen Haftpunkte an den umliegenden Fasern während der Abreinigung stabilisiert und kann deshalb schwieriger abgelöst und ausgeblasen werden. Es wird deshalb versucht den Anteil der Oberflächenfiltration zu erhöhen, indem dichte und glatte Faserstrukturen an der Oberfläche erzeugt werden. Dichte Faserstrukturen an der Oberfläche bedingen eine schnelle Brückenbildung der Staubpartikel, welche ein weiteres Vordringen in die Tiefe verhindern. Durch eine glatte Oberflächenstruktur wird eine Sollbruchstelle zwischen dem Kuchen und der Filtermitteloberfläche geschaffen. Bei der Abreinigung mittels Druckstoß wird das Filtermedium zunächst stark beschleunigt und bei Erreichen der äußersten Auslenkung stark abgebremst, dadurch wirken auf den Filterkuchen Trägheitskräfte, welche die Ablösung bedingen (Abb. 6). Der durch den Abreinigungsdruckstoß hervorgerufene Rückspülvolumenstrom bedingt ebenfalls eine Ablösung von Partikeln (Durchblaseffekt).

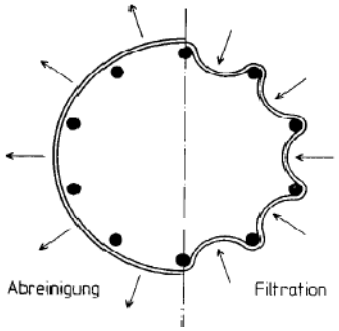


Abb. 6: Querschnitt durch einen Filterschlauch während der Abreinigung (links) und während der Filtration (rechts). Die schwarzen Kreise stellen die Stützstäbe dar, welche ein Kollabieren des Filterschlauches während der Filtration verhindern.

Bei idealer Abreinigungsfiltration kann nach einer Konditionierphase der anfiltrierte Staubkuchen während der Regeneration vollständig entfernt werden und es bildet sich ein

stabiles Druckverlustniveau nach der Abreinigung aus (Abb. 7). In der Praxis wird meist ein nahezu stabiler „quasistationärer“ Zustand des Druckverlustes erreicht.
Da die Abreinigung in der Praxis nicht vollständig ist und der verbleibende Staub meist inhomogen verteilt ist zeigt sich ein in Abb. 7 dargestellter nicht linearer Druckverlustanstieg über der Zykluszeit. Meist liegt nach der Abreinigung eine inhomogene Verteilung des nicht abgereinigten Staubes vor, welche u. a. durch das Freilegen von Porenstrukturen im Inneren des Filtermediums während der Abreinigung hervorgerufen wird.

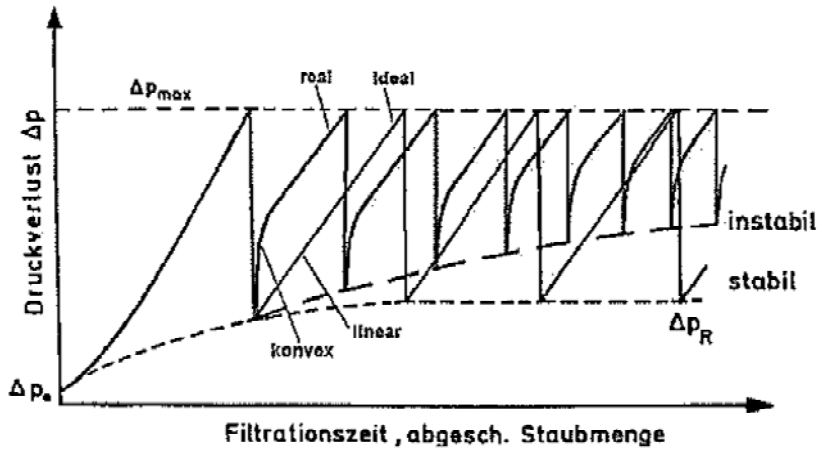


Abb. 7: Druckverlustverlauf bei realem und idealem Druckverlustverhalten [19]

Zu Beginn der Abreinigungsfiltration zeigt sich ein progressiver zeitlicher Druckverlustanstieg, welcher auf den Übergang von Tiefenfiltration zu Oberflächen- und Kuchenfiltration zurückzuführen ist. Je poröser das Filtermedium ist, desto länger dauert die Tiefenfiltrationsphase. Nach einigen Abreinigungen zeigt sich ein degressiver bzw. konvexer Druckverlustanstieg über der Zykluszeit. Der degressive Anstieg nach der Abreinigung resultiert aus einer anfänglichen Staubeinlagerung in den freigelegten Porenstrukturen bei örtlich hohen Geschwindigkeiten. Nach Auffüllen dieser Porenstrukturen vergleichmäßigt sich die Geschwindigkeitsverteilung und es erfolgt ein Filtrationskuchenaufbau, welcher sich in einem linearen zeitlichen Druckverlustanstieg manifestiert.
Der schnelle Aufbau des Filterkuchens während der Abreinigungsfiltration hat weiters den Vorteil einer stark erniedrigten Partikelpenetration. In Abb. 8 ist ersichtlich, dass der Filterkuchen eine effiziente Filtrationsschicht bildet. Nur während der Abreinigung kommt es zu einem erhöhten Partikeldurchtritt durch das Filtermedium.

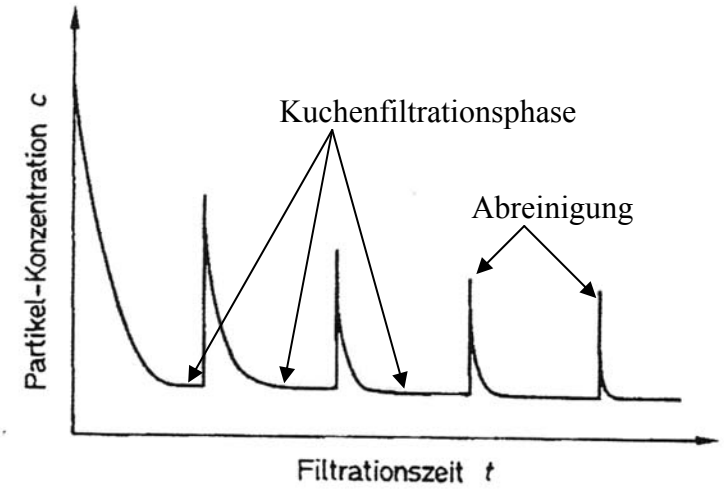


Abb. 8: Schematischer Verlauf der Partikelkonzentration im Reingas in Abhängigkeit von der Filtrationszeit bei Abreinigungsfiltern (bei konstanter Rohgaskonzentration) [3]

Der vermehrte Partikeldurchtritt während der Abreinigung wird u. a. durch die Ablösung von Partikeln beim Zurückschlagen des Filtermediums nach dem Abklingen des Abreinigungsüberdrucks auf die Stützstäbe hervorgerufen. Weiters bedingt auch der Rückspülvolumenstrom während der Abreinigung eine Ablösung von Partikeln. Da während der Abreinigung der Kuchen meist vollständig entfernt wird, fehlt bei der nachfolgenden Filtration zu Beginn die für die Partikelabscheidung hocheffiziente Kuchenschicht und es kann deshalb ein vermehrter Partikeldurchtritt beobachtet werden.
Die Auswahl von Betriebsbedingungen und geeigneten Filtermedien für industrielle Anlagen basiert zu einem großen Teil auf der Erfahrung des Anlagenbauers. Dies bedingt jedoch größere Risiken für den Bau und den Betrieb einer Anlage. Es wird deshalb versucht die Risiken durch Vorversuche zu minimieren. Es bewährten sich deshalb in der Praxis Laborfilterprüfstände, in welchen bei vergleichsweise geringem Aufwand Filtermittelprüfungen durchgeführt werden können.

4 Filtermittelprüfung in Filterprüfständen

Filtermittelprüfungen an Filterprüfständen dienen der Auswahl von geeigneten Filtermedien, der Abschätzung von großtechnischen Filtrationseigenschaften und der Festlegung von möglichst stabilen Betriebszuständen. Das Festlegen von industriellen Betriebszuständen von Abreinigungsfiltern anhand von Filterprüfergebnissen an Laborfilterprüfständen ist jedoch meist nur bedingt möglich. Gründe dafür sind die komplexen Betriebsbedingungen der Großanlage wie z.B. das Testaerosol, die Temperatur, die Abgaszusammensetzung, die Schwankungen der Betriebsbedingungen und der komplexe Aufbau der Großanlage. Diese Charakteristika der Großanlage können durch Filterprüfungen nur unzureichend nachgebildet werden. Um diese Übertragungsprobleme besser bewältigen zu können, werden vermehrt mobile Filtersonden eingesetzt, welche an das Schlauchhaus angeflanscht werden können [11]. Mit Hilfe dieser Filtersonden können praxisnähere Bedingungen erreicht werden und dadurch kann die Aussagekraft der Meßergebnisse erhöht werden.
Die für diese Prüfungen konzipierten Filtermittelprüfstände, Prüfbedingungen und Prüfprozeduren werden im Moment durch vier nationale Richtlinien festgelegt: VDI 3926 (Deutschland) [3], ASTM D 6830 02 (USA) [4], JIS Z 8909-1 (Japan) [5] und GB 126252005

(China) [6]. Zurzeit ist ein ISO-Normprozess im Gange, welcher in einem ISO- Standard münden soll, mit dem Hauptziel einer internationalen Vergleichbarkeit der Filtermittelprüfungen. Dieser Normprozess befindet sich derzeit im Stadium Committee Draft (CD) ISO/CD 11057 und wird voraussichtlich 2011 abgeschlossen [7].

4.1 Historische Entwicklung der Prüfprozeduren

Die historische Entwicklung der Prüfprozeduren wird am Beispiel der VDI 3926 Richtlinie diskutiert. Die VDI-Richtlinie 3926, Blatt 1 „Prüfung von Filtermedien für Abreinigungsfilter“ liegt seit Dezember 1994 vor [12]. Für die Durchführung der Filtermittelprüfungen werden zwei Filtermitteltestände vorgeschlagen welche mit „Typ 1“ und „Typ 2“ bezeichnet werden.

4.2 Filtermittelprüfstände

4.2.1 Filtermittelprüfstand Typ 1

Mit Hilfe der in Abb. 9 dargestellten Apparatur wurde parallel ein Staubkuchen auf einer planaren Filtermittelronde und einem Filterschlauch aufgebaut. Es wurde festgestellt, dass ein ähnlicher Staubkuchenströmungswiderstand an den Filterronden im Vergleich zu dem Filterschlauch resultiert. Eine Anordnung der Ronde normal zur Hauptströmungsrichtung führte hingegen zu starken Abweichungen [13].

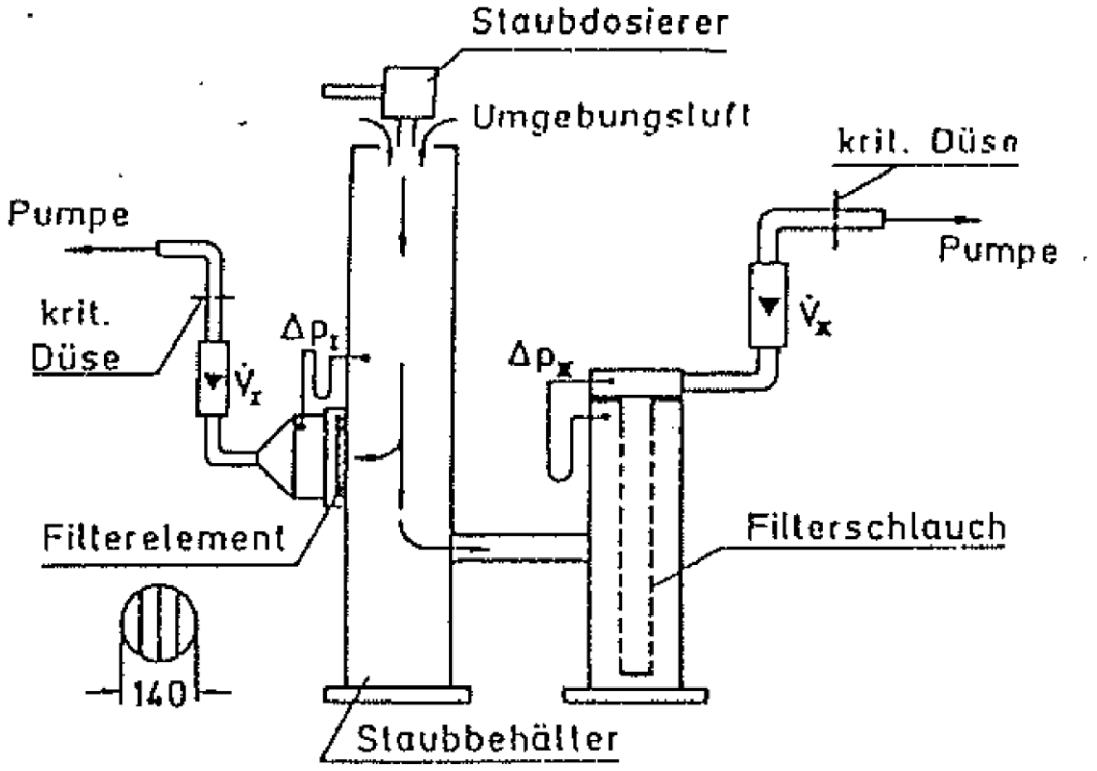


Abb. 9: Laborapparatur zum Aufbau eines Staubkuchens [13]

Die genannten Versuchsergebnisse bilden die Grundlage für die im Filtermittelprüfstand Typ 1 realisierte Querstromanordnung der Filterronde Abb. 10.

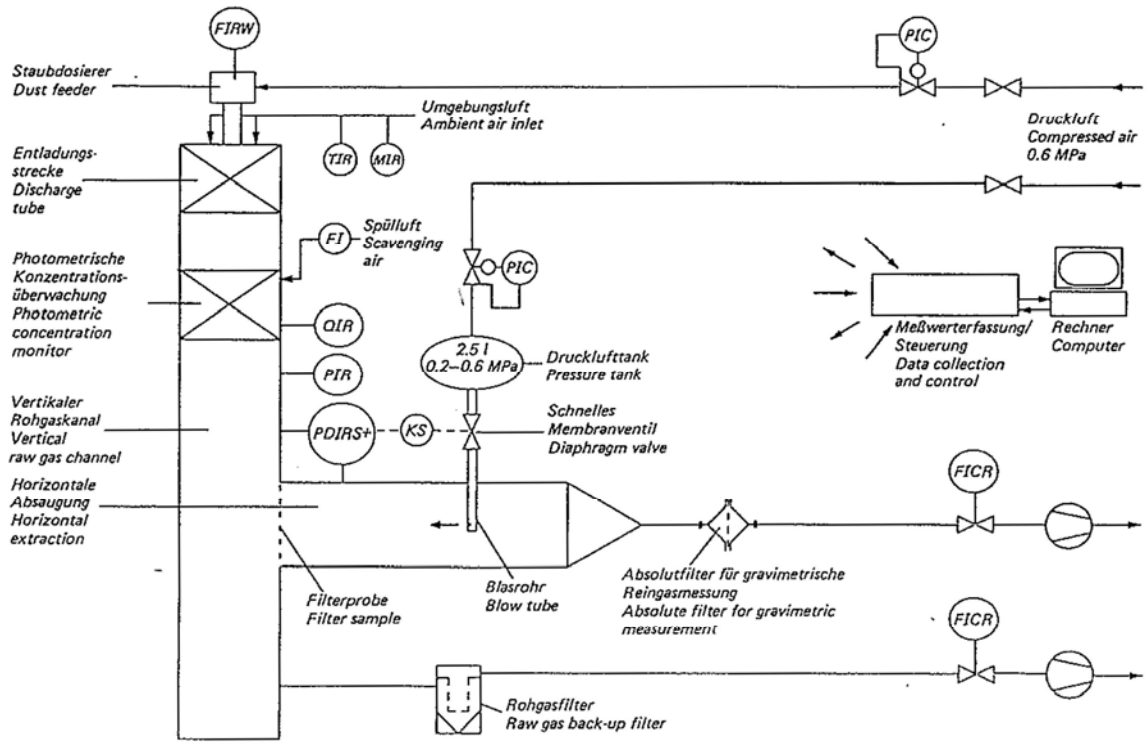


Abb. 10: Prüfvorrichtung für textile Filtermedien Typ 1 [12]

Der Filtermittelprüfstand Typ 1 besitzt einen vertikalen Rohgaskanal und filtriert einen Teilstrom im Querstromprinzip durch eine kreisförmige Filtermittelprobe, welche planar an der Seitenwand des Rohgaskanals angeflanscht wird (Abb. 10). Der kreisförmige Reingaskanal des Typ 1 Filtermittelprüfstands besitzt einen Innendurchmesser von 140 mm. Die Abreinigungseinheit des Typ 1 Teststandes injiziert den Druckstoß durch eine 3 mm breite Öffnung in Richtung Filtermittelronde. Das Reingas wird nach der Filtermittelprobe durch einen Absolutfilter filtriert und von der Vakuumpumpe angesaugt. Moderne Ausführungen des Teststands verwenden Massendurchflussregler, um die Volumenströme zu regeln.
Der Typ 1 Filtermittelprüfstand besitzt durch die gewählte Querstromfiltration einen technisch komplexeren Aufbau und größeren Raumbedarf als der kompaktere Typ 2 Filtermittelprüfstand.

4.2.2 Filtermittelprüfstand Typ 2

Der Filtermittelprüfstand Typ 2 verfügt über einen horizontalen Rohgaskanal an dessen Ende das Prüffiltermedium angeordnet ist und welcher danach in den Reingaskanal übergeht (Abb. 11).

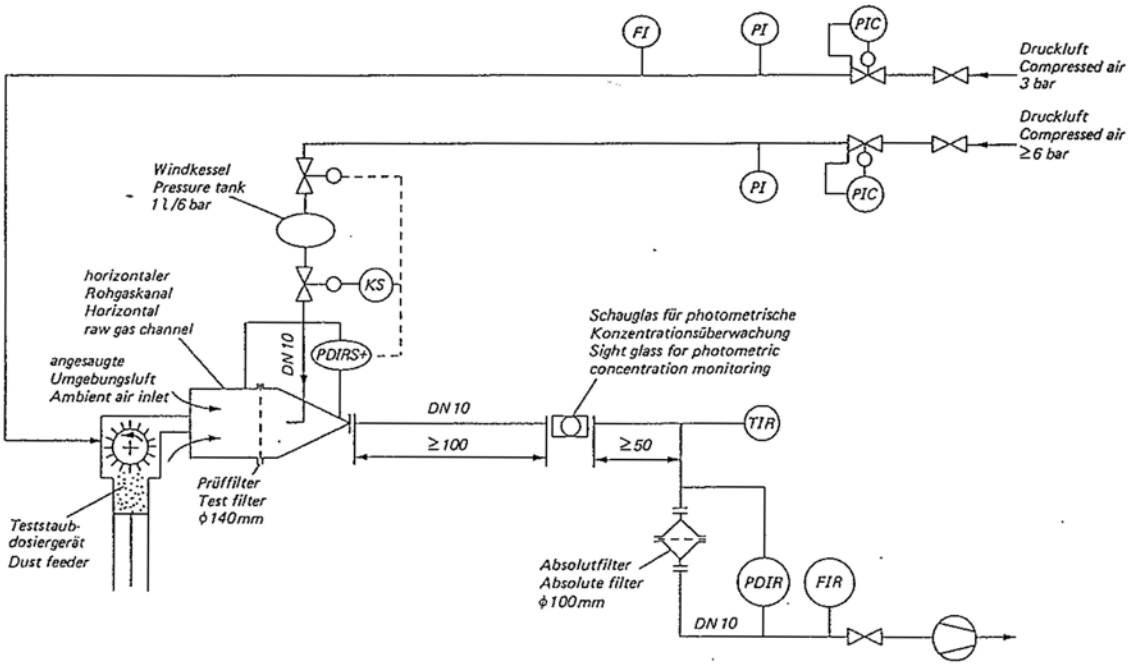


Abb. 11: Prüfvorrichtung für textile Filtermedien Typ 2 [12]

Der Teststaub wird beim Typ 2 Filtermittelprüfstand durch einen Bürstendosierer dispergiert und direkt in den horizontalen Rohgaskanal aufgegeben. Der Innendurchmesser des kreisförmigen Roh- bzw. Reingaskanals beträgt 150 mm. Die Abreinigungseinheit des Typ 2 Teststandes injiziert den Druckstoß durch eine 3 mm breite Öffnung in Richtung Filtermittelronde. Langzeitversuche am Typ 2 Filtermittelprüfstand werden durch eine Anhäufung des abgereinigten Staubes vor der Filtermittelronde behindert und eine zu große Anhäufung bedingt eine Reinigung des Rohgaskanals während der Testzeit. Der Absaugvolumenstrom wird durch Massendurchflussregler reguliert.

4.2.3 Filtermittelprüfstand der BTU Cottbus

Von der BTU Cottbus und der Firma Junker Filter GmbH wurde ein Filterprüfstand gebaut (Abb. 12).

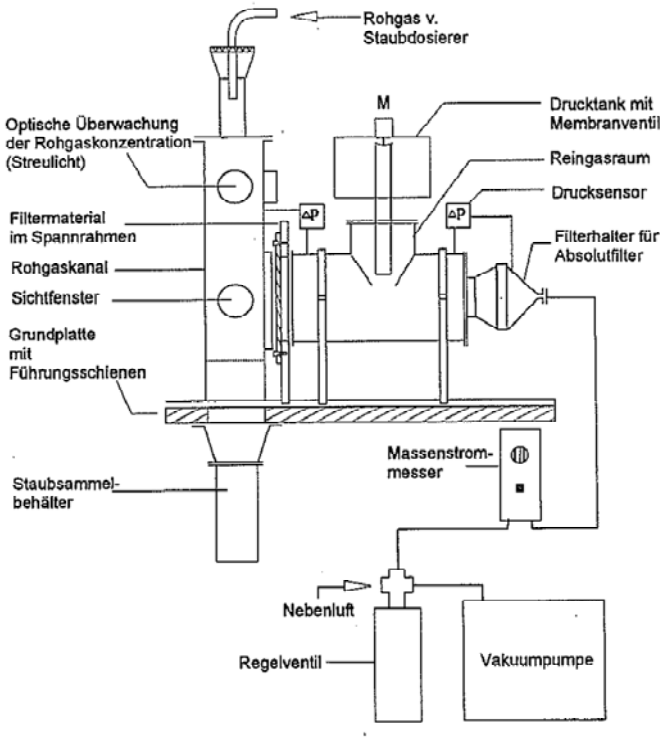


Abb. 12: Schematische Darstellung des Filtermittelprüfstands der BTU Cottbus [20]

Der Rohgaskanal besitzt einen rechteckigen Querschnitt in welchem eine kreisförmige Filtermittelprobe (d=200 mm) eingelassen ist. Durch den Verzicht auf den Querstrombetrieb wird ein geringerer Volumenstrom an Gas gefördert was apparative Vereinfachungen mit sich bringt. Weiters kann der Verbrauch an Teststaub reduziert werden. Die Autoren weisen darauf hin, dass der beschriebene Teststand vor allen bei Messungen vor Ort Vorteile gegenüber den Prüfständen Typ 1 und Typ 2 besitzt. Hierbei wird vor allem die Kompaktheit im Vergleich zum Prüfstand Typ 1 hervorgehoben und die Möglichkeit der Queranströmung, welche bei den Messungen vor Ort Vorteile bietet, hervorgehoben.

4.2.4 Filtermittelprüfstand nach JIS Z 8909-1

Der Filtermittelprüstand nach JIS Z 8909-1 (Japan) besitzt einen vertikalen Rohgaskanal mit seitlich angeflanschtem Reingaskanal mit quadratischem Querschnitt (300 x 300 mm) (Abb. 13). Der Teststaub wird durch einen zweistufigen Schneckendosierer dosiert und mit Hilfe von Druckluft dispergiert. Die Abreinigungseinheit ist auf der Oberseite des Reingaskanals angebracht, wobei der Abreinigungsdruckstoß durch eine 9 mm breite Öffnung in vertikaler Richtung nach unten in den Rohgaskanal freigesetzt. Der gesamte Rohgasstrom wird im JIS Teststand durch den Filterprüfling filtriert.

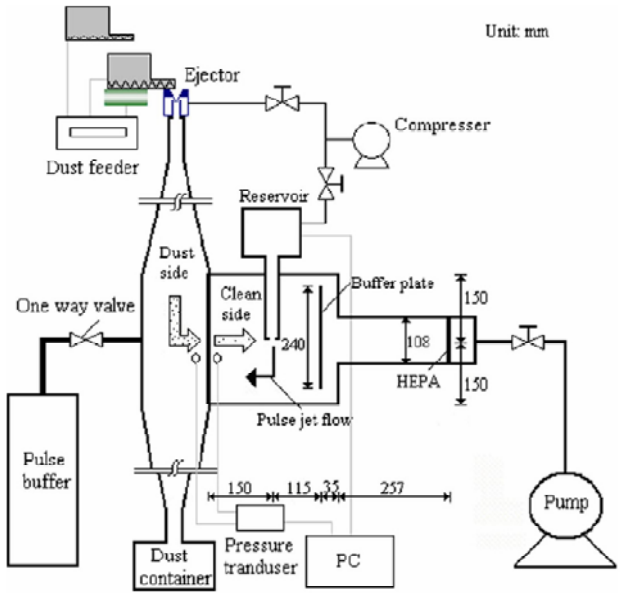


Abb. 13: Schematische Darstellung des Filtermittelprüfstands nach JIS Z 8909-1 [14]

4.3 Standardprüfbedingungen nach VDI 3926

Die Standardprüfbedingungen, welche für die beiden Teststände Typ 1 und Typ 2 vorgegeben werden, sind in Tab. 1 aufgelistet.

	Typ 1	Typ 2
Rohgasvolumenstrom [m^3/h]	5,8	-
Filteranströmgeschwindigkeit [m/h]	180	180
Staubkonzentration am Filter [g/m^3]	5	5
Druckverlust vor der Abreinigung [Pa]	1000	1200
Tankdruck [MPa]	0,5	0,25
Ventilöffnungszeit [ms]	50	50
Teststaub (i. d. Regel)	Mikrocalcilin	TiO_2
Anzahl der Filtrationszyklen	100	10

Tab. 1: VDI-Standardprüfbedingungen nach [12]

Wie in Tab. 1 ersichtlich, legt sich die VDI-Richtlinie nicht auf einen besonderen Teststaub fest. In Tab. 2 sind drei in der Norm vorgeschlagene Prüfstäube aufgelistet. Die Auswahl der Prüfstäube wurde so getroffen, dass eine weitgehend praxisbezogene Prüfung durchgeführt werden kann.

Teststaub	Aluminiumoxid	Kalkstein	Titandioxid
Hersteller	Condea Chemie GmbH	Ulmer Füllstoff Vertrieb	Kronos Titan GmbH
Bezeichnung	Pural ® NF	Micro-Calcilin	Kronos 2160
Fließverhalten	frei fließend	Agglomerierend	stark agglomerierend
Chemische Zusammensetzung	Al_2O_3	$CaCO_3$	TiO_2
Partikelgrößenverteilung	99 % < 100 µm 90 % < 25 µm 50 % < 4 µm	99 % < 12 µm 90 % < 3,8 µm 50 % < 2 µm	100 % < 1,2 µm 50 % < 0,9 µm

Tab. 2: Vorgeschlagene VDI- Teststäube [12]

Praxisversuche zeigen, dass Titandioxid aufgrund seiner Agglomerationseigenschaften schwierig zu dosieren ist. Micro-Calcilin wiederum dringt aufgrund der Agglomerationseigenschaften wenig in das Filtermedium ein und verursacht einen geringen Kuchendruckverlust. Es resultieren daher längere Zykluszeiten und infolge länge Gesamttestzeiten. Pural NF dringt leichter in das Filtermedium ein und bedingt einen höheren Restdruckverlust und dadurch kürzere Gesamttestzeiten.
Öfters reichen die vorgeschlagenen Teststäube nicht aus um die Eigenschaften von industriellen Stäuben zu simulieren und deshalb wird Staub aus der betreffenden Anlage für die Filtermittelprüfungen verwendet.

4.4 Langzeitfiltrationsverhalten (Alterung)

In der Prüfprozedur der VDI 3926 (1994) sind 10 bzw. 100 Zyklen (siehe Tab. 1, Seite 18) für die Filtermittelprüfung vorgesehen. Wenn man eine industrielle Einsatzdauer von ca. 2-4 Jahren in Betracht zieht, ergeben sich ca. 200.000 - 400.000 Zyklen [14]. Ein Ergebnis über das Filtrationsverhalten von 10 - 100 Zyklen ist für die Beurteilung von 200.000 - 400.000 Zyklen meist nur bedingt brauchbar, da weitläufige Extrapolationen meist mit großen Fehlern behaftet sind. Deshalb soll eine Alterungsphase in die Prüfprozedur aufgenommen werden mit deren Hilfe das Langzeitfiltrationsverhalten abgeschätzt werden kann.
Beim industriellen Langzeitbetrieb können sich die Filtermedieneigenschaften irreversibel verändern, die irreversible Veränderung von Filtrationseigenschaften wird in weiterer Folge als Alterung bezeichnet. Die häufigsten Einflußfaktoren welche zu einer irreversiblen Veränderung führen können in folgende Gruppen eingeteilt werden:

- Chemische Alterung
- Mechanische Alterung
- Alterung durch irreversible Filtermedienverstopfung

4.4.1 Chemische Alterung

Die Materialien des Filtermittels können angegriffen werden. Eine Schädigung kann z.B. durch Wärme, Dampf, Säuren, Alkalien, Lösungsmittel, Prozeß- und Rauchgase, Luft und Licht hervorgerufen werden. Es wird deshalb meist in Datenblättern die Beständigkeit der Materialien aus denen die Filtermedien bestehen gegen Säuren, Alkalien, Hydrolyse usw. angegeben. Weiters wird z.B. die Dauer- und Spitzentemperaturbeständigkeit und der Limiting Oxygen Index (LOI) angegeben, welcher den minimalen Sauerstoffanteil angibt, ab dem eine Verbrennung des Fasermaterials stattfindet.

4.4.2 Mechanische Alterung

Die mechanische Alterung während des Langzeitbetriebes wird vor allem durch die mechanische Belastung des Filtermediums während der Abreinigung hervorgerufen. Durch das periodische Abreinigen wird der Filterschlauch durch einen stoßartig auftretenden Überdruck aufgeblasen und nach Abklingen des Überdrucks prallt das Filtermedium auf den Stützkorb zurück. Da diese Vorgänge sehr schnell ablaufen treten stoßartige Belastungen am Filtermedium auf, welche den Faserverbund stark belasten bzw. zur teilweisen Lockerung des Faserverbundes oder zum Riß führen. Bei den textilen Filtermedien haben Nadelfilze einen hohen Marktanteil, da sie u. a. durch die in Abb. 14 dargestellte Vernadelung, eine sehr hohe mechanische Stabilität aufweisen.

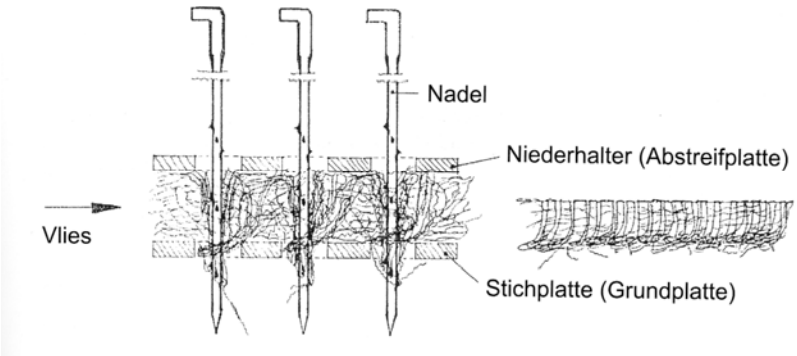


Abb. 14: Prinzipielle Darstellung der Vernadelung bei Nadelfilzen [15]

Durch den Nadeleinstich werden Fasern durch das Filtermedium durchgezogen und durch den Vorlauf und die Strichplatte umgelegt. Bei nachfolgenden Einstichen werden u. a. die durch den vorhergehenden Einstich durchgezogenen und umgelegten Fasern wiederum erfaßt, verhakt und dadurch stärker miteinander verbunden. Die Vernadelung führt zu einer stabilen Verhakung der Fasern, welche durch das meist im oberen Drittel bis mittig eingelegte Stützgewebe noch verstärkt wird. Das Stützgewebe ist meist ein Multifilamentgewebe, welches die Faserverbundstabilität und die Zugfestigkeit erhöht. Nadelfilze haben aufgrund ihrer im Vergleich zu anderen technischen Textilien günstigen Herstellbarkeit und aufgrund ihrer herausragenden mechanischen Eigenschaften einen großen Marktanteil im Bereich der technischen Textilien erreicht [16]. Eine weitere Technologie der Vliesverfestigung ist die Wasserstrahltechnologie [17,18]. Hier wird mittels feinen Hochdruckwasserstrahlen eine Verwirbelung der Fasern erreicht. Die Fasern oder Faserteile werden durch die auftreffenden Fluidstrahlen erfaßt, umorientiert, mit anderen Faserelementen verwirbelt, verschlungen oder verknotet (Abb. 15).

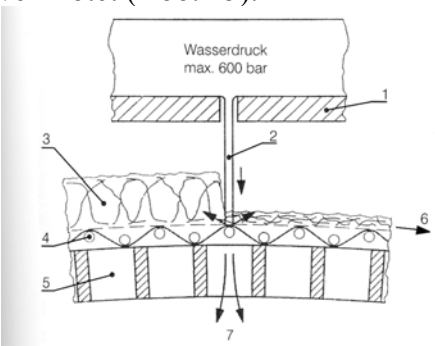


Abb. 15: Prinzip der Vliesverwirbelung mittels Fluidstrahlen [15]. 1 Wasserbalken, 2 Wasserstrahl, 3 unverfestigtes Vlies, 4 Siebunterlage, 5 Trommel, 6 verfestigter Vliesstoff, 7 Luft- und Wasserrücklauf

4.4.3 Alterung durch irreversible Filtermedienverstopfung

Wie im Kapitel 3 Grundlagen der Abreinigungsfiltration diskutiert wurde, kann meist kein stationäres Betriebsverhalten beobachtet werden und es zeigt sich eine leicht zunehmende irreversible Verstopfung (quasistationäres Verhalten). Über 2-4 Jahre ergibt sich jedoch meist eine nicht zu vernachlässigende Beeinträchtigung des Betriebsverhaltens durch die irreversible Verstopfung. Die irreversible Verstopfung beeinflußt nicht nur den Restdruckverlust sondern durch die flächenmäßig inhomogene Verteilung des Staubes auch den Druckverlust über den sich aufbauenden Staubkuchen und dadurch die Zykluszeit. Durch den größeren Druckverlust und den schnelleren Druckverlustanstieg resultiert ein höherer Ventilatorenergiebedarf des Schlauchhauses bzw. ein höherer Kompressorenergiebedarf für den Abreinigungstank.

4.5 Prüfprozeduren in den Normen

4.5.1 Prüfbedingungen nach VDI 3926 (2004)

Von Seiten der Filtermedienhersteller, Anlagenbetreiber und Anlagenbauer wurden Forderungen nach Verbesserungen der VDI-Richtlinie 3926, Blatt 1, Dezember 1994 erhoben. Gefordert werden Daten, die eine Aussage über das Filtrationsverhalten eines Mediums im Langzeitbetrieb zulassen [19]. Aufgrund dieser Problematik und den gesammelten Erfahrungen mit der Richtlinie wurde diese 1999 von einem Anwenderkolloquium gründlich überarbeitet [20]. Wesentliche Änderungen waren die Festlegung auf einen speziellen Teststaub (Pural NF), auf einen Filterteststand (Typ 1), die Reduzierung der Filteranströmgeschwindigkeit von 3 auf 2 m/min und die Einführung einer Dauerbelastungsphase („Alterung“) über 10.000 zeitgesteuerte Abreinigungen [12]. Die Alterungsphase dient zum Abschätzen des Langzeitverhaltens. Bei der Konzeption der Filterprüfung mit Alterung sollen die Rahmenbedingungen einer moderaten Gesamttestzeit und einer einfachen Durchführbarkeit eingehalten werden. Die überarbeitete Richtlinie liegt seit Oktober 2004 vor [3]. Für die Filtermittelprüfung werden die in Tab. 3 dargestellten Versuchsparameter und Toleranzen festgelegt.

	Sollwert	Toleranz
Filterflächenbelastung [$m^3/(m^2h)$]	120	±3 %
Staubkonzentration am Filter [g/m^3]	5	±10 %
Teststaub	Pural NF	
Druckverlust vor der Abreinigung [Pa]	1000	±1 %
Tankdruck [MPa]	0,5	±3 %
Ventilöffnungszeit (elektrisch) [ms]	60	

Tab. 3: Versuchsparameter und Toleranzen [3]

Die Prüfprozedur wurde in vier Phasen aufgegliedert, welche in Tab. 4 näher beschrieben werden.

	Bedingungen	Bestimmung der Reingaskonzentration
Phase1 : Filterbetrieb im Neuzustand	30 Beladungszyklen mit differenzdruckgesteuerter Abreinigung	Ja
Phase 2: künstliche Alterung	10.000 Abreinigungen zeitgetaktet alle 5 s	nicht erforderlich
Phase 3: Stabilisierung	10 Beladungszyklen mit differenzdruckgesteuerter Abreinigung	nicht erforderlich
Phase 4: Filterbetrieb im gealterten Zustand	30 Beladungszyklen mit differenzdruckgesteuerter Abreinigung, mindestens jedoch 2 h	Ja

Tab. 4: Ablauf der Standardprüfung in vier Phasen [3]

4.5.2 Prüfbedingungen nach ISO/CD 11057

Untersuchungen mit der von der VDI 3926 (2004) vorgeschlagenen Prüfprozedur zeigten jedoch, dass eine Alterung mit einer Zykluszeit von 5 s nicht geeignet ist (siehe Kapitel 4.6, Seite 23), um das Langzeitverhalten von Filtermedien ausreichend darzustellen [21]. Die Autoren schlagen höhere Zykluszeiten vor, da diese eine bessere Vergleichbarkeit bezüglich Restdruckverlust, Zykluszeit und Emissionscharakteristik zu industriell relevanten Zykluszeiten aufweisen. Bei dem neueren ISO/CD 11057 Normentwurf [7] wurden diese Untersuchungsergebnisse berücksichtigt und es wird deshalb eine Zykluszeit von 20 s und eine Zyklenanzahl von 2500 vorgeschlagen (Prüfungsablauf und Prüfungsbedingungen siehe Tab. 5, Tab. 6).

Meßphasen	Bedingungen	Bestimmung der Reingaskonzentration
Phase 1: Konditionierung	30 Beladungszyklen mit differenzdruckgesteuerter Pulsjet Abreinigung bei einem Abreinigungsdruckverlust von 1000 Pa	Ja
Phase 2: Alterung	2500 Pulsjet Abreinigungen mit einer Zykluszeit von 20 s	Nein
Phase 3: Stabilisierung	10 Beladungszyklen mit differenzdruckgesteuerter Pulsjet Abreinigung	Nein
Phase 4: Messung	2 h Beladungszyklen mit differenzdruckgesteuerter Pulsjet Abreinigung bei einem Abreinigungsdruckverlust von 1000 Pa	Ja
Phase 5: Optionale Messung	2 h Beladungszyklen bei einem erhöhten Abreinigungsdruckverlust von 1800 Pa	Ja

Tab. 5: Prüfungsablauf nach ISO Normentwurf [7]

In Tab. 5 wird optional zur Phase 4 eine 2 h dauernde Filtrationsphase mit einer Abreinigungsdruckdifferenz von 1800 Pa vorgeschlagen. Diese Option soll gewählt werden, wenn die Zykluszeit in der Phase 4 kleiner als 30 s ist, bzw. der lineare Kuchendruckverlustanstieg nicht mehr erreicht wird.

Parameter	Einheit	Wert	Toleranz
Filtrationsgeschwindigkeit	[m/min]	2	± 3 %
Staubkonzentration am Filter	[g/m^3]	5	± 7 %
Teststaub	Pural NF ($d_{50,3}$≈4,5 µm)		
Druckverlust vor der Abreinigung	[Pa]	1000	± 1 %
Tankdruck	[MPa]	0,5	± 3 %
Ventilöffnungszeit (elektrisch)	[ms]	60	

Tab. 6: Prüfparameter nach ISO Normentwurf [7]

4.6 Wissenschaftliche Erkenntnisse zur Alterung

Erste Filterprüfergebnisse mit der vom Anwenderkolloquium überarbeiteten Version der VDI 3926, welche im Oktober 2004 veröffentlicht wurde, sind von Gäng [19] veröffentlicht worden (Abb. 16, Abb. 17).

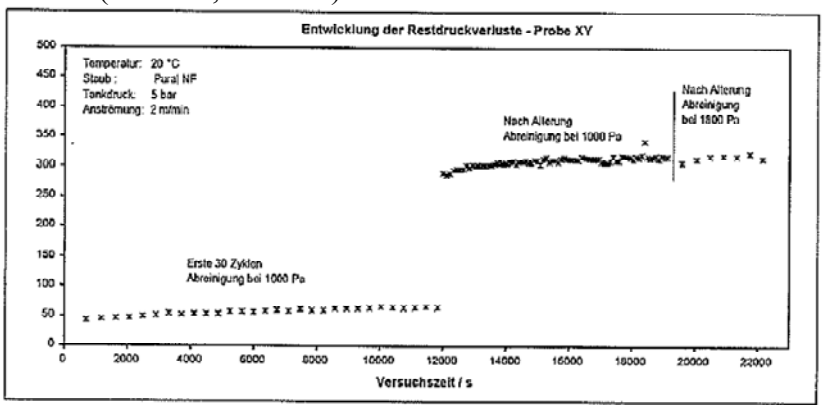


Abb. 16: Entwicklung der Restdruckverluste, Beschriftung y-Achse in [Pa] [19]

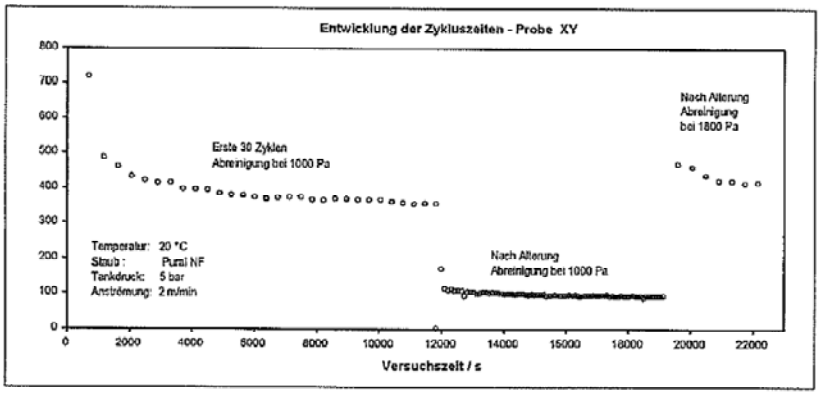


Abb. 17: Entwicklung der Zykluszeiten, Beschriftung y-Achse in [s] [19]

In Abb. 16 und Abb. 17 ist ersichtlich, dass das Filtermedium nach der Alterung und Stabilisierung einen geringeren Restdruckverlustanstieg bzw. eine geringere Zykluszeitverkürzung aufweist als während der ersten 30 Zyklen der Filtermittelprüfung. Hierbei gilt es jedoch zu bedenken, dass auch das Restdruckverlust- und Zykluszeitniveau während der Alterung stark angestiegen bzw. abgesunken ist.
Die Änderungen im ISO-Normentwurf im Vergleich zur VDI-Richtlinie sind u. a. auf neue wissenschaftliche Erkenntnisse bezüglich des Alterungsprozesses zurückzuführen. Binnig et al. [21] untersuchten den Einfluß der Zykluszeit auf das Alterungsergebnis. Binnig [22] fand bei Versuchen am Typ 1 Prüfstand die in Abb. 18 dargestellte Abhängigkeit der Zykluszeit vom Restdruckverlust. Weiters verglich er Alterungsversuche bei verschiedenen Zykluszeiten

am Typ 1 Filtermittelprüfstand und an einer Filterschlauchalterungskammer (Abb. 19, Abb. 20).

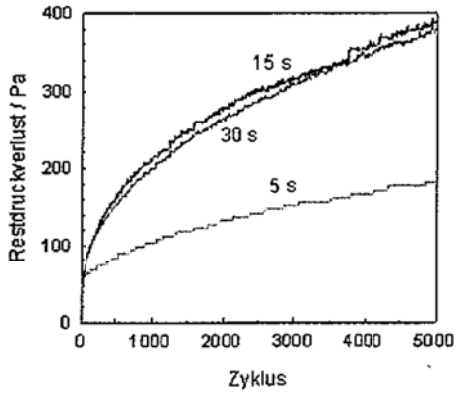


Abb. 18: Abhängigkeit des Restdruckverlusts von der Zykluszeit bei der Alterung (Scharrparameter: Zykluszeit) [22]

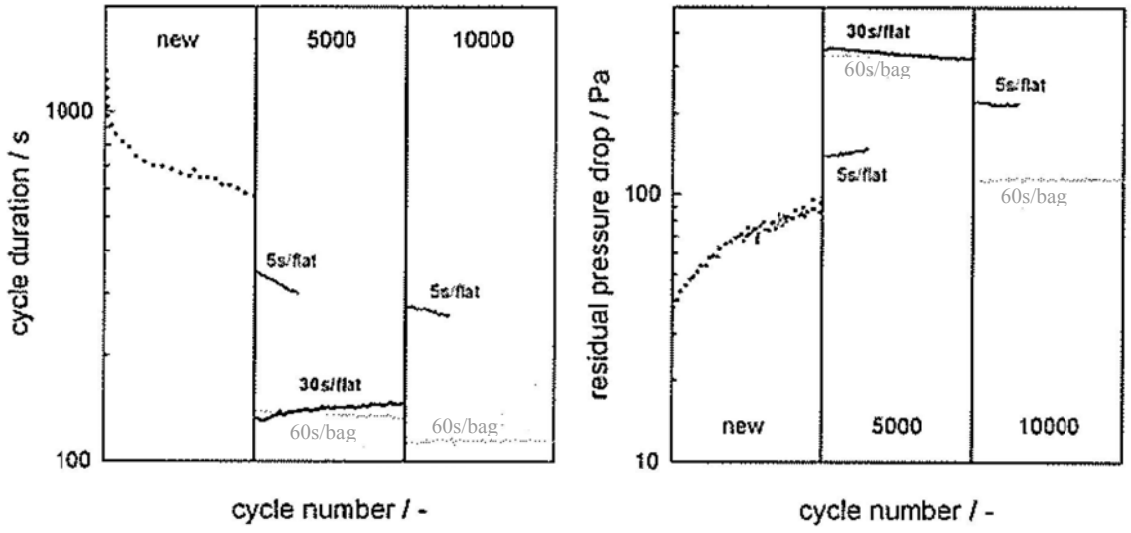


Abb. 19: Zykluszeit und Restdruckverlust nach verschiedenen Alterungsmethoden (Abkürzungen: 5s/flat: Alterung mit 5 s Zykluszeit in einem VDI 3926 Typ 1 Filtermittelprüfstand, 30s/flat: Alterung mit 30 s Zykluszeit in einem VDI 3926 Typ 1 Filtermittelprüfstand, 60s/bag: Alterung an einem Filterschlauch mit 60 s Zykluszeit) [14]

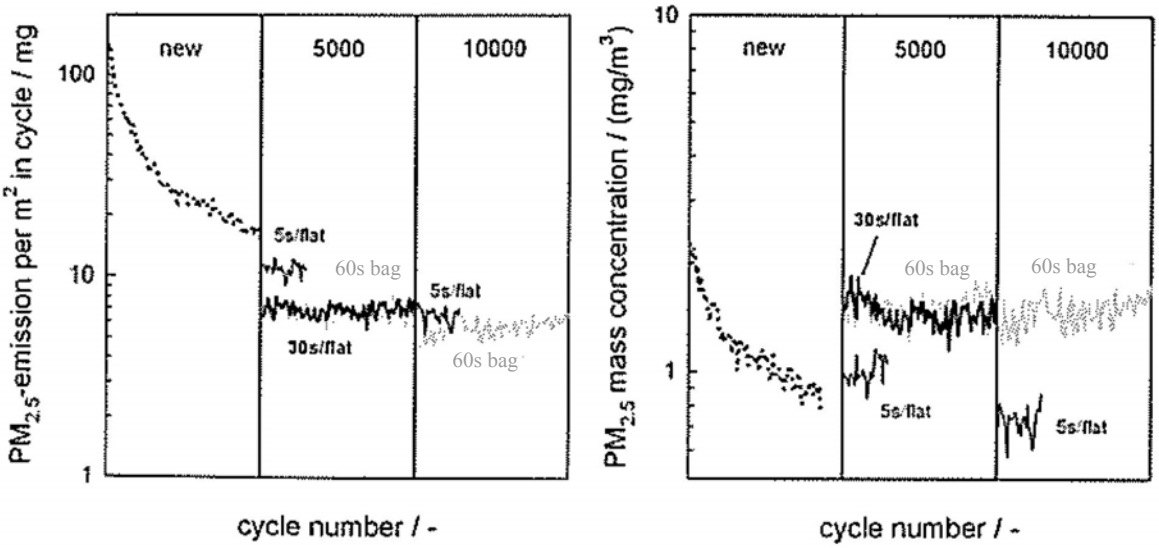


Abb. 20: Ergebnisse von $PM_{2,5}$ Messungen nach verschiedenen Alterungsmethoden [21]

Abb. 18 zeigt, dass bei gleichen Zyklenzahlen Alterungen mit einer Zykluszeit von 15 s bzw. 30 s einen größeren Restdruckverlust hervorrufen als eine Alterung mit 5 s Zykluszeit. Ein ähnliches Ergebnis kann auch in Abb. 19 erkannt werden, hier zeigt eine Filtermittelprüfung nach einer Alterung bei 5 s Zykluszeit kleinere Restdruckverluste und größere Zykluszeiten als eine Alterung mit 30 s bzw. 60 s Zykluszeit. Abb. 20 zeigt, dass die Alterungsprozedur einen Einfluß auf die $PM_{2,5}$ Emissionen der Endprüfung besitzt, wobei wiederum die Alterungsprozedur mit 5 s Zykluszeit stärkere Abweichungen aufwies. Binnig schloß aus der Diskrepanz zwischen den 5 s Zykluszeit Resultaten und den Resultaten der anderen untersuchten Zykluszeiten 15 s, 30 s und 60 s, dass Zykluszeiten von 5 s nicht zu einer ausreichenden Filtermittelalterung führen. Eine plausible dafür Erklärung ist, dass es bei zu kleinen Zyklen nicht zur Ausbildung eines Filterkuchens kommt und dass deshalb unterschiedliche Verstopfungsmechanismen auftreten. Bei einer unterschiedlichen Filterverstopfung ergeben sich in weiterer Folge unterschiedliche Filtrationseigenschaften.
Mao et al. [14] führten Alterungsuntersuchungen bei verschiedenen Zykluszeiten an einem Filtermittelprüfstand nach JIS Z 8909-1 durch (Abb. 21). Sie fanden ähnlich zu den Ergebnissen von Binnig (Abb. 18) ebenfalls einen degressiven Anstieg des Restdruckverlusts über der Zyklenanzahl.

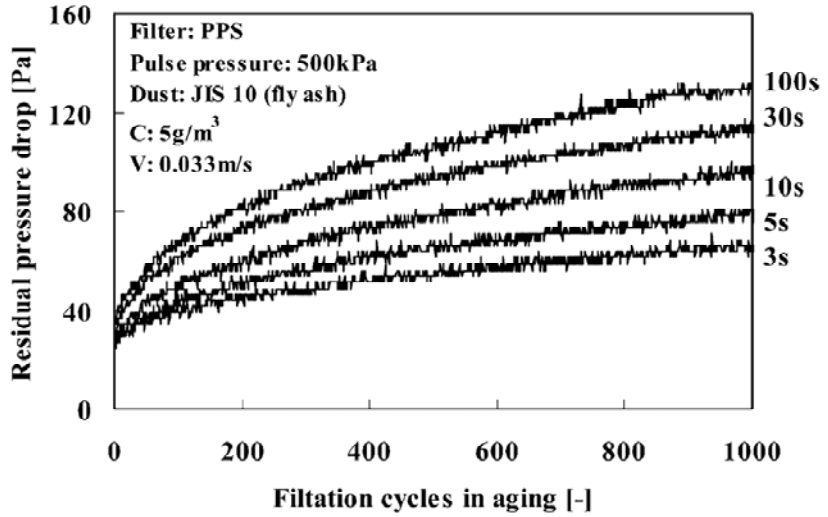


Abb. 21: Abhängigkeit des Restdruckverlusts von der Zyklenanzahl am JIS Teststand (Scharrparameter Zykluszeit) [14]

In Abb. 21 ist ersichtlich, dass der Restdruckverlust über der Zyklenzahl bei größeren Zykluszeiten stärker ansteigt. Dies ist auf das größere durchgesetzte Rohgasvolumen und auf die größeren filtrierten Staubmassen bei höheren Zyklenzahlen zurückzuführen, welche eine größere Verstopfung und dadurch einen größeren Restdruckverlust bedingen.
Wird jedoch der Restdruckverlustanstieg über der Gesamttestzeit [14] analysiert, so ergibt sich eine unterschiedliche Abhängigkeit von der Zykluszeit (Abb. 22).

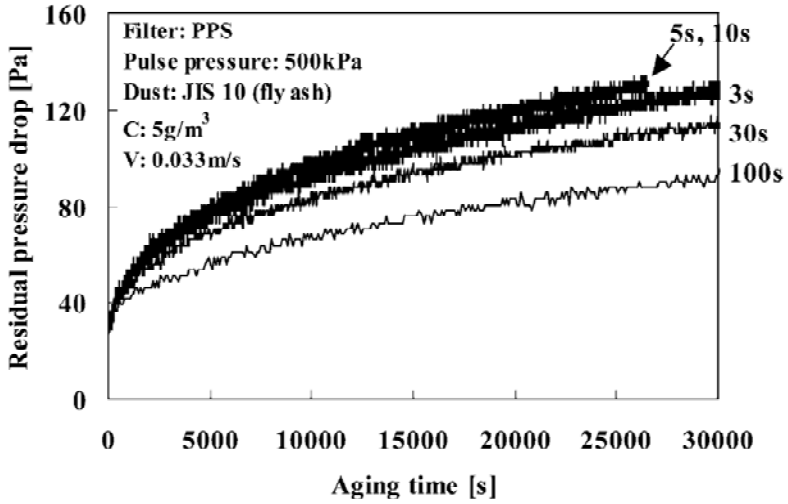


Abb. 22: Abhängigkeit des Restdruckverlusts von der Alterungszeit am JIS Teststand (Scharrparameter Zykluszeit) [14]

Abb. 22 zeigt, dass Alterungsversuche bei 3 s Zykluszeit und bei größeren Zykluszeiten als 10 s geringere Restdruckverlustanstiege über der Gesamttestzeit ergeben. Das in Abb. 22 dargestellte Ergebnis kann erklärt werden durch die größeren anfiltrierten Kuchendicken bei größeren Zykluszeiten (100 s) welche großflächiger und effektiver abgereinigt werden [10]. Bei zu kleinen Zykluszeiten (3 s) zeigt sich eine Abnahme des Restdruckverlusts über der Gesamttestzeit, welche durch die Annäherung der mechanischen Ventilöffnungszeit an die Zykluszeit, erklärt werden kann. Durch die Annäherung der mechanischen Ventilöffnungszeit an die Zykluszeit wird immer mehr staubfreie Abreinigungsdruckluft durch das Filter filtriert und dadurch sinkt der Restdruckverlust. Im Hinblick auf eine möglichst effiziente Alterung

im Bezug auf den Restdruckverlustanstieg in einer möglichst kurzen Testzeit schlagen die Autoren [14] deshalb Zykluszeiten von 5 -10 s vor.
Das Beurteilungskriterium der Alterungseffizienz in den genannten Literaturstellen [14, 22] ist der Restdruckverlust. In der Literaturstelle [21] wird die Übereinstimmung von Restdruckverlust, Zykluszeit und der Emissionscharakteristik einer Alterung am Typ 1 mit einer Alterung an einem Filterschlauch als Kriterium herangezogen. Es ist hervorzuheben, dass in der Literatur kein eindeutiges Kriterium zur Beurteilung der Alterungseffizienz existiert bzw. die Autoren geben keine Begründung für die Wahl eines Kriteriums wie z.B. den Restdruckverlustanstieg an.
Mao et. al untersuchen weiters die Auswirkung der Abreinigung bzw. der Ausführung des Teststandes auf den Restdruckverlustverlauf (Abb. 23).

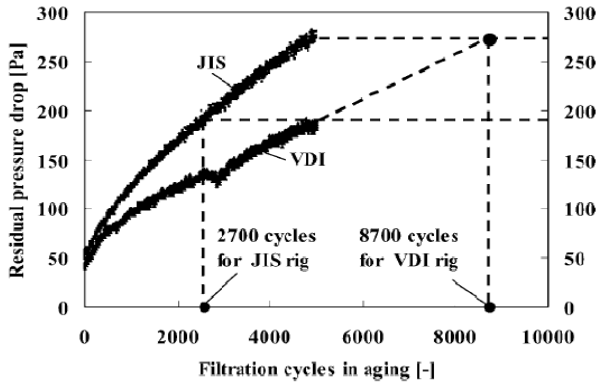


Abb. 23: Vergleich der Restdruckverlustentwicklung im VDI 3926 Typ 1 Teststand und JIS Z 8909-1 Teststand [14]

Abb. 23 zeigt anhand der Restdruckverlustverläufe während der Alterung, dass der verwendete Teststand einen erheblichen Einfluß auf das Alterungsergebnis besitzt. Der VDI 3926 Typ 1 Filtermittelprüfstand zeigt bei gleichen Zyklenzahlen geringere Restdruckverlustanstiege als der Teststand nach JIS Z 8909-1. Der geringere Restdruckverlustanstieg des VDI 3926 Typ 1 Teststand kann durch die unterschiedliche Form und Größe der Filterronde und die unterschiedliche apparative Ausführung der Druckstoßabreinigung erklärt werden kann.

Die im vorangehenden Text genannten Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Betriebsparameter und der verwendete Teststand einen wesentlichen Einfluß auf das Ergebnis der Filterprüfung haben. Hinsichtlich des Beurteilungskriteriums der Alterungseffizienz gibt es ebenfalls unterschiedliche Auffassungen in der Literatur und es wird keine Begründung für die Wahl eines Kriteriums gegeben. Eine einheitlichere Auffassung existiert bezüglich des zeitlichen Umfangs einer Filtermittelalterung, denn in den bisher veröffentlichten Normen bzw. Normvorschlägen ergibt sich als Produkt von Zykluszeit und Zyklenanzahl jeweils ein Zeitraum von ca. 14 h. Dieser Zeitraum wurde mit Hinblick auf eine Übernachtprüfung gewählt.
Für die Wahl eines wissenschaftlich fundierten Beurteilungskriteriums der Alterungseffizienz und die Wahl der zugehörigen Betriebsparameter sind weitere Untersuchungen notwendig.

5 Alterungskammer

5.1 Aufbau der Alterungskammer

Für die detaillierte Untersuchung des Alterungsprozesses wurde eine einfach aufgebaute Alterungskammer entwickelt. Da sich der Typ 2 Filtermittelprüfstand in der Praxis bewährt hat, wurde die Alterungskammer in ähnlicher Weise aufgebaut und mit gleicher Meß- und Steuerungstechnik ausgestattet.
In Abb. 24 und Abb. 25 ist die im Rahmen dieser Arbeit konzipierte und von der Firma Palas gebaute Alterungskammer dargestellt. Die Alterungskammer besteht aus einem senkrechten, runden Strömungskanal von ca. 2 m Länge mit einem horizontal in der Mitte des Kanals eingebauten kreisförmigen (d= 15 cm), flachen Filtermedium.

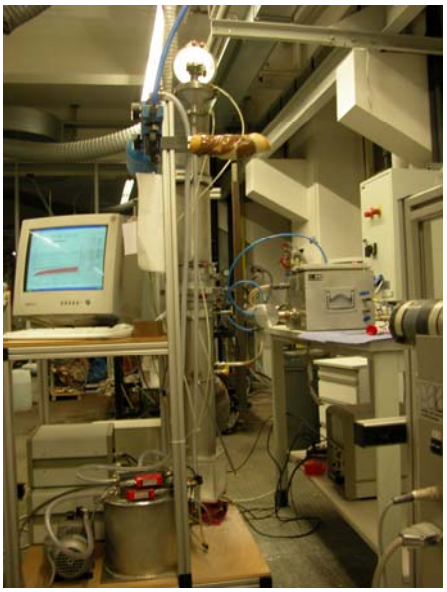


Abb. 24: Alterungskammer

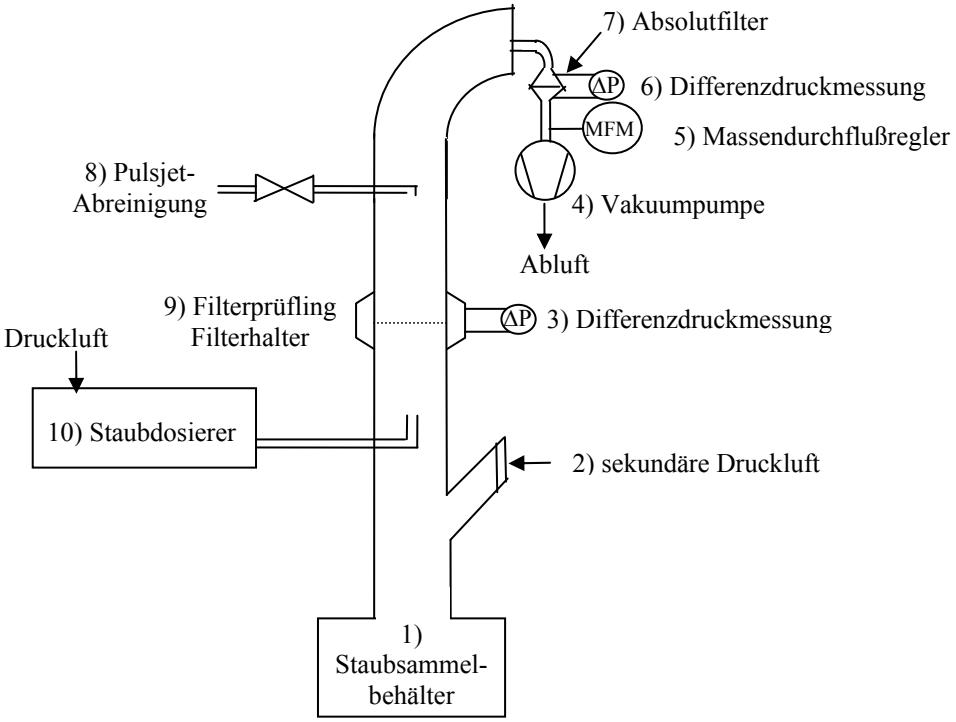


Abb. 25: Schematische Zeichnung der Alterungskammer

5.1.1 Bestandteile der Alterungskammer

Im folgenden Abschnitt werden die in Abb. 25 eingezeichneten Apparaturbestandteile näher erläutert.

1) Staubsammelbehälter

Der Staubsammelbehälter besitzt ein Aufnahmevermögen von ca. 2 l und dient zur Aufnahme des abgereinigten Staubes.

2) Sekundäre Druckluft

Zuführung von sekundärer Druckluft zur Kompensation der Differenz von Abluftvolumenstrom und Dosiervolumenstrom, denn der Volumenstrom der Dosierluft ist immer geringer wie der Volumenstrom der Abluft. Um einen Eintritt sekundärer Umgebungsluft in die Apparatur zu verhindern wird stets mehr sekundäre Druckluft der Spüleinrichtung zugeführt, als zur Kompensation der Differenz von Abluft- und Dosiervolumenstrom nötig ist. Apparativ wird dies wie in Abb. 26 dargestellt ausgeführt.

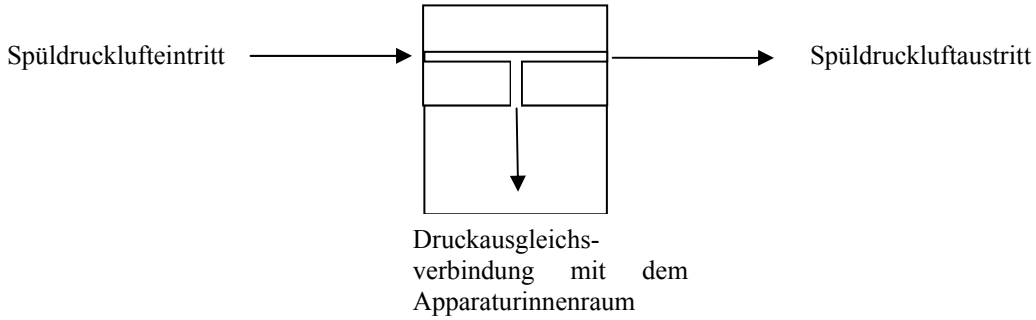


Abb. 26: Apparative Ausführung der Sekundärdruckluftzuführung

3) Prüffilterdruckmessdose

Die am Prüffilter anliegende Druckdifferenz wird kontinuierlich von einer im Steuergerät angeordneten piezoelektrischen Druckmessdose (Fa. Semsym. 051 A, 1h2SC15A, Messbereich 0-15 psi) als Spannungssignal erfaßt und vom Messdatenerfassungssystem aufgezeichnet. Der Prüffilterdruckaufnehmer ist ebenfalls in einer parallelen Schaltung mit einem speziellen Druckaufnehmer für den Unterdruck (Fa. Sensor Technic, PTE2100G1A, D/C 2003, Messbereich: 0 – 100 psig) während der Dichtigkeitsprüfung verbunden.

4) Vakuumpumpe

Es wurde eine luftgekühlte, trockenlaufende Drehschiebervakuumpumpe der Firma Becker mit der Bezeichnung VT 4.8 verwendet (max. Unterdruck: 150 mbar, inlet Capacity: 8,7 m^3/h). Die Pumpenkennline der Becker VT 4.8 Pumpe ist in Abb. 27 dargestellt.

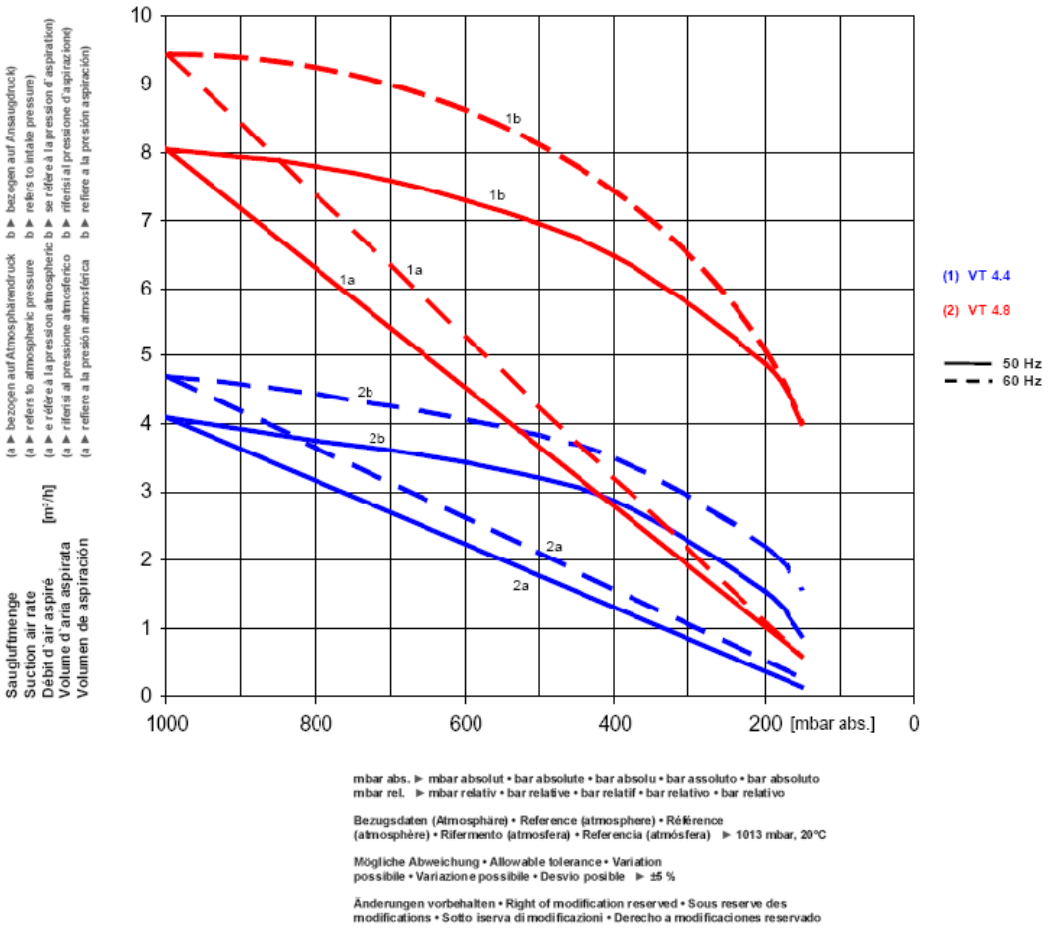


Abb. 27: Pumpenkennline der Becker VT 4.8 und der Becker VT 4.4 Pumpe

5) Massenflußregler

An der Alterungskammer befindet sich ein Massendurchflussmesser und ein Massendurchflussregler (beide Fa. CMOSens Technology, Messbereich 0 - 100 l_n/min). Der Massendurchflussregler detektiert und regelt den Massenstrom der Abluft und der Massendurchlussmesser detektiert den Massenstrom der sekundären Druckluft. Das elektronische Signal vom Massendurchflußregler wird von der Steuereinheit erfaßt und anhand der Signalhöhe wird die Drehzahl der Vakuumpumpe verändert. Es sind damit Filtrationsgeschwindigkeiten von 1 bis 4 m/min einstellbar. Die erfaßten Massenströme werden mithilfe der Temperatur in Volumenströme umgerechnet und kontinuierlich vom Messdatenerfassungssystem aufgezeichnet und am Bildschirm angezeigt. Der sekundäre Druckluftvolumenstrom wurde bei den Versuchen mittels Nadelventil und Druckminderer konstant auf 1 m^3/h geregelt.

6) Absolutfilterdruckmessdose

Die am Absolutfilter anliegende Druckdifferenz wird kontinuierlich von der im Steuergerät angeordneten piezoelektrischen Druckmessdose als Spannungssignal erfasst und vom Messdatenerfassungssystem aufgezeichnet (Fa. Semsym. 051 A, 1h2SC15A, Messbereich 0-15 psi).

6) Absolutfilter

Der durch das Prüffilter penetrierende Staub wird durch ein Glasfasermicrofaserfiltermedium (Whatman GFA) abgeschieden. Durch Differenzwägung des Absolutfilters kann die mittlere Reingaskonzentration mit Hilfe von Formel 1, berechnet werden.

$$c_{rein} = \frac{\Delta m_{Absolutfilter}}{\dot{V} \cdot \Delta t_{Versuch}} \qquad \text{(Formel 1)}$$

Symbolik:
c_{rein} ..... Reingaskonzentration [g/m^3]
$\Delta m_{Absolutfilter}$ .... abgeschiedene Staubmasse am Absolutfilter [g]
$\Delta t_{Versuch}$ ..... Versuchszeit [s]
$\dot{V}$ ..... Abluftvolumenstrom

7) Pulsjet- Abreinigung:

Die Abreinigung erfolgt mittels Druckstoß von der Reingasseite (Pulsjet) und ist apparativ wie in Abb. 28 dargestellt, gestaltet. Die Regulierung der Druckstoßstärke und -dauer erfolgt durch Adjustierung des Tankdrucks und der Ventilöffnungszeit.

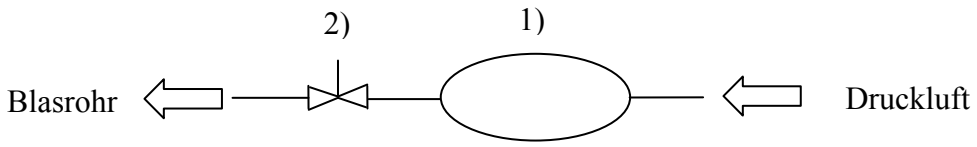


Abb. 28: Schematische Darstellung der apparativen Ausführung der Druckstoßabreinigung. 1) Druckluftank Fassungsvolumen: 5 l , 2) Magnetventil Fa. Festo (CPE14-M1BH-3GLS-1/8)

Der Abstand des Blasrohres vom Prüffilter und die Ausführung der Druckluftabreinigungseinheit ist äquivalent zum VDI 3926 Typ 2, jedoch ist der hinter dem Blasrohr liegende Reingasraum apparativ anders ausgeführt (Siehe Abb. 11 und Abb. 24). Dies hat als Konsequenz, dass das Reingasvolumen der Alterungskammer ca. 1,85-mal so groß ist wie das Reingasvolumen der Typ 2 Apparatur. Es stellte sich heraus, dass ein vergrößerter Reingasraum eine Abschwächung des Abreinigungsimpulses bedingt (siehe Kapitel 9.1.2, Seite 80). Die Tankdrücke werden im Bereich von 4 bis 6 bar und die Ventilöffnungszeiten im Bereich von 50 bis 150 ms gewählt.

8) Staubdosierer: Für die Alterungsversuche wurde der Staubdosierer NDF 100 der Filteq GmbH Karlsruhe verwendet. Eine schematische Darstellung des Dosierers findet sich in Abb. 29.

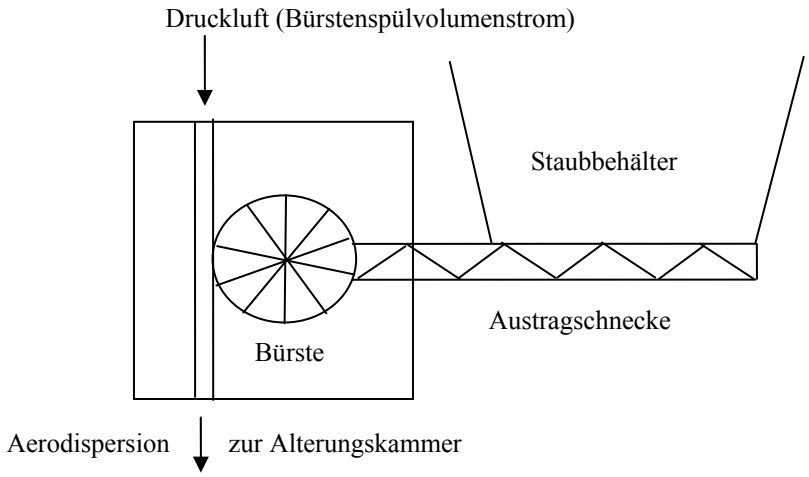


Abb. 29: Schematische Darstellung des Staubdosierers

Der Staubbunker verfügt über ein Fassungsvermögen von ca. 1 kg Pural NF Teststaub. Eine Schacht- bzw. Brückenbildung wird durch die seitlich im Staubbehälter angebrachten Walkmodule verhindert (Abb. 30).

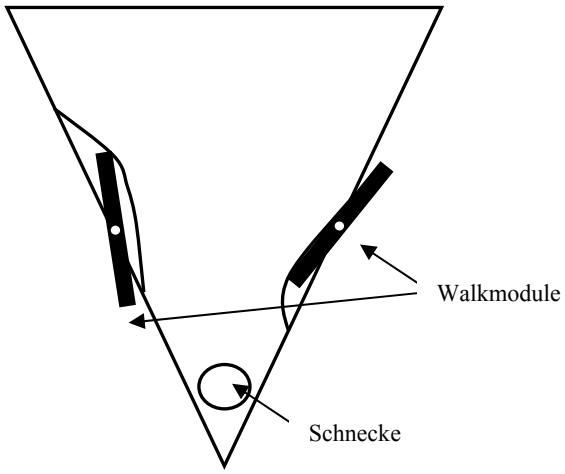


Abb. 30: Schematische Zeichnung des Staubbunkers

9) Filterprüfling, Filterhalter

Eine schematische Zeichnung der Prüffilterhalterung ist in Abb. 31 dargestellt.

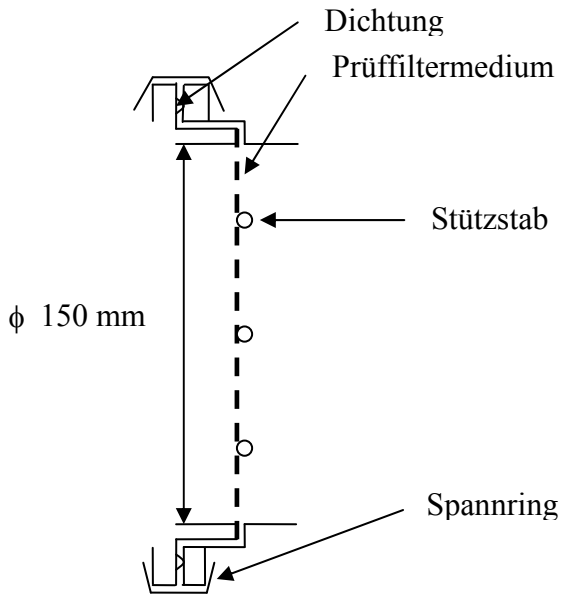


Abb. 31: Darstellung der Prüffilterhalterung der Alterungskammer

Die Dichtheit der Prüffilterhalterung wird mittels Dichtigkeitsprüfung überprüft. Bei Filtermedien mit geringen Dicken (Membranen) ist es unter Umständen notwendig einen Distanzring beizulegen, um zu verhindern, dass das Filtermedium durch die Abreinigung aus der Halterung gezogen wird. Die Fixierung der Prüffilterhalterung erfolgt mittels Spannring, wobei die Spannringschraube mit einem Drehmoment von 4,5 Nm angezogen wird.

5.2 Inbetriebnahme und Qualifizierung der Alterungskammer

Da der Staubdosierer von einem externen Steuergerät gesteuert wird und die Alterungszeit zu Beginn des Tests noch nicht bekannt ist, mußte ein Relais vor den Steuerstromkreis des Staubdosierers geschalten werden. Das Relais wird durch ein 24 V Gleichspannungssignal, welches aus dem Steuergerät der Alterungskammer ausgekoppelt wird, geschaltet. Durch diese Anordnung wird bei Erreichen des max. Druckverlustes sowohl die Alterungskammer als auch der Staubdosierer abgeschaltet.
Um eine korrekte Betriebsweise und Rohgaskonzentration zu bewerkstelligen, muß der Dosiervolumenstrom auf den Absaugvolumenstrom bei der jeweiligen Filterflächenbelastung abgestimmt werden bzw. muß die Rohgaskonzentration für die einzelnen Filterflächenbelastungen bestimmt werden. Diese Arbeitsschritte werden in den Kapiteln 5.2.1 - 5.2.2 näher erläutert.

5.2.1 Überprüfen des Dosiervolumenstroms

Der mittels Vordruck an der Dosiereinheit einstellbare Dosiervolumenstrom wurde mittels Rotameter überprüft. Dafür wurde das Rotameter senkrecht befestigt und der Rotametereingang mittels Silikonschlauch mit dem Dosierkopfausgang verbunden. Nun wurde die Luftzufuhr am Steuergerät aktiviert und der resultierende Volumenstrom bei verschiedenen Vordrücken notiert. Es konnte die in Abb. 32 dargestellte Vordruck Volumenstromkorrelationen ermittelt werden.

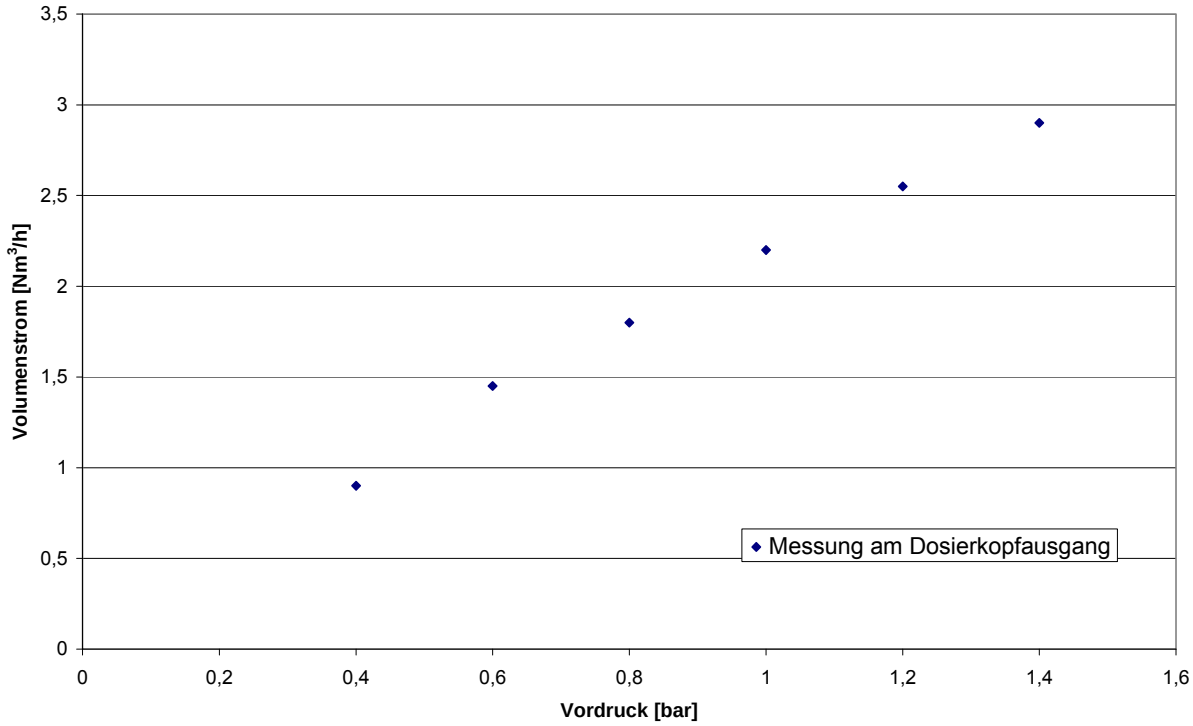


Abb. 32: Vordruck-Volumenstromkorrelationen des verwendeten Staubdosierers der Firma Filteq

In Abb. 32 kann erkannt werden, dass sich der Volumenstrom am Dosierkopfausgang nahezu linear mit größerem Vordruck erhöht. Für die Versuchsdurchführung ist die Kenntnis des Volumenstroms am Dosierkopfausgang von Bedeutung, da dieser dem in die Alterungskammer zugeführten Dosiervolumenstrom entspricht.

5.2.2 Rohgasstaubkonzentrationsbestimmung

Für unterschiedliche Filtrationsgeschwindigkeiten (2 m/min; 2,3 m/min; 2,5 m/min; 2,8 m/min; 3 m/min) wurde die benötigte Drehzahl der Förderschnecke für die gewünschte Rohgaskonzentration durch Differenzwägung einer Prüffilterronde ermittelt. Die Drehzahl der Förderschnecke kann durch Veränderung der Steuerspannung mittels Potentiometerschraube variiert werden.

Durchführung der Ermittlung der erforderlichen Steuerspannung für die Förderschnecke:

- Eine unbestaubte Prüffiltermittelronde wird abgewogen und das Gewicht wird notiert.
- Die Prüffiltermittelronde wurde mit der Reingasseite in Richtung Rohgas in den Prüffilterhalter eingespannt, um das Haftvermögen des Staubkuchens zu erhöhen.
- Die Dichtigkeitsprüfung wird durchgeführt, wobei der Druckabfall von 100 mbar Unterdruck während 30s kleiner als 30 mbar sein muß.
- Der gereinigte Rohgasteil der Alterungskammer wird angeschlossen.
- Der Staubbunker des Staubdosierers wird mit Teststaub gefüllt und der Verbindungsschlauch zwischen Staubdosierer und Alterungskammer in die Staubsaugerabsaugung gesteckt. Denn vor Beginn der Messung wird der Staub einige Minuten in die Staubsaugerabsaugung dispergiert um sicherzustellen, dass eine konstante Reingaskonzentration vorliegt.
- Eine druckgesteuerte Filtermittelprüfung mit dem gewünschten Absaugvolumenstrom wird gestartet, wobei der Abreinigungsdruck > 10 mbar gewählt wird, damit der

anfiltrierte Staubkuchen nicht abgereinigt wird um sicherzustellen, dass der Staubkuchen nicht vor Ende der Rohgaskonzentrationsbestimmung abgereinigt wird.

- Die Staubdosierung wird gestartet, wobei der Vordruck so gewählt wird, dass der resultierende Dosiervolumenstrom 0,3 - 0,1 m^3/h kleiner ist als der eingestellte Absaugvolumenstrom (Einstellungen siehe Tab. 7- Tab. 12). Somit wird sichergestellt, dass der gesamte dispergierte Teststaub durch den Prüffilter filtriert wird. Die Volumenstromdifferenz zwischen Absaugvolumenstrom und Dosiervolumenstrom wird durch die sekundäre Druckluft (siehe Abb. 26) kompensiert.
- Nach einer Wartezeit von 5 Minuten ist die Staubdosierung konstant und der Verbindungsschlauch wird an die Alterungskammer angeschlossen.
- Die Zeit wird von diesem Zeitpunkt an gestoppt.
- Bei Erreichen eines Druckverlustes von 3-5 mbar wird der Test abgebrochen, die Staubdosierung abgeschaltet und die Zeitnehmung gestoppt.
- Anhand der Messdaten des Abluftvolumenstroms wird der mittlere Abluftvolumenstrom während der Messung berechnet und durch Multiplikation mit der Testzeit kann das abgesaugte Volumen berechnet werden.
- Der Prüffilter wird aus dem Prüffilterhalter vorsichtig ausgebaut und abgewogen.
- Die Gewichtsdifferenz des Prüffilters wird auf das Abluftvolumen bezogen.
- Je Filtrationsgeschwindigkeit werden mind. 3 Rohgaskonzentrationsbestimmungen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Rohgasbestimmungsversuche für fünf Filterflächenbelastungen sind in Tab. 7- Tab. 12 angeführt.

Bestimmungs-nummer	Filter vor [g]	Filter nach [g]	Steuerspannung der Förderschnecke [V]	Vordruck [bar]	Versuchsnummer	Druckdifferenz Dichtigkeitsprüfung [mbar]	Zeit [min:s]	Rohgaskonzentration [g/m³]
1	12,32	14,8	0,38	0,8	20081009_01	26,26	12:21	5,78
2	12,56	14,94	0,38	0,8	20081009_0,3	26	12:44	5,38
3	12,59	15,37	0,38	0,8	20081009_05	25,64	14:30	5,52
4	12,65	15,53	0,38	0,8	20081009_07	26,26	15:28	5,36
							Mittelwert	5,42
							Stabw	0,09

Tab. 7: Ergebnisse für 120 $m^3/(m^2h)$

Bestimmungs-nummer	Filter vor [g]	Filter nach [g]	Steuerspannung der Förderschnecke [V]	Vordruck [bar]	Versuchsnummer	Druckdifferenz Dichtigkeitsprüfung [mbar]	Zeit [min:s]	Rohgaskonzentration [g/m³]
1	12,77	15	0,43	0,8	20081016_00	24,4	10:00	5,57
2	12,42	15,24	0,43	0,8	20081022_01	25,02	12:00	5,82
3	12,52	15,29	0,43	0,8	20081022_03	26,26	12:00	5,73
							Mittelwert	5,70
							Stabw	0,13

Tab. 8: Ergebnisse für 138 $m^3/(m^2h)$

Bestimmungs-nummer	Filter vor [g]	Filter nach [g]	Steuerspannung der Förderschnecke [V]	Vordruck [bar]	Versuchsnummer	Druckdifferenz Dichtigkeitsprüfung [mbar]	Zeit [min:s]	Rohgaskonzentration [g/m³]
1	12,54	14,16	0,46	1	20081013_00	26,26	07:00	5,25
2	12,44	14,07	0,46	1	20081013_01	26,68	07:00	5,29
3	12,45	14,3	0,46	1	20081013_02	27,3	08:00	5,29
							Mittelwert	5,28
							Stabw	0,02

Tab. 9: Ergebnisse für 150 $m^3/(m^2h)$

Bestimmungs-nummer	Filter vor [g]	Filter nach [g]	Steuerspannung der Förderschnecke [V]	Vordruck [bar]	Versuchsnummer	Druckdifferenz Dichtigkeitsprüfung [mbar]	Zeit [min:s]	Rohgaskonzentration [g/m^3]
1	12,39	14,84	0,5	1,2	20081022_04	26,26	09:00	5,55
2	12,52	14,91	0,5	1,2	20081022_05	25,23	09:00	5,42
3	12,55	14,91	0,5	1,2	20081022_06	25,23	09:00	5,35
							Mittelwert	5,44
							Stabw	0,10

Tab. 10: Ergebnisse für 168 m^3/(m^{2}h)

Bestimmungs-nummer	Filter vor [g]	Filter nach [g]	Steuerspannung der Förderschnecke [V]	Vordruck [bar]	Versuchsnummer	Druckdifferenz Dichtigkeitsprüfung [mbar]	Zeit [min:s]	Rohgaskonzentration [g/m^3]
1	12,38	15	0,53	1,2	20081022_07	26,26	09:00	5,55
2	12,27	14,93	0,53	1,2	20081022_09	25,85	09:00	5,64
3	12,42	14,3	0,53	1,2	20081022_10	25,85	06:26	5,56
							Mittelwert	5,58
							Stabw	0,05

Tab. 11: Ergebnisse für 180 m^3/(m^{2}h)

Die Ergebnisse der Rohgaskonzentrationsbestimmungsversuche wurden in Tab. 12 zusammengefaßt.

Filterflächenbelastung [m^3/(m^{2}h)]	Schneckenspannung [V]	Dosierervordruck [bar]	Rohgaskonz. Mittelwert [g/m^3]	Rohgaskonz. Standardabweichung [g/m^3]
120	0,38	0,8	5,42	0,09
138	0,43	0,8	5,70	0,13
150	0,46	1	5,28	0,02
168	0,5	1,2	5,44	0,10
180	0,53	1,2	5,58	0,05

Tab. 12: Ergebnisse der Rohgaskonzentrationsbestimmungsversuche

Im Mittel betrug die Rohgaskonzentration bei den Alterungsversuchen 5,5 g/m^3. Die für die Rohgaskonzentration 5,5 g/m^3 benötigte Schneckenspannung wurde in Abb. 33 gegen die Filterflächenbelastung aufgetragen und regressiert.

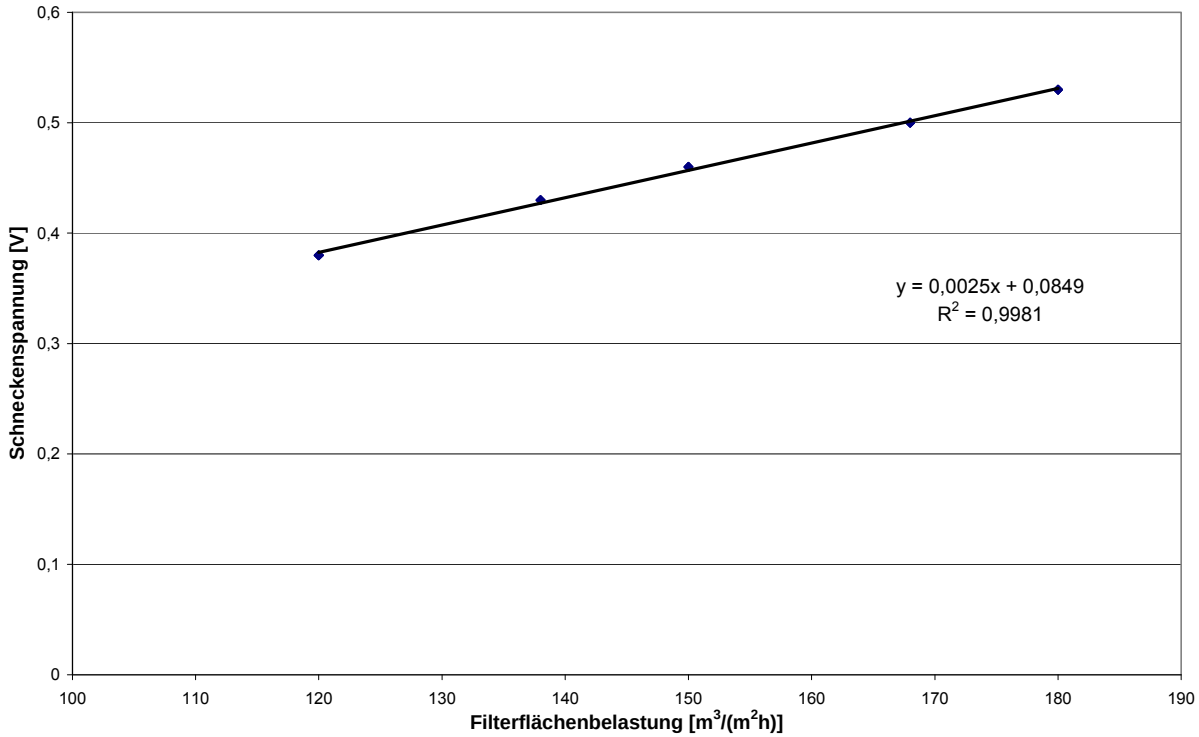


Abb. 33: Steuerspannung der Förderschnecke als Funktion der Filterflächenbelastung (regressiert)

Für die Geschwindigkeitsvariationsversuche wurden ebenfalls die zugehörigen Schneckenspannungen zu den Filterflächenbelastungen 160 $m^3/(m^2h)$ und 172 $m^3/(m^2h)$ benötigt. Dafür wurde in die Geradengleichung in Abb. 33 eingesetzt und die zugehörige Schneckenspannung berechnet (Tab. 13).

Filterflächenbelastung [$m^3/(m^2h)$]	Schneckenspannung [V]
172	0,51
160	0,48

Tab. 13: Interpolierte Schneckenspannungen

Die ermittelten Einstellungen wurden in bestimmten Zeitabständen überprüft und gegebenenfalls wurden kleinere Adjustierungen vorgenommen. Bei manchen Testserien war eine Rohgaskonzentration von 5 g/m^3 notwendig. Für die Bestimmung der notwendigen Schneckenspannung wurde wie im Kapitel 5.2.2 beschrieben vorgegangen.

5.2.3 Überprüfung der Druckmessung während der Dichtigkeitsprüfung

Zur Überprüfung der Druckmessung mittels Membrandruckmessdose während der Dichtigkeitsprüfung wurde ein T-Stück an den Verbindungsschlauch der Prüffilterdruckmessdose angeschlossen. Ein Ende des T-Stücks wurde mit einem wassergefüllten U-Rohrmanometer verbunden. Das andere Ende wurde mit einer Schlauchklemme versehen. Es wurde nun das Unterprogramm Dichtigkeitsprüfung gestartet und am abgeklemmten Ende des T-Stücks durch Ansaugen ein Unterdruck erzeugt. Dann wurde das Ansaugschlauchstück abgeklemmt und die angezeigte Druckdifferenz mit der Druckdifferenz am U-Rohrmanometer verglichen (Tab. 14).

Druckdifferenz laut Anzeige der Messwerterfassung [mbar]	Druckdifferenz mittels Wassersäule [mbar]
61,01	63,4

Tab. 14: Ergebnisse der Druckmessungsüberprüfung bei der Dichtigkeitsprüfung

Wie aus Tab. 14 ersichtlich ist, stimmen die beiden detektierten Druckverluste in ausreichendem Maß überein.

5.2.4 Überprüfung der Prüffilterdruckverlustmessung

Zur Überprüfung der angezeigten Prüffilterdruckverluste wurde im reingasseitigen Verbindungsschlauch zur Druckmessdose ein T-Stück eingebaut. Ein Ende des T-Stücks wurde mit einem wassergefüllten U-Rohrmanometer verbunden. Das zweite Ende war mit einer Schlauchklemme versehen.
Nun wurden verschiedene Differenzdrücke angelegt und die Druckdifferenzanzeige im Menü „Sensoren Aktoren“ mit der Wassersäule verglichen (Tab. 15).

Druckdifferenz Prüffilter laut Anzeige der Meßwerterfassung [mbar]	Druckdifferenz mittels Wassersäule [mbar]
14,66	14,6
37,8	37,7
22,37	22,2
4,2	4,2

Tab. 15: Resultate der Prüffilterdruckverlustüberprüfung

Es konnte eine gute Übereinstimmung des Prüffilterdruckdifferenzwerts mit dem U-Rohrmanometerwert nachgewiesen werden.

6 Standarddurchführungsprozedur bei den Alterungsversuchen

- Ausbau des Prüffilters und Reinigen der Staubzuführungssonde
- Einbau eines neuen Absolutfiltermediums, wobei der Rand der Absolutfilterhalterung mit einer dünnen Schlifffettschicht versehen wird, um bessere Resultate bei der Dichtigkeitsprüfung zu erreichen.
- Das Prüffiltermedium wird auf die Stützstäbe der Prüffilterhalterung aufgelegt und der Dichtungsring eingefettet. Danach wird der zweite Teil der Prüffilterhalterung aufgesetzt. Um eine reproduzierbar plane Auflage des Prüffilters zu erreichen wird eine ca. 1 cm dicke Plexiglasscheibe mit einem Durchmesser von 14,9 cm auf die Rohgasseite des Prüffilters aufgelegt. Auf die Plexiglasscheibe wird mittig ein zylindrisches 1 kg Gewicht aufgelegt und dann wird der zweite Teil der Prüffilterhalterung leicht nach oben und nach unten bewegt. Danach wird der Spannring angespannt, wobei mit einem Drehmomentschlüssel ein Drehmoment von 4,5 Nm eingestellt wird.
- Der somit fertig zusammengesetzte Prüffilterhalter wird in die Alterungskammer eingebaut. An der Rohgasseite wird der Dichtdeckel aufgesetzt. Die Dichtigkeitsprüfung wird gestartet. Es wird ein Unterdruck von 100 mbar angelegt und während 30 s darf der Druckabfall nicht größer als 30 mbar sein damit die Dichtigkeitsprüfung erfolgreich verläuft.
- Nach erfolgreicher Dichtigkeitsprüfung wird der Dichtdeckel abgenommen und der Rohgasteil der Alterungskammer befestigt.
- Der Dosierkopfdeckel des Staubdosierers wird abgenommen und Staubanbackungen werden mit einem Plexiglasschaber entfernt. Die Bürste des Staubdosierers wird mit einer Staubsaugerdüse abgesaugt um eingeklemmte große Partikel zu entfernen. Danach wird der Dosierkopfdeckel wieder befestigt und der Verbindungsschlauch mit der Alterungskammer verbunden.
- Der Staubbehälter des Staubdosierers wird mit im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknetem und im Exsikkator abgekühltem Pural NF Teststaub aufgefüllt.
- In der Registerkarte „Datei“ wird „neue Messung“ angewählt, die gewünschten Filtrationsparameter werden eingegeben. Wobei der Tankdruck mit einem manuell über ein Manometer eingestellt werden muß. Die Temperatur, der Luftdruck und die relative Luftfeuchte werden von Meßgeräten abgelesen und in die Registerkarte „Prüfparameter“ eingetragen (siehe Abb. 34).

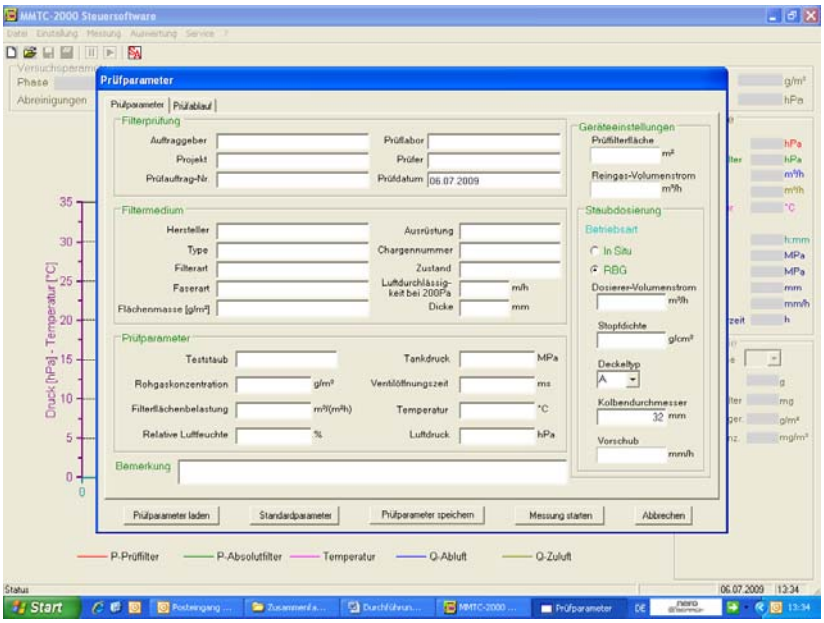


Abb. 34: Eingabemaske für die Prüfparameter

Um den Restdruckverlustverlauf, den Zykluszeitverlauf und die mittlere Reingasstaubkonzentration auszuwerten, müssen in der Registerkarte „Prüfablauf“ die Unterpunkte „Datensatz auswerten“ und „Gravimetrie“ ausgewählt sein (Abb. 35). Anhand der Prüffilterdruckverlustmeßwerte, welche alle 3 s abgespeichert werden, kann nachträglich mithilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms eine Ermittlung des zeitlichen Restdruckverlustverlaufs erfolgen.

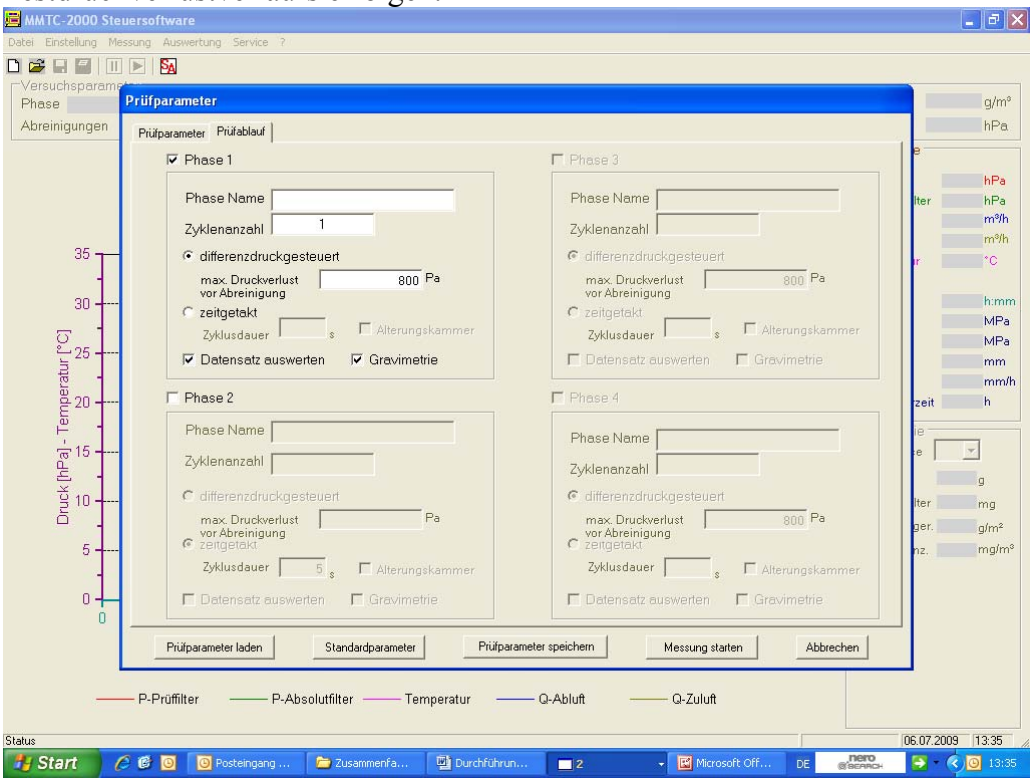


Abb. 35: Registerkarte „Prüfablauf”

- Der Filtertest wird gestartet indem „Messung starten“ angeklickt wird (Abb. 35). Das Programm erfragt danach die Leergewichte der Prüffilterronde und des Absolutfilters. Die Sekundärluftzufuhr und die Staubdosierung werden manuell gestartet, indem am Steuerkasten auf die Tasten „Luft“ und „Band“ gedrückt wird. Danach wird auf der

Dosierersteuerung auf die Tasten „Luft“, „Bürste“ und „Wabbel“ gedrückt und der gewünschte Wert für den Vordruck und die Schneckenspannung eingestellt. Für den Wabbelmotor bewährte sich die Einstellung „Stufe 6“, bei welcher der verwendete Teststaub Pural NF ohne Gefahr einer Brücken- bzw. Schachtbildung im Staubbunker problemlos dispergiert werden konnte.

- Der manuell eingestellte Tankdruck wird auf der Sensoren Aktoren Leiste kontrolliert.
- Sobald nun die Steuerungseinheit der Alterungskammer kein Spannungssignal mehr ausgibt, wird auch die Stromzufuhr zur Staubdosiersteuereinheit unterbrochen.

7 VDI 3926 Typ 2 Filtermittelprüfstand

7.1 Generelle Funktionsweise des Filtermittelprüfstands

Mit Hilfe eines Staubdosierers wird Prüfstaub in genau bekannten Mengen in der zugeführten Luft dispergiert, dieser Rohgasstrom wird durch den Rohgaskanal zur Filtermittelprobe geführt. Der Rohgasstrom wird durch die Prüffilterronde filtriert und von der Vakuumpumpe angesaugt (siehe Abb. 36). Hierdurch kommt es zum Aufbau eines Staubkuchens. Bei Erreichen des Abreinigungsdruckverlustes an der Filtermittelprobe wird der Filterkuchen mittels eines definierten Druckstoßes von der Reingasseite her entfernt. Der Reingasvolumenstrom wird durch einen Absolutfilter gesaugt um nicht abgeschiedene Partikel abzutrennen.

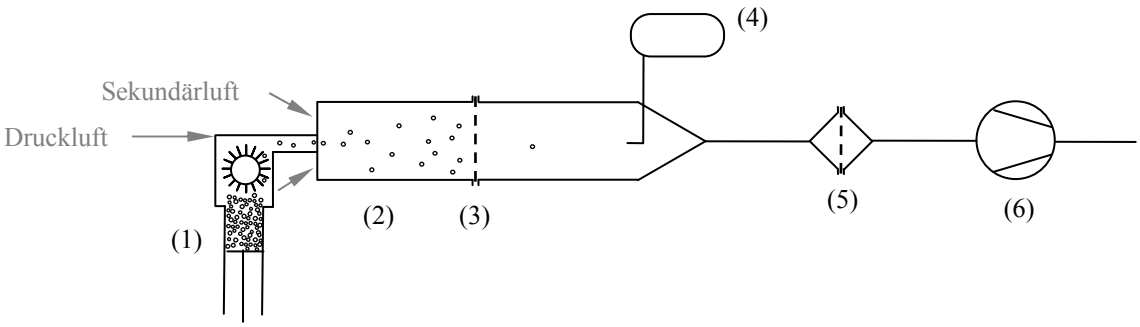


Abb. 36: Schematische Darstellung des Filtermittelprüfstand VDI 3926 Typ 2: (1) kontinuierlich arbeitendes Staubdosiersystem, (2) zylindrischer, horizontal angeordneter Prüfkanal, (3) Filterhalter mit Filtermittel, (4) Abreinigungssystem bestehend aus Drucktank (Windkessel), Membranventil und Blasrohr, (5) ein in der Reingasabsaugung angeordnetes Absolutfilter zur gravimetrischen Bestimmung der mittleren Reingasstaubkonzentration, (6) Vakuumpumpe

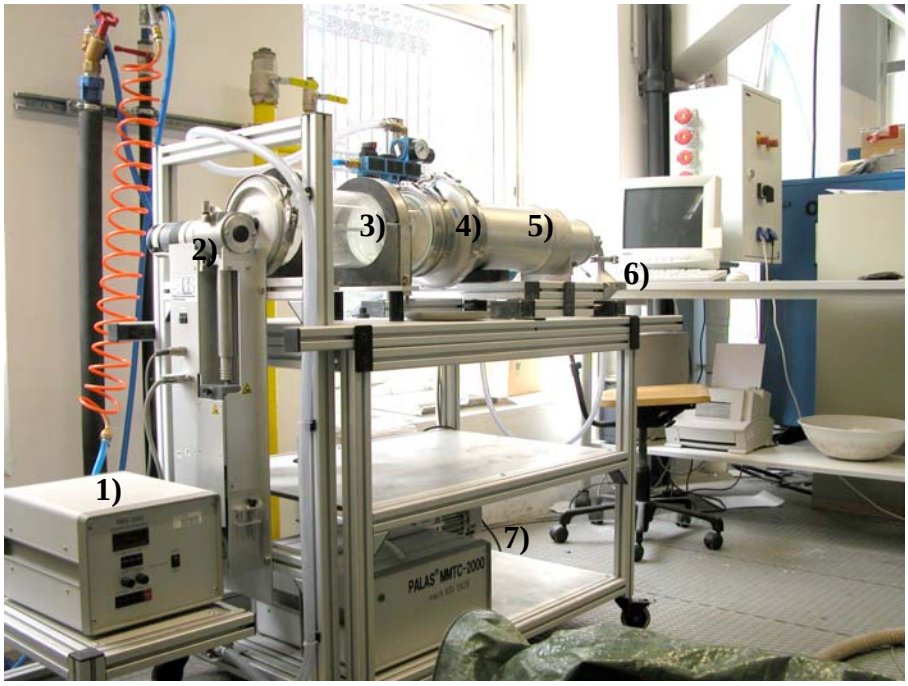


Abb. 37: Foto des benutzen Filtermittelprüfstand Typ 2, 1) Steuereinheit des Bürstendosierers, 2) Bürstendosierer, 3) Rohgaskanal, 4) Filterhalter mit Filtermittel, 5) Reingaskanal, 6) Absolutfilter, 7) Steuereinheit für den Filtermittelprüfstand

7.1.1 Staubdosierungseinrichtung

Zur Staubdosierung wurde ein Bürstendosierer verwendet, die Dispergierluft des Dosierers wurde aus dem Druckluftnetz bereitgestellt.

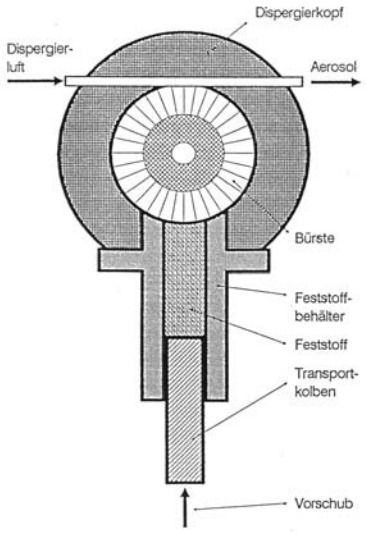


Abb. 38: Funktionsprinzip des Bürstendosierers [23]

Wie in Abb. 38 schematisch dargestellt, ist in einem Edelstahlblock (Dispergierkopf) eine Bürste drehbar gelagert. Unterhalb der Bürste befindet sich der zylindrische Teststaubbehälter, welcher mit dem zu dispergierenden Feststoff gefüllt ist. Mit einem Transportkolben, dessen Vorschubgeschwindigkeit je nach Stopfdichte des zu dispergierenden Feststoffs geregelt wird, wird der Feststoff aus dem Behälter gegen die

rotierende Bürste geschoben und von dieser in den oberen Teil des Dispergierkopfes befördert. Dort wird der Feststoff von einem Luftstrahl mit hoher Geschwindigkeit aus der Bürste geblasen.

7.1.2 Gasvolumenstrom

Der Absaugvolumenstrom betrug 3,19 m^3/h, was bei einer durchströmbaren Filterfläche von 177 cm^2einer Filterflächenbelastung von 3 $m^3/(m^2 min)$ entspricht. Er setzt sich aus dem Dispergiervolumenstrom des Dosierers (2 m^3/h) und dem Sekundärluftvolumenstrom zusammen (Abb. 36). Die Regelung des Volumenstroms erfolgt mit Hilfe eines Massendurchflußreglers und eines Frequenzumrichters für die Pumpendrehzahl

7.1.3 Prüffiltereinspannung

Die zu untersuchende kreisrunde Filtermittelprobe, mit einem Durchmesser von 165 mm und einer durchströmten Filterfläche von 177 cm^2, wurde eben und faltenfrei in den Filterhalter eingespannt. Auf der Reingasseite befinden sich Stützstäbe, an die das Filtermedium während der Filtration angepreßt wird. Mit Hilfe der Stützstäbe soll der in den Filterhäusern verwendete Stützkorb für Schlauchfilter nachgebildet werden.

7.1.4 Abreinigungssystem

Die Abreinigung erfolgte mittels partikelfreiem Druckluftstoß von der Reingasseite. Das Abreinigungssystem besteht aus einem Drucklufttank, der vom Druckluftnetz gespeist wird und einen Tankdruck von 0,4 MPa aufweist. Der Tankdruck wird mittels Reduzierventil eingestellt. Die Öffnungszeit des Membranventils beim Abreinigungsdruckstoß beträgt 150 ms.

7.2 Durchführung der VDI 3926 Filtermittelprüfungen

Für die Durchführung der Filtrationsversuche wurden folgende Geräte verwendet:

- Filtermittelprüfstand nach VDI 3926 Typ 2 (MMTC – Filtermittelprüfstand Palas GmbH, Karlsruhe)
- RBG 2000 Feststoffpartikel-Dispergierer (Palas GmbH, Karlsruhe)
- Waagen zur Bestimmung der Reststaubmasse am Filtermittelprüfling und der Staubmasse am Absolutfiltermedium (Satorius Laborwaage GP 4102, Satorius Analysenwaage BP 2110)

7.2.1 Teststaub

Für die Durchführung der Filtrationsversuche wurde mit Pural NF ein sehr feinkörniger Teststaub gewählt (Tab. 16).

Bezeichnung	PURAL NF
Chemische Zusammensetzung	Al_2O_3
Hersteller	Condea Chemie GmbH
Agglomerationstendenz	gering
Teilchengrößenverteilung	$d_{10,3}$=1,2 µm $d_{50,3}$=4,5 µm $d_{90,3}$=21,0 µm

Tab. 16: Verwendeter Teststaub

7.2.2 Versuchsbedingungen

Für die Filtermittelprüfungen wurden die in Tab. 17 genannten Versuchsparameter verwendet.

	VDI 3926 Vorgabewert	Verwendeter Wert für Filterprüfung
Rohgasvolumenstrom [m^3/h]	3,19	3,19
Filteranströmgeschwindigkeit [m/h]	180	180
Rohgasstaubkonzentration [g/m^3]	5	5
Druckverlust vor der Abreinigung [Pa]	1200	1000
Tankdruck [MPa]	0,25	0,4
Ventilöffnungszeit [ms]	50	150
Teststaub	TiO_2	Al_2O_3 (PURAL NF)
Anzahl der Filtrationszyklen	10	100

Tab. 17: Standardversuchsbedingungen für die Filtermittelprüfung nach VDI 3926 Typ 2 und tatsächlich gewählte Versuchsbedingungen bei den Filtermittelprüfungen.

Statt dem in der VDI-Richtlinie vorgeschlagenen feinkörnigen, nichtagglomerierenden, schwerdosierbaren TiO_2-Teststaub wurde Pural NF-Teststaub verwendet. Aufgrund der Partikelgrößenverteilung des verwendeten Teststaubes und eines daraus resultierenden leichter abreinigbaren Filterkuchens wurde der Druckverlust vor der Abreinigung niedriger gewählt als in der Richtlinie vorgesehen. Um zusätzlich eine gute Abreinigung zu gewährleisten, wurden der Tankdruck höher und die Ventilöffnungszeit länger gewählt als in der Richtlinie vorgesehen. Es wurden die Filtrationsparameter nach 100 Filtrationszyklen, statt der in den Standardbedingungen vorgeschlagenen 10 Zyklen verglichen, um praxisnähere Ergebnisse zu erhalten.

7.2.3 Durchführungsprozedur der Filtermittelprüfung am VDI 3926 Typ 2

- Es wird kontrolliert ob der Rohgaskanal von Staubablagerungen gereinigt ist. Falls sich Staub vom Vorversuch im Rohgaskanal befindet muß dieser zuerst entfernt werden. Dann wird die unbestaubte Filtermitteltestronde abgewogen und das Gewicht notiert. Die Filtermittelronde wird in den Filtermittelhalter so eingelegt, dass die unbehandelte Seite (Reingasseite) die Stützstäbe berührt. Die Dichtungen am Reingaskanal werden mit Schlifffett bestrichen. Der Filtermittelhalter mit Prüfling wird aufgesetzt und mit einem Spannring fixiert.
- Zur Reinigung des Reingaskanals wird der Absolutfilter abgekoppelt (Abb. 36). Das Meßdatenerfassungsprogramm wird gestartet und der Menüpunkt „Service“

angewählt. Im Menüpunkt „Service“ wird das Untermenü „Sensoren/Aktoren“ angewählt und die Meßdaten auf den Nullpunkt korrigiert. Der Staubsaugerschlauch wird nun gegen den Absolutfiltereingangsbereich gehalten, um eventuell dispergierten Staub im Reingaskanal zu entfernen. Während dem Absaugen wird zweimal mit „F1“ die Pulsjetabreinigung betätigt, um eventuell abgelagerten Staub zu dispergieren.

- Ein neues Absolutfiltermedium (Watman GFA Glasfaserfiltermedium, Ø 110 mm) wird auf der Analysenwaage abgewogen. Er wird in die Mitte der Absolutfilterstützfläche mit der glatten Seite nach oben gelegt und die Vakuumpumpe wird gestartet. Aufgrund der sich ausbildenden Druckdifferenz wird das Absolutfiltermedium an die Stützfläche angepreßt, und in Position gehalten. Es wird die mittige Position des Absolutfilters überprüft, dann wird der Absolutfilter wieder auf den Reingaskanal aufgesetzt und mit einem Spannring fixiert. Dabei wird die Vakuumpumpe laufen gelassen um eine Positionsverschiebung des Absolutfiltermediums zu verhindern.
- Die Vakuumpumpe wird abgeschaltet und ein Deckel am Rohgasende der Prüffiltereinspannung mit einem Spannring befestigt und das Untermenü „Dichtigkeitsprüfung“ angewählt. Die Frage „Dichtigkeitsprüfung starten“ wurde mit „J“ bestätigt. Es wird ein Unterdruck von 100 mbar angelegt, falls der Druckabfall während 30 s kleiner als 30 mbar ist, kann die Apparatur als ausreichend dicht angesehen werden. Bei einem größeren Druckabfall werden die Festigkeit der Spannringe und der Sitz des Absolutfilters kontrolliert, um Lekagen zu verhindern.
- Zur Reinigung des Dispergierkopfes wird der Deckel der Dispergierkammer des Staubdosierers abgeschraubt und gegebenenfalls werden Staubanpackungen abgeschabt. Die Staubaustrittsdüse wird mit einer Bürste gereinigt und der Staub mit einem Staubsauger entfernt.
- Der Teststaubbehälter mit Transportkolben wird durch Herausziehen der Arretierung heruntergenommen. Der Teststaubbehälter wird zuerst mit einer Bürste, dann mit Papier gereinigt. Der Transportkolben wird mit Hilfe des Staubsaugers von Staub befreit. Es wird das Leergewicht des Teststaubbehälters mit Transportkolben kontrolliert und der Transportkolben wird ca. 1 cm weit in den Teststaubbehälter eingeführt.
- Dann wird mit dem Einfüllen und Verdichten des Staubes im Teststaubbehälter begonnen. Der Vorgang wird Stopfen genannt. Von dem bei 150°C bis zur Gewichtskonstanz getrockneten und im Exsikkator abgekühlten Staub werden je 2 gehäufte Eßlöffel in den Teststaubbehälter gegeben. Dann wird ein Hilfsstempel langsam in den Transportkolben abgesenkt und nach dem Auftreffen auf die Stauboberfläche einige Sekunden ruhen gelassen (auf den Staub soll nur die Gewichtskraft des Hilfsstempels wirken). Dann wird der Hilfsstempel leicht angehoben und gleichzeitig um ca. 180° gedreht, damit seitlich anpackender Staub nach unten fließen kann. Der Hilfsstempel wird ein weiteres Mal langsam nach unten bewegt und bei Berührung der Stauboberfläche wieder einige Sekunden ruhen gelassen. Das Heben und Senken des Hilfsstempels wird noch einmal wiederholt, dann wird der Hilfsstempel herausgezogen und der Stopfvorgang mit zwei weiteren gehäuften Eßlöffeln wiederholt. Diese Arbeitsschritte werden so oft wiederholt bis das Feststoffniveau die obere Kante des Teststaubbehälters erreicht. Der Teststaubbehälter besitzt eine halbkreisförmige Ausnehmung für die Rotation der Bürste. Es wird mit dem Löffel ein ebenes Staubniveau in der Höhe der oberen Kante erzeugt (Abb. 39). Der gestopfte Teststaubbehälter mit Transportkolben wird wieder mit der Waage abgewogen und die Stopfhöhe wird mit Hilfe einer Schublehre bestimmt. Bei der Bestimmung der Stopfhöhe wird mit der Schublehre die Länge des aus dem Teststaubbehälter herausstehenden Transportkolbens abgemessen. Diese Länge

entspricht der Stopfhöhe, wenn das Stopfniveau auf die obere Kante eingestellt wird (Abb. 39).

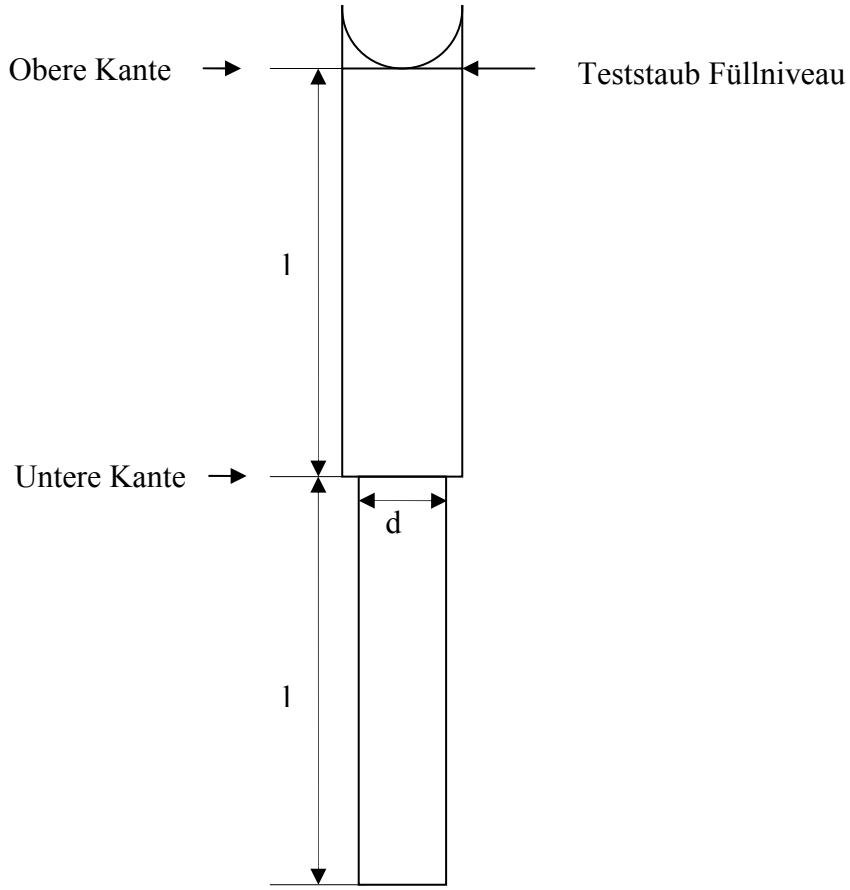


Abb. 39: Schematische Darstellung des Transportkolbens und des Teststaubbehälters mit den zur Stopfdichteberechnung benötigten Abmessungen, l) Stopfhöhe, d) Innendurchmesser des Teststaubbehälters

Die Stopfdichte errechnet sich nach folgender Formel:

$$\rho_S = \frac{(SG - LG) \cdot 4}{d^2 \cdot \pi \cdot l} \qquad \text{(Formel 2)}$$

Symbolik:
ρ_S ..... Stopfdichte [g/cm^3]
SG ..... Teststaubmasse [g]
LG ..... Leergewicht des Teststaubbehälters mit Transportkolben [g]
d ..... Innendurchmesser des Teststaubbehälters (3,2 cm) [cm]
l ..... Stopfhöhe [cm]

- Dann wird durch Drücken auf den Transportkolben das Feststoffniveau bis zur obersten Kante des Teststaubbehälters angehoben. Mit dem Löffel wird überschüssiger Staub entlang der Ausnehmung für die Bürste entfernt, damit die Staubkonzentration der Dispergierung schneller ein konstantes Niveau erreicht.

- Der gestopfte Teststaubbehälter mit Transportkolben wird wieder in die Öffnung des Dispergierkopfs eingeführt und arretiert. Es wird an der Steuerungseinheit des RGB auf „manuelle Bedienung“ umgeschaltet, der Staubsauger wird aufgedreht und die Staubaustrittsdüse wird in Richtung Staubsaugerschlauchöffnung orientiert. Dann werden an der Steuereinheit die Knöpfe „Luft“, „Bürste“ und „Vor“ betätigt, eine Vorschubgeschwindigkeit von ca. 250 mm/h und eine Bürstendrehzahl von 1200 Upm werden eingestellt. Sobald an der Staubaustrittsdüse ein kontinuierlicher Partikelstrahl austritt, wird die Vorschubgeschwindigkeit auf 26 mm/h zurückgedreht. Ab kontinuierlichem Austreten des Partikelstrahls wird ca. 5 Minuten gewartet, dann wird die Stop-Taste gedrückt und an der Steuereinheit auf „Extern“ umgeschaltet.
- Die Staubaustrittsdüse wird in das Verbindungsrohr zum Filtermittelprüfstand gesteckt und im Meßdatenerfassungsprogramm wird das Menü „Prüfparameter“ und das Untermenu „Geräteparameter“ angewählt. In den Untermenüs „Durchfluß“, „Staubdosierung“, „Filterkontrolle“ und „Abreinigung“ werden die in Tab. 17 angegebenen Versuchsbedingungen sowie die Stopfdichte eingegeben. Weiters wird im Menü „Prüfparameter“ das Menü „Filter/Staub Parameter“ angewählt. Im Untermenü „Teststaub“ werden zur Kennzeichnung des Teststaubs die Daten von Tab. 16 eingegeben. Im Untermenü „Atmosphäre“ wird zur Kennzeichnung der Umgebungsbedingungen die aktuelle Raumtemperatur, die Luftfeuchtigkeit und der Luftdruck eingegeben. Im Untermenü „Prüffilter“ wird das Gewicht der unbestaubten Filtermittelronde und deren Bezeichnung eingegeben. Im Untermenü „Absolutfilter“ wird das Gewicht des unbestaubten Absolutfiltermediums eingegeben. Die Messung wird nach Eingabe aller Parameter durch Anwählen des Menus „Messung-Starten“ und Bestätigen mit „J“ gestartet. Das Messdatenerfassungsprogramm zeichnet den Druckverlust des Filtermediums, die Temperatur, den Dispergiervolumenstrom und den Reingasvolumenstrom selbstständig auf. Der Dispergiervolumenstrom wird von einem Mass Flow Meter erfaßt und on-line im Messdatenerfassungsprogramm angezeigt. Wenn der Dispergiervolumenstrom vom Wert 2 m^3/h abweicht, muß das Dosierdruckluftventil weiter geöffnet oder geschlossen werden bis der Dosiervolumenstrom konstant auf 2 m^3/h bleibt. Der Gesamtvolumenstrom wird elektronisch geregelt und muß nicht adjustiert werden.
- Nach Beendigung der Messung wird das Absolutfiltermedium vorsichtig aus der Halterung entnommen und auf der Analysenwaage abgewogen, um die Masse an Staub im Reingas zu bestimmen. Die Prüffiltereinspannung wird ebenfalls aus dem Filtermittelprüfstand herausgenommen und der Prüffilter wird abgewogen. Die Massen des Absolutfilters und des Prüffilters nach 100 Zyklen werden im Menü „Filter/Staub-Parameter“ eingetragen.
- Die Meßdaten können im Menü „Service“ unter dem Punkt „Meßdaten, aktuelle Messung“ aufgerufen werden, bzw. die Daten können in ein Datenverarbeitungsprogramm exportiert werden.

7.3 Parameter zur Kennzeichnung des Filtrationsverhaltens am VDI 3926 Typ 2 Prüfstand

Zur Auswertung der Filtrationsversuchsdaten werden Kenngrößen verwendet, welche in der VDI Richtlinie 3926 vorgegeben werden.

7.3.1 Reingaskonzentration

Die Reingaskonzentration, auch Reingasstaubgehalt genannt ist die Massenkonzentration an Staub im Reingasvolumen (Einheit mg/m^3). Sie wird mit einem im Reingaskanal

angeordneten Absolutfilter erfaßt. Die Reingaskonzentration berechnet sich als Quotient aus der nach 100 Filtrationsperioden auf dem Absolutfilter abgeschiedenen Gesamtstaubmasse und dem durch das Filter gesaugten Volumen. Bei den Messungen wurde die Reingaskonzentration durch Differenzwägung des bestaubten Absolutfilters nach 100 Filtrationszyklen bestimmt. Da die Reingaskonzentration durch Differenzwägung nach 100 Zyklen ermittelt wird, wird sie mittlere Reingaskonzentration genannt.

7.3.2 Reststaubmasse

Die nach der Abreinigung am Filtermedium anhaftende und im Inneren des Filtermediums eingelagerte Staubmasse bezogen auf die durchströmte Filterfläche wird als Reststaubmasse, abgekürzt rdm (residual durst mass) bezeichnet (Einheit g/m^2). Die Reststaubmasse wurde nach dem Ausbau des Prüffilters durch Wägung bestimmt. Bei den durchgeführten Filtrationsversuchen wurde die Reststaubmasse nach 100 Zyklen bestimmt.

7.3.3 Restdruckverlust und Zykluszeit

Der Restdruckverlust ist der Druckverlust über das Filtermedium unmittelbar nach erfolgter Abreinigung. Bei den durchgeführten Filtrationsversuchen wurde der Restdruckverlust nach 100 Zyklen aus einer Regression der letzten 10 Restdruckverlustwerte berechnet (Abb. 40).

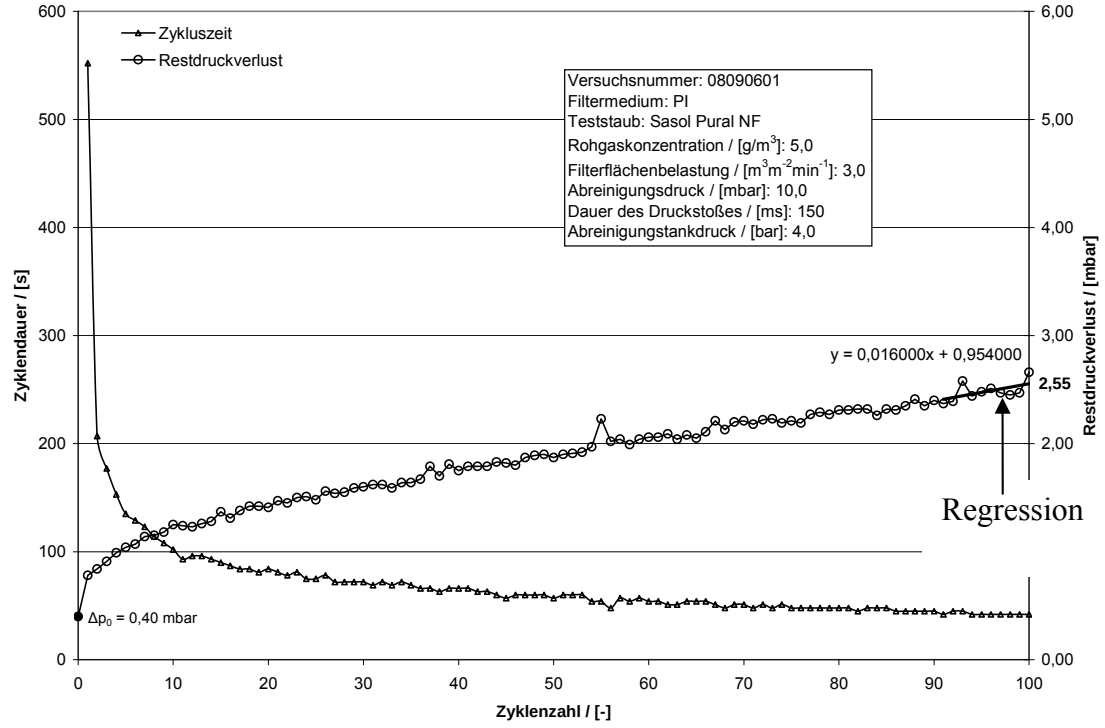


Abb. 40: Darstellung des Verlaufs von Restdruckverlust und Zyklusdauer in Abhängigkeit von der Zyklenzahl

Zur Auswertung der Filtrationsversuche hinsichtlich des Restdruckverlusts wird meist der korrigierte Restdruckverlust als Parameter herangezogen. Der korrigierte Restdruckverlust berechnet sich durch Differenzbildung zwischen dem Restdruckverlust nach 100 Zyklen und dem Anfangsdruckverlust der unbestaubten Ronde (Formel 3). Der korrigierte Restdruckverlust wird verwendet, weil er den durch die Staubeinlagerung entstandenen Druckverlust wieder gibt.

$$\Delta p_{r,korr,100} = \Delta p_{r,100} - \Delta p_0 \qquad \text{(Formel 3)}$$

Symbolik:

$\Delta p_{r,korr,100}$ ..... korrigierter Restdruckverlust [mbar]

$\Delta p_{r,100}$ ..... Restdruckverlust nach 100 Zyklen [mbar]

Δp_0 ..... Anfangsdruckverlust [mbar]

7.3.4 Luftdurchlässigkeit

Die Luftdurchlässigkeit in l/(dm²·min) gibt den Volumenstrom pro dm² Filterfläche an, welcher sich einstellt, wenn am unbestaubten Filtermedium eine konstante Druckdifferenz von 200 Pa anliegt. Bestimmt wird die Luftdurchlässigkeit gemäß DIN EN ISO 9237 [24] mittels eigener Luftdurchlässigkeitsprüfgeräte.
Die Luftdurchlässigkeit der zu untersuchenden Ronden wurde im Rahmen dieser Arbeit mittels VDI 3926 Typ 2 Testapparatur ohne Staubdosierung überprüft. Es wird Luft mit einem Volumenstrom von 3,19 m^3/h durch den Filtermittelprüfstand gesaugt und der Druckabfall am Filtermittel detektiert. Da Massendurchflussmesser auf Normalbedingungen geeicht werden, wurde zur Temperaturkorrektur des detektierten Volumenstroms ($\dot{V}$) ein Temperaturkorrekturfaktor (K) eingeführt.

$$K = \frac{\dot{V} \cdot T}{3{,}19 \cdot 293{,}15} \qquad \text{(Formel 4)}$$

Symbolik:

K ..... Temperaturkorrekturfaktor [ ]

$\dot{V}$ ..... tatsächlicher Volumenstrom [m^3/h]

T ..... tatsächliche Temperatur [K]

3,19 ..... eingestellter Volumenstrom [m^3/h]

273,15 ..... Normtemperatur [K]

Es wird ebenfalls ein Offset O [mbar] der Membrandruckmeßdose berücksichtigt.
Die Luftdurchlässigkeit wird folgendermaßen berechnet:

$$L = \frac{K \cdot 60}{(\Delta p - O)} \qquad \text{(Formel 5)}$$

Symbolik:

L ..... Luftdurchlässigkeit [l/(dm^2min)] bei 200 Pa

K ..... Temperaturkorrekturfaktor [ ]

Δp ..... gemessener Druckabfall am Filtermedium [mbar]

O ..... Offset [mbar]

60 ..... Berechnungsfaktor $\left[\frac{mbar \cdot l}{dm^2 \cdot \min}\right]$

Es wird Δp in mbar eingesetzt, der Berechnungsfaktor 60 errechnet sich aus der Umrechnung von mbar auf den Bezugswert 200 Pa, der Umrechnung des Volumenstroms von [m^3/h] auf [l/min] und des Beziehens auf 1 dm^2 Filterfläche, wobei eine durchströmte Filterfläche von 1,77 dm^2 berücksichtigt wird. Bei den Umrechnungen wurde eine lineare Beziehung zwischen Δp und $\dot{V}$ angenommen, welche im laminaren Strömungsbereich gilt. Die lineare

Abhängigkeit des Druckverlusts vom Volumenstrom wurde für verschiedene Filtermedien am VDI 3926 Typ 2 Filtermittelprüfstand untersucht (Abb. 41) und es zeigte sich ein hohes Bestimmtheitsmaß der linearen Regression mit Schnittpunkt im Koordinatenursprung. Das Gesetz von Darcy, welches meist zur Beschreibung des Filtrationsdruckverlustverhaltens verwendet wird, beruht ebenfalls auf einer laminaren Durchströmung.

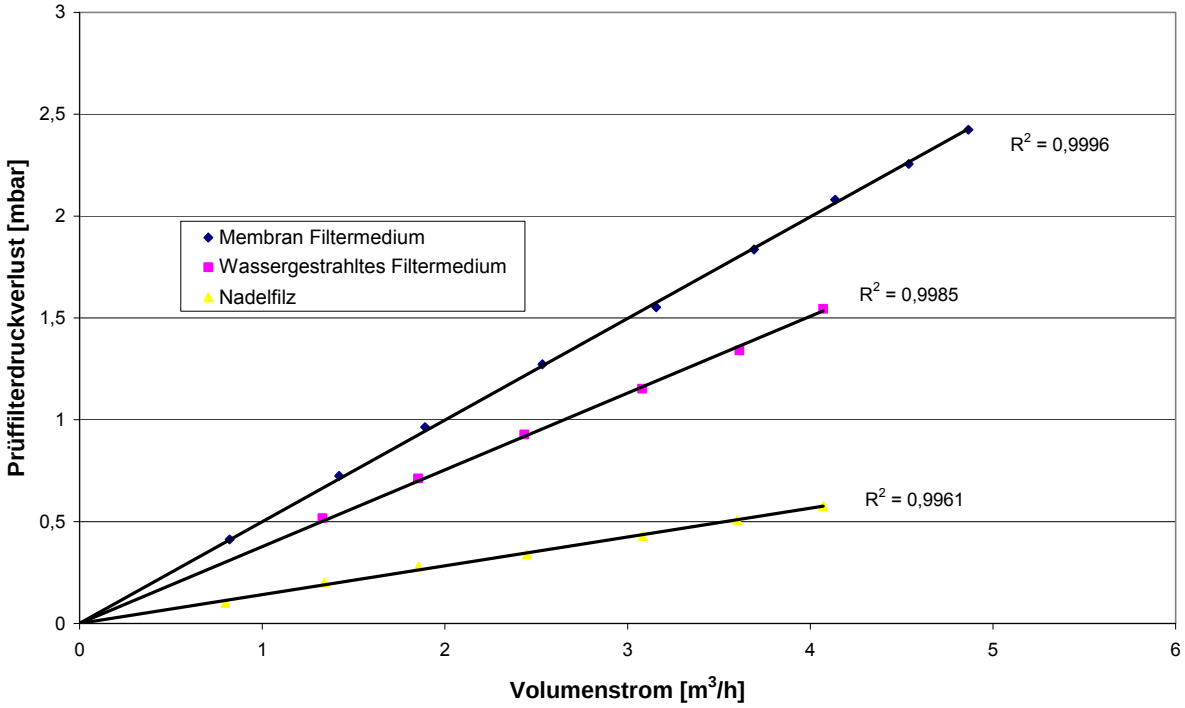


Abb. 41: Überprüfung der linearen Abhängigkeit des Druckverlusts vom Volumenstrom

8 Bildanalytische Charakterisierung der Oberflächenstruktur

Im Rahmen dieser Arbeit soll die lichtoptische Bildanalysemethode der oberflächennahen Filtermedienstrukturen welche von Koschutnig [8] und Rud [9] beschrieben wurde weiterentwickelt werden. Das Filtrationsverhalten von Abreinigungsfiltermedien wird maßgeblich durch die oberflächennahen Strukturen beeinflußt. Ein besonderes Augenmerk soll hierbei auf die Automatisierung der Methode gelegt werden. Die lichtoptischen Parameter sollen um Parameter erweitert werden, welche die Inhomogenität der Filtermitteloberfläche beschreiben.

Mit Hilfe der gängigen materialspezifischen Parameter wie z.B. Luftdurchlässigkeit, Flächengewicht, Zugfestigkeit usw. kann zumeist keine eindeutige Aussage über das Filtrationsverhalten gemacht werden. Ausführliche Untersuchungen von Lünenschloß und Gupta haben ergeben, dass mit den derzeit üblichen materialspezifischen Parametern keine Aussage über das Abscheideverhalten gemacht werden kann [25].
In der Literatur werden Rückschlüsse auf das Filtrationsverhalten aufgrund von Porositäts- bzw. Strukturkenngrößen der Filtermitteloberfläche beschrieben [8,9,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53, 54]. Die oberflächennahe Schicht hat einen großen Einfluß auf die Kuchenbildung, die Abreinigung, die Abscheideeffizienz, die Reststaubmasse, den Restdruckverlust und die Standzeit. Diese Schicht wird als „partial fibre layer“ (PF-layer) bezeichnet. Der Druckverlustanstieg während einer Filtrationsperiode kann modellhaft in zwei Bereiche

unterteilt werden. Während des ersten Abschnitts werden hauptsächlich Poren verstopft und während des zweiten Abschnitts erfolgt die Kuchenfiltration. Diesen Sachverhalt haben die Filtermittelhersteller erkannt die ihre Filtermedien rohgasseitig mit Ausrüstungen versehen (Kalandrieren, Sengen, Laminatbeschichten usw.). Sie verhindern dadurch das Eindringen von Partikeln in das Innere und bedingen eine verbesserte Abreinigung und damit geringere Reststaubmassen [29]. Eine dichtere Oberfläche begünstigt den Kuchenaufbau, da der Kuchen eine hochwirksame Filtrationsschicht ist, welche das Eindringen von Partikeln in den Nadelfilz verhindert.

Zur Analyse der Oberflächenstruktur wurden nicht invasive Methoden entwickelt [8, 9], welche im Rahmen dieser Dissertation für die Analyse der Filtermedien verwendet werden. Diese Methoden basieren auf Lichtmikroskopie. Da die Auflösung des menschlichen Auges speziell bei kleinen Objekten begrenzt ist, müssen Hilfsmittel verwendet werden. Hierbei ist die Lichtmikroskopie eine wichtige Methode zur vergrößerten Abbildung von Objekten. Die Grenze der Auflösung in der Lichtmikroskopie ist von der Wellenlänge des Lichts und der Beleuchtung abhängig. Bei blauem Licht liegt sie von Spezialanwendungen abgesehen bei etwa 0,4 µm. Da die verwendeten Fasern in Nadelfilzen einen Durchmesser von durchschnittlich 10-30 µm besitzen ist die Lichtmikroskopie sicherlich eine einfache und in ihrer Auflösung meist ausreichende Methode um die Oberflächenstruktur abzubilden. Man unterscheidet zwischen zwei Beleuchtungsarten, der Durchlicht- und der Auflichtmikroskopie. Bei der Durchlichtmikroskopie, wird das Objekt von unten (aus der Sicht des Objektivs) beleuchtet, d.h. das Licht durchleuchtet die Probe und wird dann vom Objektiv gesammelt. Bei der Auflichtmikroskopie wird das Objekt vom Objektiv bzw. von der Seite aus beleuchtet, das Licht trifft auf das Objekt, und die reflektierten Strahlen werden vom Objektiv gesammelt. Die Auflichtmikroskopie wird vor allem bei lichtundurchlässigen Proben verwendet.

Das Objektiv bildet das Objekt verkehrt und vergrößert in der Brennebene des Okulars ab und das Okular bildet das Zwischenbild seitenrichtig und vergrößert auf der Netzhaut des Auges ab. Statt dem Auge können die Lichtstrahlen auch auf der Projektionslinse einer Kamera abgebildet werden.

Die Schicht nahe der Oberfläche eines Nadelfilzes ist ein dreidimensionales Gebilde. Mit Hilfe der Lichtmikroskopie wird jedoch nur ein zweidimensionales Bild erhalten, welches nur in einer bestimmten Tiefe 100 % scharf ist.

8.1 Parameter zur Charakterisierung der Oberflächenstruktur mittels Bildanalyse

8.1.1 Porentiefenmessung

Die relativen Höhenunterschiede der Fasern auf der Nadelfilzoberfläche werden mittels Porentiefenmessung ermittelt. In Abb. 42 wird die Untersuchungsmethode der Porentiefenanalyse schematisch dargestellt. Die Porentiefenbestimmung erfolgt mittels Auflichtmikroskopie, d.h. die Probe wird in senkrechter Richtung zum Objekt von oben beleuchtet.

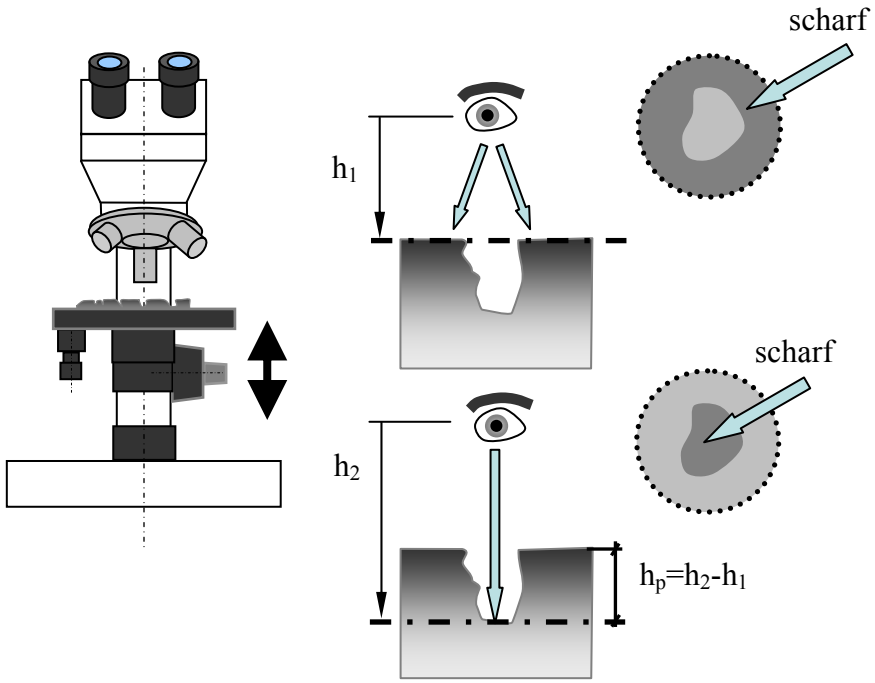


Abb. 42: Prinzipielle Darstellung der auflichtmikroskopischen Porentiefenbestimmung

Da die visuelle Porentiefenbestimmung mittels Mikroskops zeitaufwändig ist wird versucht diese zu automatisieren. Mit Hilfe eines Olympus BX 61 Mikroskops (Abb. 43) mit motorisiertem Objettisch (Märzhäuser Tango 2 PCI) und CCD- Kamera (ColorView I) kann die Porentiefenverteilungsbestimmung automatisiert bestimmt werden.

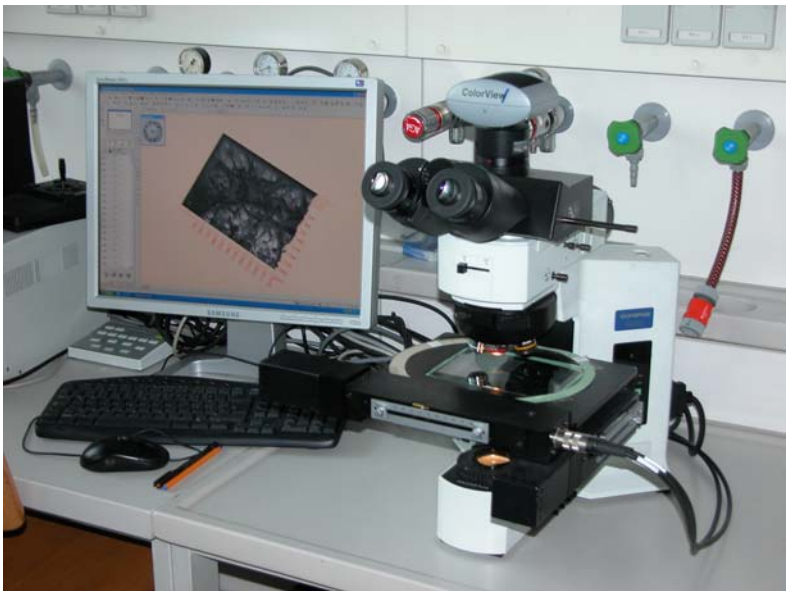


Abb. 43: Olympus BX 61 Mikroskop mit motorisiertem Objekttisch

Da die Filtermedienoberfläche inhomogen ist müssen mehrere Stichproben an der Oberfläche einer Filtermittelronde analysiert werden um ein für die Filtermittelronde repräsentatives Ergebnis zu erhalten. Für zweidimensionale Probennahmeprobleme dieser Art werden in der Statistikliteratur [55] zufällige- oder systematische- Probennahmemethoden vorgeschlagen. Bei der zufälligen Probennahmemethode werden an zufällig verteilten Stellen an der Filtermitteloberfläche Proben genommen und bei der systematischen Probennahme werden die Proben an regelmäßig verteilten Stellen an der Filtermitteloberfläche entnommen. Die Wahl einer systematischen Probennahmemethode im Vergleich zu einer zufälligen Probennahmemethode ist dann zulässig, wenn die untersuchten Filze keine regelmäßig verteilten Strukturunterschiede, wie dies z.B. bei sehr regelmäßigen Geweben der Fall ist, besitzen [55].
Aufgrund der besseren Implementierbarkeit des systematischen Probennahmeschemas in die „Olympus analysis five“- Software und dadurch einer besseren Automatisierbarkeit, wurde die systematische Probennahmemethode ausgewählt.
Da die durchströmte Filterfläche einer Filtermittelronde einen Durchmesser von 15 cm besitzt, mit dem motorisierten Probennahmetisch jedoch nur eine Fläche von 8 x 10 cm analysiert werden kann, wurde die Filtermittelronde in 4 Segmente aufgeteilt, auf welchen die Punkte des Probennahmeschemas situiert sind (siehe Abb. 44).

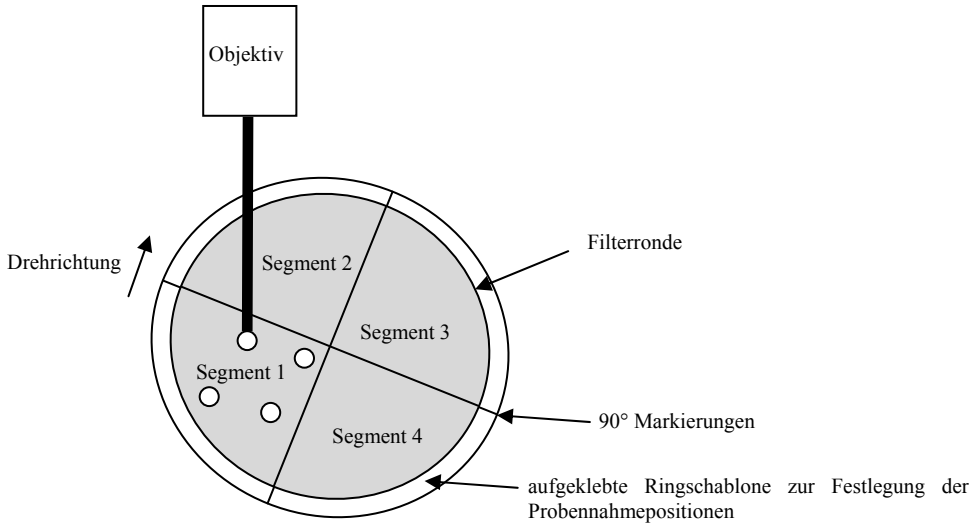


Abb. 44: Segmentaufteilung der Filtermittelronde

Auf die 4 Segmente wurden jeweils 4 systematische Probennahmestellen aufgeteilt (Abb. 45), welche mithilfe der Olympus Programms „analysis five“ und des motorisierten Objektisches automatisiert angefahren werden können. Die Probennahmestellen sind an den Eckpunkten eines 2 cm Teilungsrasters situiert.

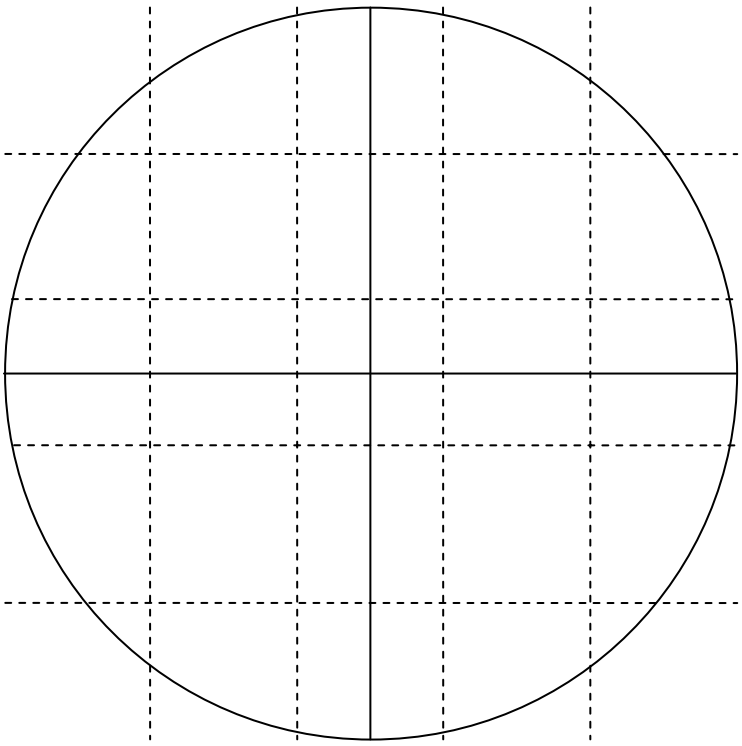


Abb. 45: Probennahmeschema für die Porentiefenmessung. Die Probennahmestellen sind an den Eckpunkten der strichlierten Linien situiert.

Mithilfe der Registerkarte „EFI Focus Kontrolle“ wird an jedem Probennahmepunkt eine Bilderserie mit 100 Bildern aufgenommen. Die 100 Bilder werden auf der z-Achse von der Focusebenenposition in welcher die oberste abstehende Faser einen scharfen Umriss besitzt bis zur Focusebenenpositon in welcher die unterste Faser am Porengrund einen scharfen Umriss besitzt in äquidistanten Abständen situiert.

Anhand der lokalen Kontraständerungen in den Einzelbildern wird nun mittels Fouriertransformation ein Reliefbild (Abb. 46) als Graustufenbild (Abb. 47) berechnet, in welchem jedem Grauwert eine Tiefe zugeordnet wird.

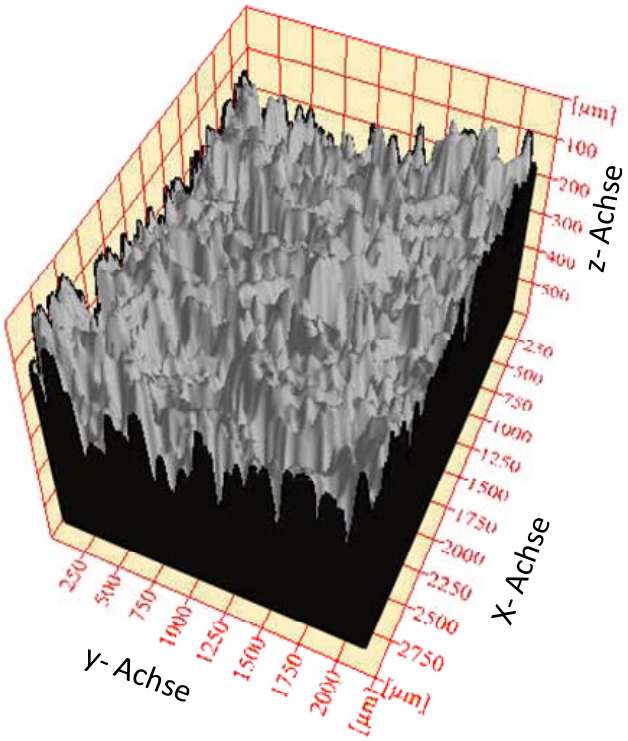


Abb. 46: Porenrelief eines Nadelfilzes

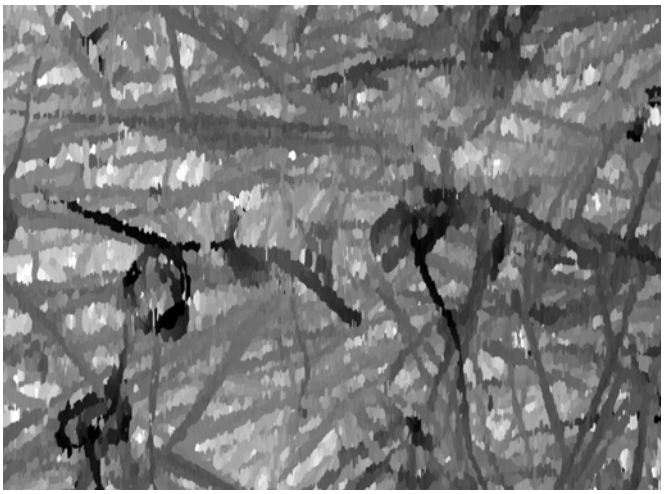


Abb. 47: Graustufenbild mit 256 Graustufen. Dunkle Graustufen (niedriger Graustufenwert) charakterisieren abstehende Fasern und helle Graustufen (hoher Graustufenwert) charakterisieren Fasern in Poren.

Das Graustufenbild kann durch die Funktion „Histogramm“ im Programm „analysis five“ als Dichteverteilung der Bildpunkte dargestellt werden (Abb. 48), welche als Excel-Datei abgespeichert wird.

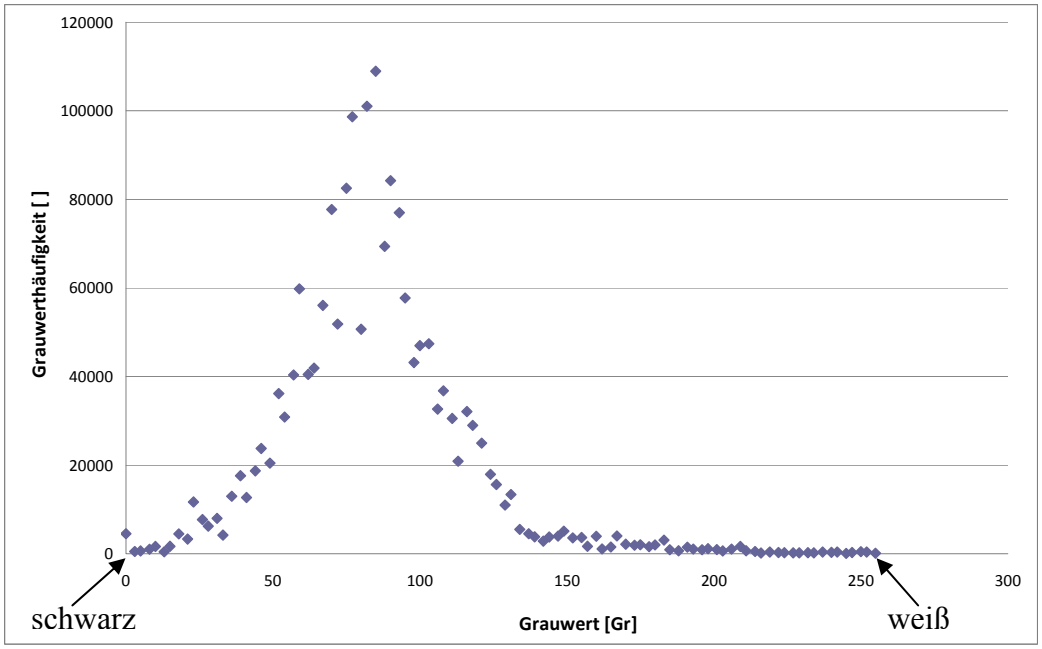


Abb. 48: Häufigkeitsfunktion der Graustufen

Durch die Kenntnis der untersuchten z-Distanz kann die Bildpunktdichteverteilung mit Formel 6 und Formel 7 in eine Anzahlverteilungssummenfunktion der Tiefe (Abb. 49) umgerechnet werden. Hierfür ist es notwendig die Bildpunkte, welche bei den üblichen z-Distanzen von 200-2000 µm in Klassenbreiten < 10 µm eingeteilt sind in, 10 µm Klassenbreiten einzuteilen.

$$t_i = \frac{Gr_i \cdot \Delta z}{255} \qquad \text{(Formel 6)}$$

Symbolik:
t_i ..... Tiefe der Klasse i [µm]
Gr_i ..... Graustufe der Klasse i
Δz ..... untersuchte z-Distanz zwischen der Focusebenenposition in welcher die oberste abstehende Faser einen scharfen Umriss besitzt bis zur Focusebenenpositon in welcher die unterste Faser am Porengrund einen scharfen Umriss besitzt. [µm]

$$Q_0(t_n) = \frac{\sum_{i=0}^{n} px_i}{\sum_{i=0}^{i=\max} px_i} \qquad \text{(Formel 7)}$$

Symbolik:
$Q_0(t_n)$ ..... Verteilungssumme der Klasse t_n [ ]
px_i ..... Bildpunkte in der Klasse i [ ]
t_n ..... Tiefenobergrenze der Klasse n [µm]

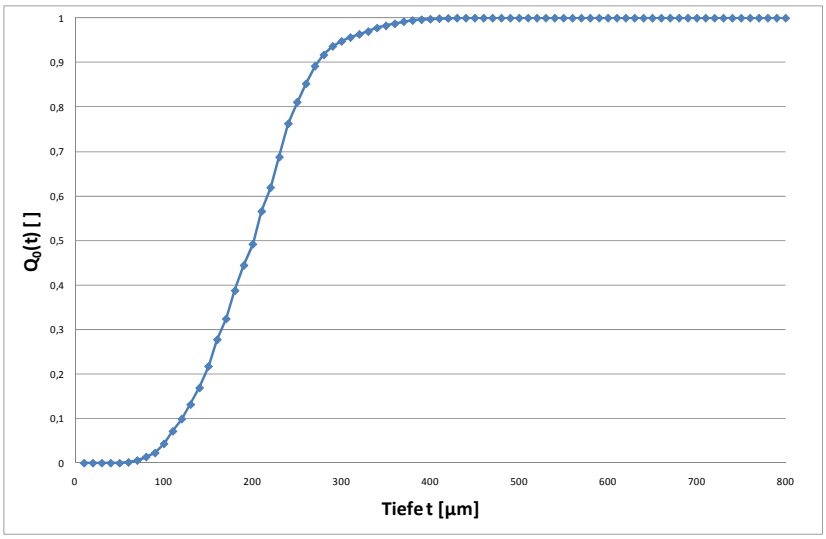


Abb. 49: Anzahlverteilungssummenfunktion der Bildpunkte aufgetragen über der Tiefe

Die Porentiefensummen der 16 Probennahmepunkte werden nun innerhalb der Klassen gemittelt und zu einer repräsentativen Porentiefensummenverteilung zusammengeführt (Formel 8).

$$Q_0(t_n) = \frac{\sum_{i=0}^{i=\max} px_{i,1} + \sum_{i=0}^{i=\max} px_{i,2} + \ldots + \sum_{i=0}^{i=\max} px_{i,16}}{\sum_{i=0} px_{i,1} + \sum_{i=0} px_{i,2} + \ldots + \sum_{i=0} px_{i,16}}$$

(Formel 8)

Symbolik:

$Q_0(t_n)$ ..... Verteilungssumme der Klasse t_n [ ]

$px_{i,1\text{-}16}$ ..... Bildpunkte in der Klasse i. Index 1-16: Nummer der Probennahmestelle [ ]

t_n ..... Tiefenobergrenze der Klasse n [µm]

Die Porentiefensummenverteilung kann z.B. durch die Kennwerte $hp_{50,0}$ (Medianwert) und hp_{max} charakterisiert werden (Abb. 50).

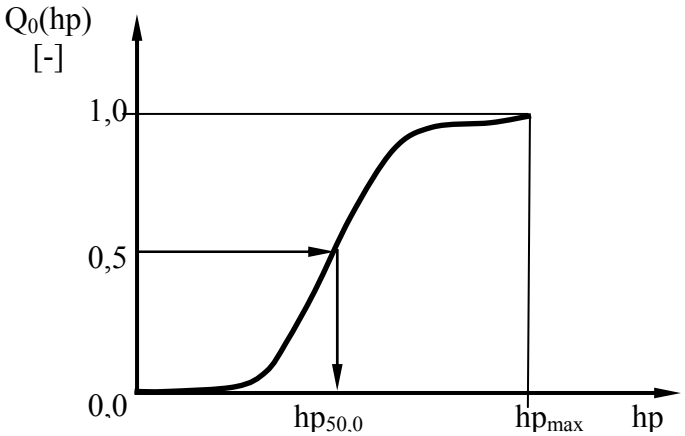


Abb. 50: Schematische Darstellung einer Porentiefensummenverteilung

Weiters galt es zu überprüfen ob der anhand der 16 Probennahmepunkte (Stichproben), berechnete Mittelwert für Klassierungsaussagen zwischen verschiedenen Filtermedien mit einer ausreichenden statistischen Sicherheit zulässig ist. Die Anzahl der Probennahmepunkte

welche für eine Klassierungsaussage mit ausreichender statistischer Sicherheit notwendig ist, ist abhängig von:

- von der Streuung des Probenmittelwerts
- von der Art der Klassierungsaussage (z.B. die Porentiefenverteilung Probe A ist unterschiedlich zur Porentiefenverteilung der Probe B)

Die resultierende mittlere Porentiefenverteilung unterliegt bei Mittelung von 16 Stichproben bei Nadelfilzen nur einer geringen Streuung (Abb. 51). Wenn Filtermedien viel größere Unterschiede in den mittleren Porentiefenverteilungen aufweisen können Klassierungsaussagen mit ausreichender statistischer Sicherheit durchgeführt werden. Weisen Filtermedien Unterschiede in den mittleren Porentiefenverteilungen auf, welche in der Größenordnung der Streuung der Analysenmethode liegt (Abb. 51), kann keine Klassierungsaussage gemacht werden. Bei den im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Untersuchungen wurden nur dann Klassierungsaussagen gemacht, wenn viel größere Unterschiede in den mittleren Porentiefenverteilungen vorlagen als bei den mittleren Porentiefenverteilungen der Wiederholungsuntersuchung in Abb. 51.

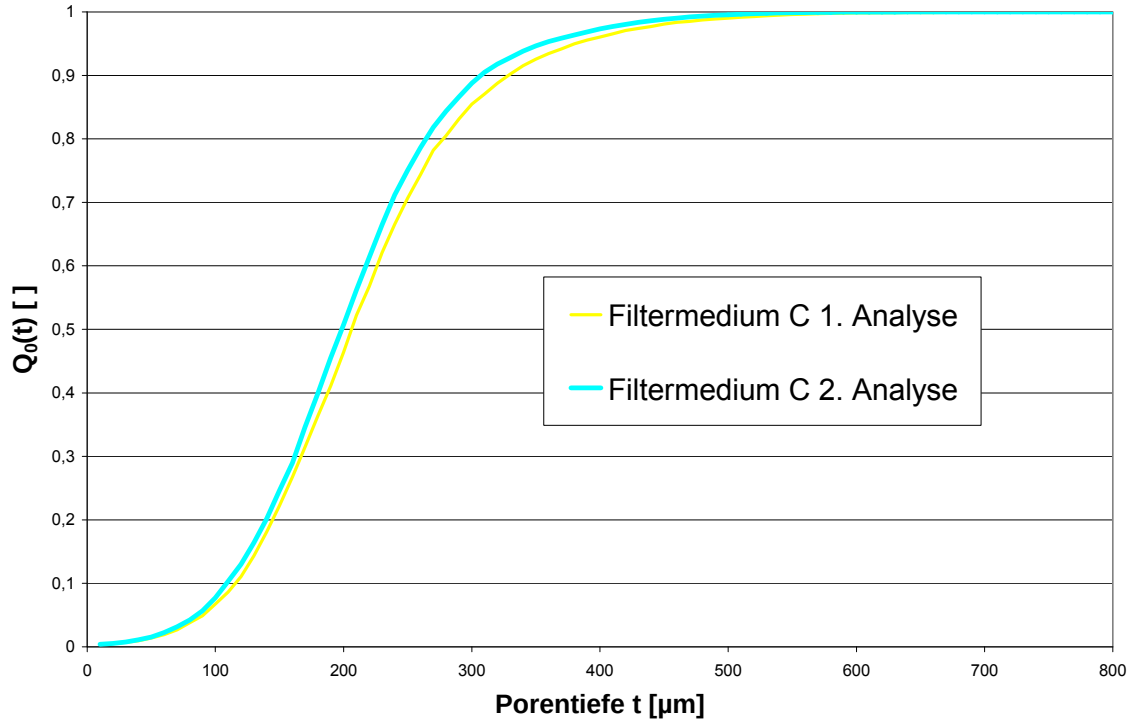


Abb. 51: Mittlere Porentiefenverteilungen eines Filtermediums bei zwei getrennten Analysen eines PPS Nadelfilzes

8.1.1.1 Durchführung der Porentiefenmessung

Da der mittels motorisierten Probennahmetisch erfaßbare Probenbereich kleiner ist als die Filterronde, wird die Ronde in vier Segmente aufgeteilt in welchen die Probennahmepunkte automatisiert erfasst werden können (Abb. 44). Eine Ringschablone wird wie in Abb. 44 dargestellt zur Markierung und Begrenzung der Segmente auf den Mikroskoptisch aufgeklebt. Auf der Ringschablone wurden 4 Markierungen im 90° Winkel gemacht.
Die Filtermittelronde wird ebenfalls an ihren Rändern jeweils im 90° Winkel markiert und auf die vorgesehene Ringschablone am Mikroskoptisch aufgelegt. Es werden nun sukzessive die vier Kreissegmente auf denen je vier Probennahmepunkte situiert sind (siehe Abb. 44 und

Abb. 45) analysiert, hierfür wird die Filtermittelronde nach jedem analysierten Segment um 90° im Uhrzeigersinn gedreht.
Um die Positionen innerhalb der Segmente anfahren zu können, wurde das Programm „Analysis five“ gestartet. Es wurde in der Registerkarte „Tisch“ der Befehl „Tischmanager“ aufgerufen. Im Tischmanager wurde die Registerkarte „Beliebig“ ausgewählt (Abb. 52).

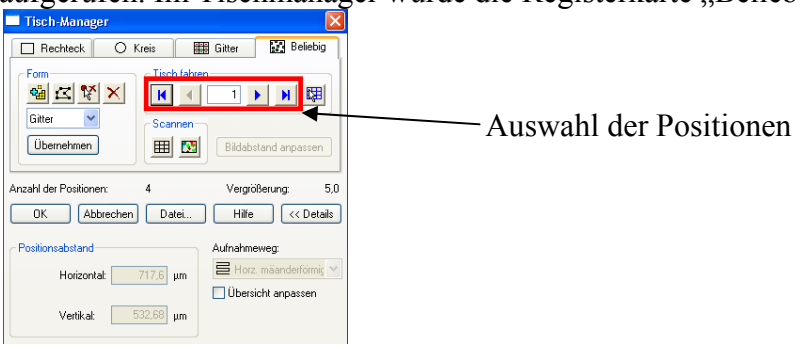


Abb. 52: Registerkarte Beliebig des Tischmanagers

Zur Erstellung des Probennahmeschemas im Programm Analysis five wird wie folgt vorgegangen:

Vorgegebene Punkte werden gelöscht und mit dem Joystick wird der erste Punkt des ersten zufällig gewählten Segments angefahren. Durch den Befehl „Punkt hinzufügen“ wird der Probennahmepunkt hinzugefügt. Mit den restlichen drei Punkten wird gleichsam verfahren. Das Probennahmeschema wird z.B. unter dem Namen „tneu“ abgespeichert.

Vor Beginn einer Analyse wird kontrolliert ob das richtige Probennahmeschema geladen wurde (Abb. 53) und dann wird „Pos. 1“ ausgewählt und mit „OK“ Bestätigt Abb. 52.

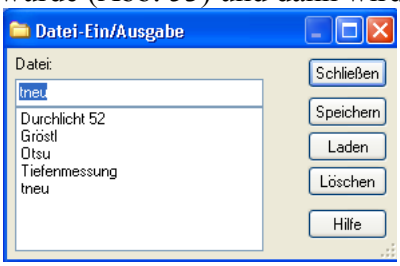


Abb. 53: Laden des Probennahmeschemas

Nun wird durch Doppelklicken auf das Symbol „EFI Focuskontrolle“ in der Symbolleiste das EFI Fokuskontrollfenster geöffnet und es wird mittels Trieb auf die oberste abstehende Faser scharfgestellt (Abb. 56). Im EFI Focuskontrollfenster wird „Oben“ angeklickt und auf die unterste Faser am Porengrund scharfgestellt. Es wird „Unten“ angeklickt, die angezeigte z-Distanz in µm wird notiert und die Anzahl der Bilder auf 100 gestellt. 100 Bilder wurden als Kompromiss zwischen einer noch akzeptablen Analysezeit/Probennahmestelle (ca. 5 min) und einer ausreichenden Feinheit der resultierenden Klassenbreite ausgewählt.
Vorm Starten der Messung wird kontrolliert ob das Bild ausreichend beleuchtet bzw. nicht überbelichtet ist (Bild erscheint zu hell, Kontrastunterschiede verschwimmen). Falls das Bild zu stark oder zu schwach beleuchtet ist wird die Lampenspannung oder die Belichtungszeit angepasst (Abb. 54, Abb. 55).

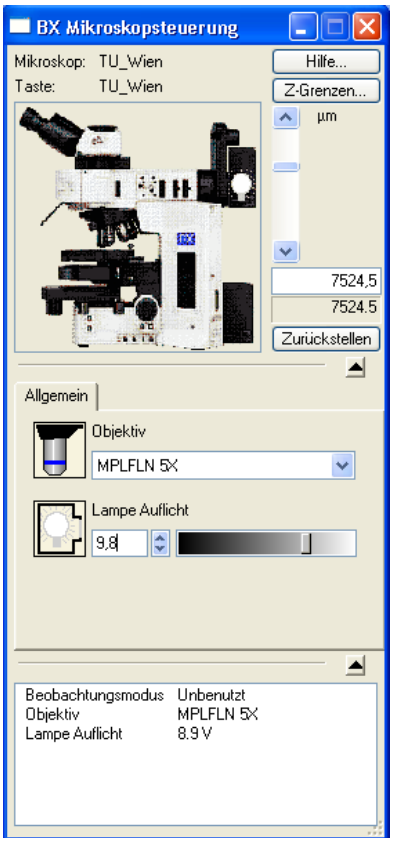


Abb. 54: Auswahl der gewünschten Vergrößerung und der Lampenspannung

Abb. 55: Einstellung der Belichtungszeit

Nun wird „Ausführen“ angeklickt und das Programm beginnt innerhalb der festgelegten z-Distanz in äquidistanten Abständen eine Bilderserie mit 100 Bildern aufzunehmen (Siehe 8.1.1, Seite 51).

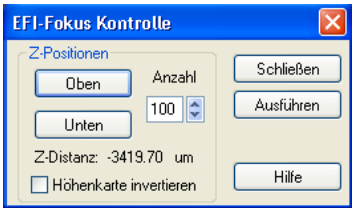


Abb. 56: EFI Focuskontrollfenster

Da die Randzonen aufgrund der verwendeten Optik schlechter beleuchtet sind, wird das Bild beschnitten, um einen homogen beleuchteten Bildausschnitt bei der verwendeten Messkonfiguration zu erhalten. Es werden auf der linken Seite des Bildes 350, auf der rechten Seite 150, am oberen Bildrand 300 und am unteren Bildrand 100 Bildpunkte des Bildes entfernt (Abb. 57, Abb. 58). Es ergibt sich somit ein Bild mit einem Format von 1580x1144 Bildpunkten, das sind etwas mehr als 1,8 Millionen Bildpunkte.

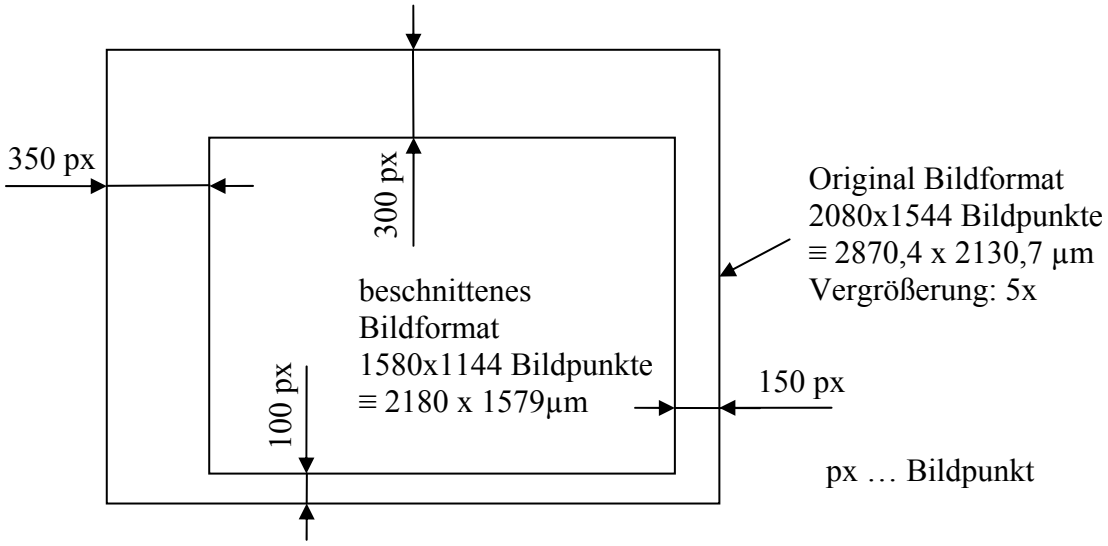


Abb. 57: Beschneiden des Bildbereichs

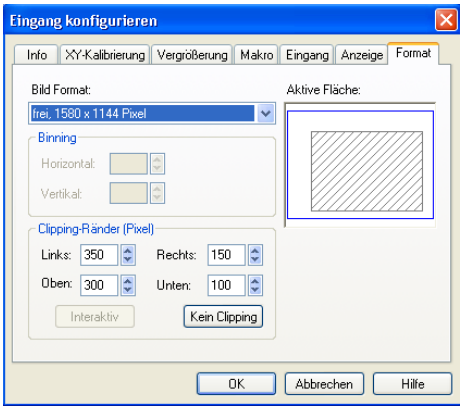


Abb. 58: Auswahl der gut beleuchteten Bildfläche

Der beschnittene Bildausschnitt ist zwar kleiner als das ursprüngliche Bildformat von 2080x1544 Bildpunkte und es stehen somit weniger Informationen für die Auswertung zur Verfügung, jedoch ist er homogener ausgeleuchtet und Helligkeitsunterschiede treten dadurch deutlicher hervor.

Als Resultat der Tiefenbestimmung werden ein Graustufenbild und ein Farbbild, welches in allen Bildpunkten die größte Schärfe aufweist vom Programm „analysis five“ errechnet.
Die Grauwertverteilung der pixel im Graustufenbild wird durch den Befehl „Histogramm“ in tabellarischer Form erhalten. Die Tabellen werden unter dem Namen „Tab1-Tab16“ als Excel-Dateien abgespeichert. Mit Hilfe eines Visual Basic Makros (Makro 1) werden die einzelnen Tabellen automatisiert in eine Zusammenfassungsdatei eingelesen.

```
Sub Makro2()
'
' Makro2 Makro
' Makro am 04.08.2008 von jschub aufgezeichnet
'

'
Dim i As Integer
For i = 1 To 16

Workbooks.Open Filename:= _
"S:\mvtlrt\MVT\jschub\Modellporen+Inh+Faserabl\Faserablösung\Olympus Mikroskop\V268_11_NeuC\Tab"
Columns("B:B").Select
Selection.Copy
Windows("Zusammenfassung.xls").Activate
Sheets(i).Activate
Columns("B:B").Select
ActiveSheet.Paste
Range("E1").Select
Windows("Tab" & i & ".xls").Activate
ActiveWindow.Close

Next [i]
End Sub
```

Makro 1: Visual Basic Makro zum automatisierten Einfügen der Porentiefenanalysedateien in eine Zusammenfassungsdatei

Mit Formel 6 und Formel 7 wird nun mit Hilfe der gesamt z-Distanz die Porentiefensummenverteilung jeder Stichprobe berechnet. Um eine repräsentative Porentiefensummenverteilung zu erhalten, werden die Porentiefensummen der 16 Probennahmepunkte innerhalb der Klassen gemittelt (Formel 8).

- Berechnungsbeispiel 1: Berechnung der Porentiefenverteilungssumme

Aufgabenstellung: Welche Verteilungssumme besitzt der Grauwert 23 bzw. welcher Tiefe entspricht der Grauwert 23 (Angaben Tab. 18 und Tab. 19)?

Grauwert	Anzahl Bildpunkte
0	4504
3	490
5	634
8	1021
10	1624
13	437
15	1667
18	4471
21	3306
23	11696

Tab. 18: Verteilung der Bildpunkte als Funktion der Grauwerte

Zur Lösung dieser Aufgabe müssen folgende Angaben bekannt sein:

Gesamt z-Distanz [µm]
636,5
Gesamtanzahl der Bildpunkte
1807520

Tab. 19: Angabe der z-Distanz und der Bildpunkte

Die z-Distanz des Grauwerts wird mit folgender Schlußrechnung errechnet:

256 Grauwerte……636,5 µm

23 Grauwerte……x

x=57,2 µm

Die Verteilungssumme des Grauwerts berechnet sich folgendermaßen:

$$Q_0(57,2) = \frac{\sum_{0}^{23} px_i}{\sum_{0}^{255} px_i} = \frac{29850}{1807520} = 0,017$$

Symbolik:

px_i ..... Anzahl der Bildpunkte in der Klasse i

$Q_0(57,2)$ ..... Verteilungssumme bei 57,2 µm

Ergebnis: $Q_0(57,2) = 0,017$

8.1.2 Bestimmung der Porenflächenverteilung und der Inhomogenitätskenngrößen

Die Porenflächenverteilung und die Inhomogenitätskenngrößen (siehe Kapitel 8.1.2.5, Seite 69) kann bei unbestaubten Proben oder bei bestaubten Proben bestimmt werden. Für die Analyse von bestaubten Medien ist eine Vorkonditionierungsprozedur notwendig, welche aus einem Bestaubungszyklus und nachfolgenden Abreinigungszyklen besteht. Die Bestimmung der Porenflächenverteilungen erfolgt mittels Durchlichtmikroskopie, welche schematisch in Abb. 59 dargestellt ist. Die Durchlichtmikroskopie wird verwendet da sich die Porenstrukturen in der Durchlichtmikroskopie meist besser von den umgebenden Strukturen abheben als in der Auflichtmikroskopie.

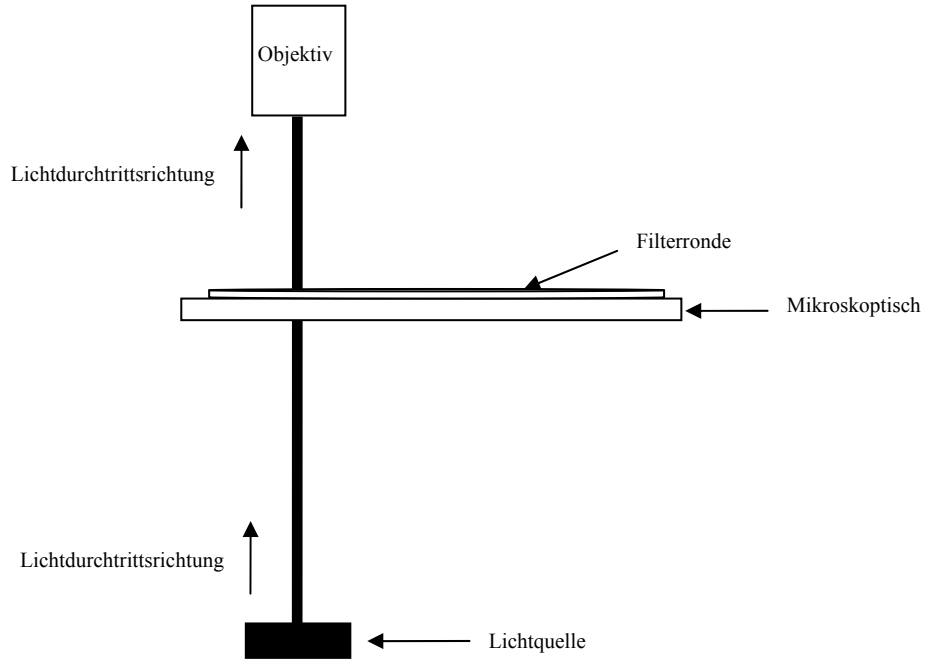


Abb. 59: Schematische Darstellung des Lichtweges bei der Durchlichtmikroskopie

8.1.2.1 Filtermedienkonditionierung für die Analyse von bestaubten Ronden

Die Filtermedienkonditionierung wird zur Erhöhung des Porenkontrasts durchgeführt. Die Filtermedienkonditionierung besteht aus einem Bestaubungszyklus und darauffolgend fünf Abreinigungen (siehe Abb. 60). Durch das Bestauben und das darauffolgende mehrmalige Abreinigen werden Poren bzw. Strömungskanäle freigelegt, welche mittels Bildanalyse erfaßt werden können. In Abb. 61 und Abb. 62 ist ersichtlich, dass der Porenkontrast durch die Vorkonditionierung erhöht wurde.

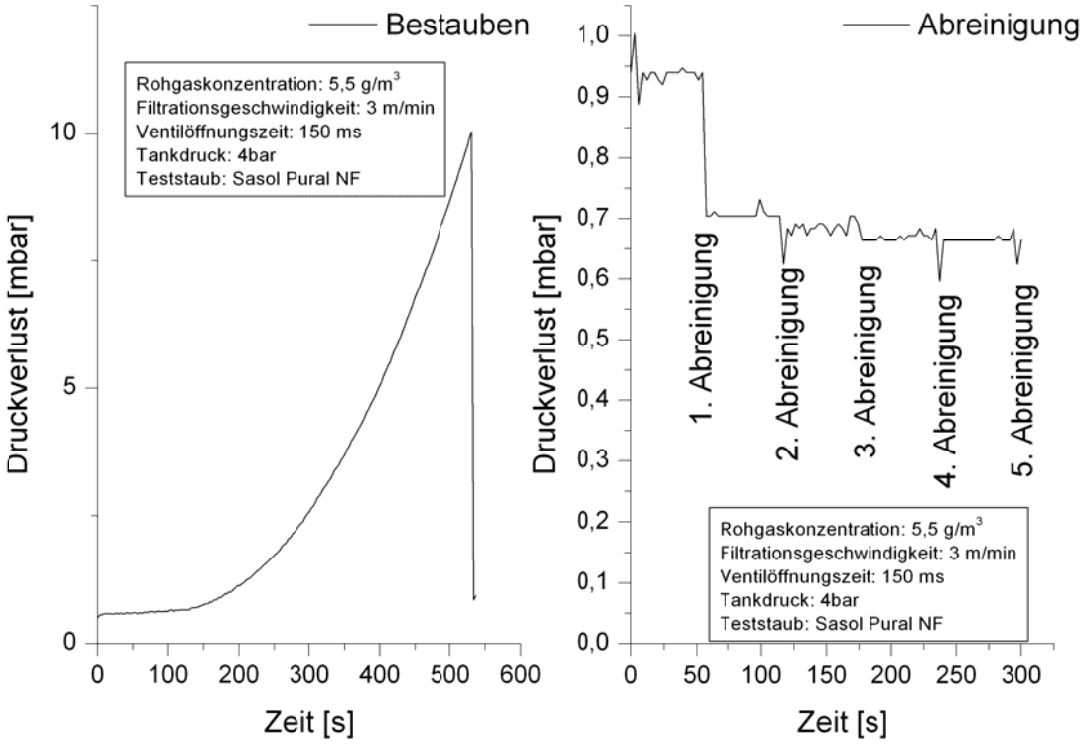


Abb. 60: Druckverlustverläufe während der Filtermedienkonditionierung

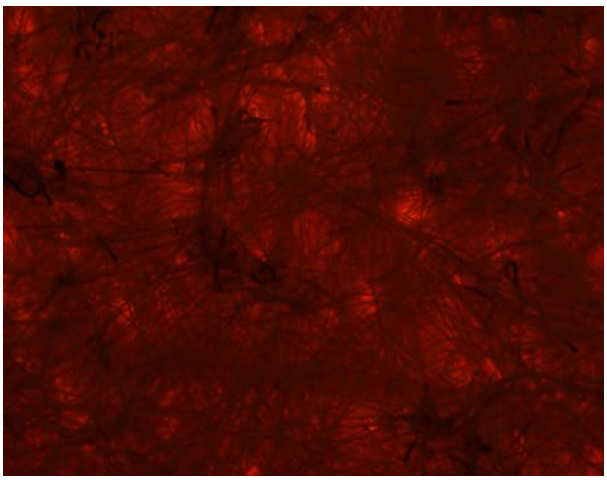


Abb. 61: PI Filtermedium unbestaubt

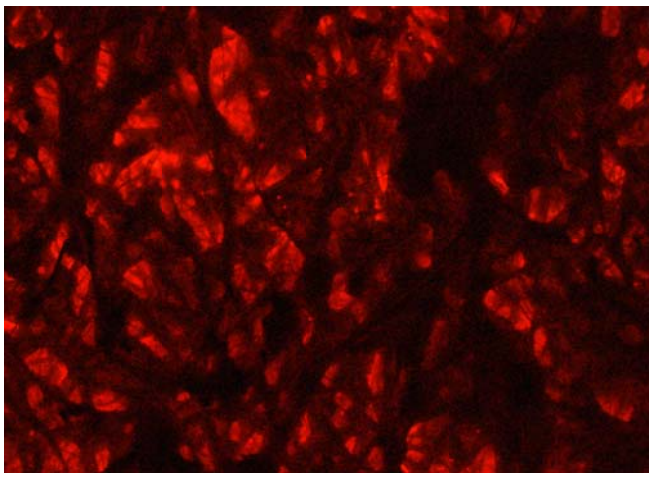


Abb. 62: PI Filtermedium 1x bestaubt und 5 mal abgereinigt

8.1.2.2 Probennahme bei der Bestimmung der Porenflächenverteilung und der Inhomogenitätskenngrößen

Bei der Bestimmung der Porenflächenverteilung und der Inhomogenitätskenngrößen von unbestaubten Ronden wird die im Kapitel 8.1.1 beschriebene und in Abb. 45 dargestellte systematische Probennahmemethode verwendet.

Bei bestaubten bzw. vorkonditionierten Filterronden werden die systematischen Probennahmepunkte aufgrund der inhomogenen Abreinigung anders angeordnet (Abb. 62). Die Abreinigungsintensität nimmt aufgrund des verwendeten Abreinigungssystems und aufgrund der flachen Einspannung der Filtermittelronde, welche eine stärkere Filtermittelauslenkung im Mittelbereich bedingt, von innen nach außen ab. Deshalb werden nicht von der gesamten Fläche Proben genommen, sondern nur vom inneren Bereich (3x3 cm im Zentrum).

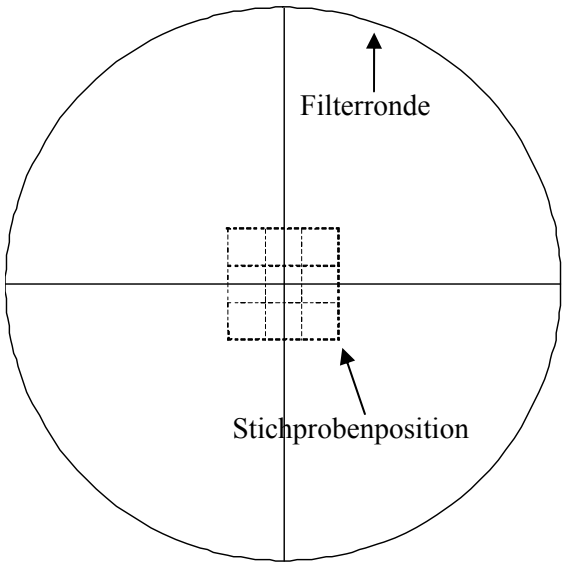


Abb. 63: Darstellung der Probennahmepositionen auf der abgereinigten Filterronde

Wie in Abb. 63 dargestellt, werden je abgereinigter Filtermittelronde 16 Bilder aufgenommen. Die Bildpositionen befinden sich an den Eckpunkten eines 1cm Rasters, wobei der Mittelpunkt des Rasers gleich dem Rondenmittelpunkt ist.

8.1.2.3 Aufnahme der Durchlichtbilder

Für die Bestimmung der Porenflächenverteilung und der Inhomogenitätskenngrößen bei bestaubten Filtermedien wurde eine kleinere Vergrößerung gewählt, da dadurch im bestaubten Zustand die Porenflächen leichter durch Ellipsen approximiert werden können [56]. Dies kann dadurch begründet werden, dass durch die kleinere Vergrößerung das an den Porenflächenrändern auftretende Rauschen den Ellipsenapproximationsprozess weniger beeinflußt. Die Abmessung eines Bild beträgt 1580 x 1144 Pixel, das entspricht 5,45 x 3,95 mm. Die Auflösung bei der gewählten Objektivvergrößerung von 2x entspricht: 1 Pixellänge ≡ 3,45 µm.
Sowohl eine Erhöhung der Belichtungszeit als auch der Lampenspannung erhöht die Intensität des durchtretenden Lichtes (Einstellung siehe Abb. 54 und Abb. 55). Da die Intensität einen

Einfluß auf das Ergebnis der Inhomogenitätsbestimmung hat, muß sie normiert werden. Zur Beurteilung der Bildschirmfarben und der Farbintensität hat sich in der Bildschirmtechnik der RGB Standard durchgesetzt. Bei der RGB Standardmethode wird jede Pixelfarbe aus einem Rot-, Grün- und Blauanteil zusammengesetzt. Die Rot-, Grün- und Blauanteile werden durch ihre Intensitäten definiert, wobei die Intensitätsskalen in der Computertechnik meist in 256 Tonwertstufen aufgeteilt sind, was einer 8 Bit Information entspricht. Die Intensitätsverteilung, welche meist als Grauwertverteilung bezeichnet wird, erstreckt sich zwischen den Grauwerten 0 und 255. Dem Tonwert 0 ist der Grauwert Schwarz zugeordnet und dem Tonwert 255 der Grauwert Weiß. Die Pixelverteilung der Standard-RGB-Grauwertskala zeigt bei Überbelichtung eine bimodale Form aufgrund der technischen Skalenobergrenze. Die Bimodalidät beeinflußt jedoch stark die Thresholdfindungsmethoden. Um alle Filtermedien in gleichwertiger Art und Weise zu belichten, muß die Überbelichtung konstant gering gehalten werden. Da die meisten untersuchten Faserarten aufgrund von Absorption und Streuung zuerst im Rotbereich eine Überbelichtung zeigen, wird die Überbelichtung im Rotauszug normiert. Dies wird erreicht indem der Rotwertpeak des Rotauszughistogramms bei Helligkeit 255 auf 0,2 bis 0,4 % der Gesamtpixelanzahl normiert wird, da in diesem Bereich die resultierende Porenanzahl und die mittlere Porenfläche nahezu konstant sind [56] (Abb. 64). Bei kleineren und größeren Überbelichtungen zeigen sich stärkere Veränderungen der Porenanzahl und der mittleren Porenfläche.

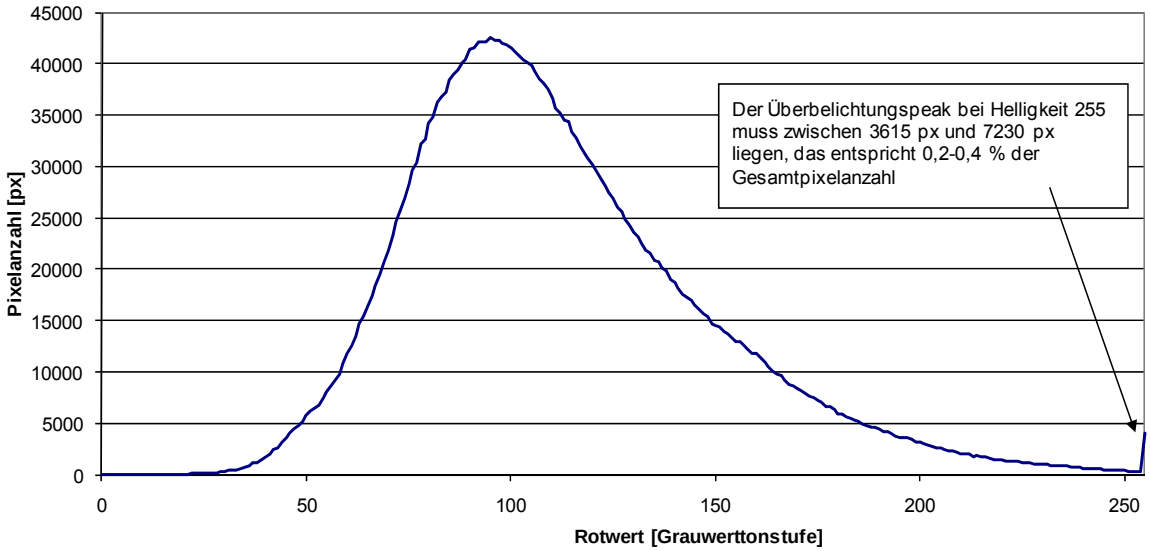


Abb. 64: Überbelichtungspeak beim Rotauszugshistogramm. Der Überbelichtungspeak wird auf 0,2 – 0,4 % der Gesamtpixelanzahl normiert.

Falls ein Nadelfilz in mehreren Farben gleichzeitig bzw. mit einer anderen Farbe zuerst überbelichtet muß jene Farbe oder jene Farben additiv betrachtet werden, welche zuerst überbelichten.
Die bisher analysierten Filtermedien zeigten immer im Rotbereich die erste Überbelichtung. Deshalb wird jeweils das Rotauszugshistogramm ermittelt und danach kontrolliert, ob die Pixelanzahl bei Helligkeit 255 innerhalb der festgelegten Grenzen zu finden ist. Falls die Pixelanzahl zu groß ist, muß die Belichtungszeit oder die Lampenspannung verringert werden um die Überbelichtung des Bildes zu erniedrigen. Falls die Pixelanzahl zu klein ist muß die Belichtungszeit oder die Lampenspannung erhöht werden.

8.1.2.4 Segmentierung der Bilder durch Fixieren eines Grauwertschwellenwerts

Um die Bilder zu segmentieren muß die RGB Information jedes Pixels in einen Grauwert umgerechnet werden. Wenn jedem Pixel ein Grauwert zugeordnet ist, kann das Bild durch das Setzten eines Grauwertschwellenwerts in Poren und Hintergrund segmentiert werden.
Die Farbbilder werden in Grauwertbilder mit (Formel 9) umgerechnet.

$$\text{Grauwert}[Gr] = \frac{\text{Rotwert} + \text{Grünwert} + \text{Blauwert}}{3} \qquad \text{(Formel 9)}$$

In der Bildanalyse ist es von großer Bedeutung einen adäquaten Graustufenschwellenwert (eng. Threshold) zu fixieren, um Objekte mit ausreichender Genauigkeit von ihrem Hintergrund zu differenzieren. Im Idealfall zeigt das Histogramm eine bimodale Funktion, deren Peaks scharf voneinander getrennt sind, dann kann der Threshold einfach am tiefsten Punkt des Minimums festgelegt werden [61]. Zumeist ist es jedoch schwierig das Minimum exakt zu definieren, vor allem wenn es sehr flach und breit ausgebildet ist und mit Rauschen überlagert ist. Des Öfteren und auch bei den hier untersuchten Bildern sind die beiden Peaks von stark unterschiedlicher Höhe, deshalb kann kein Minimum detektiert werden. Wenn die Bilder keine oder eine leicht bimodale Grauwertverteilung besitzen können die nachfolgend aufgeführten Methoden zur Thresholdfindung angewandt werden.

Einteilung der kategorisierenden Segmentier- (Threshold-) Methoden nach der durch den Algorithmus manipulierten Grundinformation [57]:

- Histogrammform basierende Methoden: Hier werden z.B. Extremwerte des Histogramms (Maxima, Minima) oder Krümmungen analysiert.

- Clustering basierende Methoden: Hier wird die Grauwertverteilung durch zwei Grauwertcluster angenähert, z.B. ein Vordergrund (Objekt)- und Hintergrundcluster. Alternativ kann die Verteilung als eine Mischung von zwei Gaussverteilungen angesehen werden.

- Entropie basierende Methoden: Entropie basierende Methoden sind Algorithmen, welche u.a. die Entropie der Vordergrund- und Hintergrundregionen verwenden. Hierbei kommen vor allem mathematische Entropiedefinitionen zur Anwendung [58, 59].

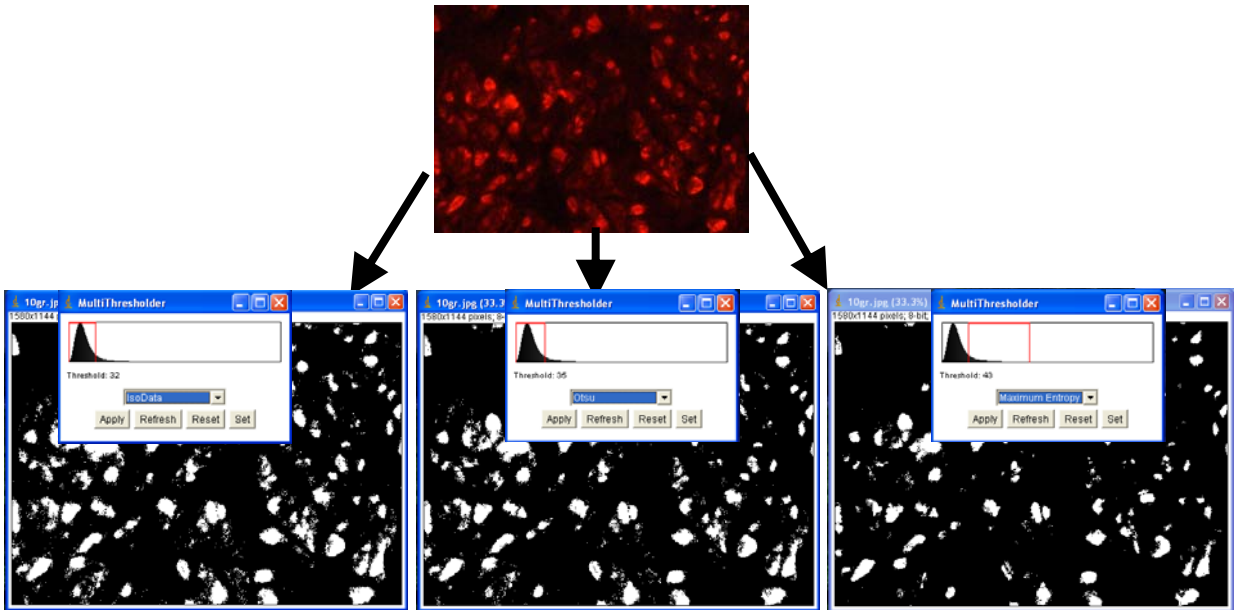
- Objekt Eigenschaft basierende Methoden: Objekt Eigenschaft basierende Methoden suchen Ähnlichkeiten zwischen dem Graustufenbild und dem Schwarzweißbild wie z.B. Kantenübereinstimmung usw..

- Räumliche Methoden: Die räumlichen Methoden verwenden z.B. Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Bildpunkte mit höherer Ordnung.

- Lokale Methoden: Lokale Methoden adaptieren den Thresholdwert für jedes Pixel zu den lokalen Bildcharakteristika.

Für die Bildanalyse wurde die als Freeware erhältliche Software „Image J“ [60] verwendet, da mithilfe von Makros die Bildauswertung für ganze Bildsätze automatisiert werden kann.

In das Programm „Image J“ sind Clustering und Entropie basierende Methoden integriert. Die beiden Clustering basierten Methoden Isodata und Otsu geben die visuell erkennbare Porenflächenverteilung besser wieder (Abb. 65) als andere o. g. Threshold Methoden. Aufgrund der deutlicher erkennbaren Porenflächen der Otsu Metode, wurde die Otsu Methode für die folgenden Untersuchungen ausgewählt [61].



Clustering Methode: Isodata [60] **Clustering Methode: Otsu [60]** **Entropie Methode: Maximum Entropy [60]**

Abb. 65: Darstellung der visuellen Thresholdsetzungsergebnisse nach verschiedenen Methoden mit dem Programm Image J [62, 61]

Erklärung der Otsu Methode [61]

Die Bildpunkte (pixel) eines Bildes werden in 256 Graustufen (0-255) nach der sRGB Methode aufgeteilt. Die Pixelanzahl in Klasse i wird mit dem Symbol n_i bezeichnet, und die Gesamtanzahl N berechnet sich nach (Formel 10).

$$N = \sum_{0}^{255} n_i \qquad \text{(Formel 10)}$$

Die Graustufenverteilung (Histogramm) wird zwecks besserer Diskutierbarkeit normalisiert:

$$p_i = \frac{n_i}{N} \qquad \text{(Formel 11)}$$

Nun werden die Pixel in zwei Klassen C_0 und C_1 durch den Schwellenwert k segmentiert. Die maximale Grauwertstufe, in unserem Fall 255 wird mit L bezeichnet.
Die Klassenwahrscheinlichkeiten ω_0, ω_1 werden mit Formel 12 und Formel 13 berechnet.

$$\omega_0 = \sum_{i=1}^{k} p_i \qquad \text{(Formel 12)}$$

$$\omega_1 = \sum_{i=k+1}^{L} p_i = 1 - \omega_0$$ (Formel 13)

Die Klassenmittelwerte werden mit Formel 14 und Formel 15 berechnet.

$$\mu_0 = \sum_{i=0}^{k} \frac{i \cdot p_i}{\omega_0}$$ (Formel 14)

$$\mu_1 = \sum_{i=k+1}^{L} \frac{i \cdot p_i}{\omega_1}$$ (Formel 15)

Der Gesamtmittelwert der Verteilung wird mit Formel 16 berechnet.

$$\mu_T = \sum_{i=0}^{L} i \cdot p_i$$ (Formel 16)

Es gilt für jedes k:

$$\omega_0 \cdot \mu_0 + \omega_1 \cdot \mu_1 = \mu_T$$ (Formel 17)

$$\omega_0 + \omega_1 = 1$$ (Formel 18)

Die Klassenvarianzen innerhalb der zwei Klassen werden mit Formel 19 (Klasse 1), Formel 20 (Klasse 2) berechnet.

$$\sigma_0^2 = \sum_{i=1}^{k} (i - \mu_0)^2 \cdot \frac{p_i}{\omega_0}$$ (Formel 19)

$$\sigma_1^2 = \sum_{i=k+1}^{L} (i - \mu_1)^2 \cdot \frac{p_i}{\omega_1}$$ (Formel 20)

Weiters kann die Varianz innerhalb der Klassen σ_W^2 und die Varianz zwischen den Klassen σ_B^2 berechnet werden.

$$\sigma_W^2 = \omega_0 \cdot \sigma_0^2 + \omega_1 \cdot \sigma_1^2$$ (Formel 21)

$$\sigma_B^2 = \omega_0 \cdot (\mu_0 - \mu_T)^2 + \omega_1 \cdot (\mu_1 - \mu_T)^2$$ (Formel 22)

Die Gesamtvarianz σ_T^2 kann mit Formel 23 berechnet werden.

$$\sigma_T^2 = \sum_{i=1}^{L} (i - \mu_T)^2 \cdot p_i$$ (Formel 23)

Es gilt die folgende Beziehung:

$$\sigma_W^2 + \sigma_B^2 = \sigma_T^2$$ (Formel 24)

σ_W^2 und σ_B^2 sind Funktionen des Thresholdwertes k, σ_T^2 ist jedoch unabhängig von k. Es wird nun jener Wert von k gesucht für den gilt:

$\sigma_B^2 \rightarrow \max$

$\sigma_W^2 \rightarrow \min$

Jener Wert von k der die angegebenen Forderungen am besten erfüllt, ist der gesuchte Thresholdwert.

8.1.2.5 Bestimmung der Porenflächenverteilung und der Inhomogenitätskenngrößen

Die Inhomogenität, der über das Filtermedium verteilten Poren, spielt eine wichtige Rolle bei der Partikelpenetration von der Rohgas- zur Reingasseite des Filtermediums und beeinflußt darüber hinaus entscheidend das Druckverlustverhalten. Für Tiefenfilter gilt beispielsweise, dass sich bei steigender Inhomogenität die Partikelpenetration erhöht; hingegen erniedrigt sich der Druckverlust [63]. Die inhomogenitätscharakterisierende Größe INH [64,65,66,67] kann nach Formel 25 entweder als Quotient der Druckverluste (bei gleicher Filtrationsgeschwindigkeit) oder als Quotient der Filtrationsgeschwindigkeiten (bei gleichem Druckverlust) berechnet werden. Weiters wird das Thema Inhomogenität in der Filtration von folgenden Literaturstellen behandelt [68,69, ,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81]

$$INH = \Delta p_{hom}/\Delta p_{inhom}$$
$$INH = v_{inhom}/v_{hom} \qquad \text{(Formel 25)}$$

Symbolik:

INH ..... Inhomogenitätskoeffizient

$v_{in\,hom}$ ..... mittlere Filtrationsgeschwindigkeit des inhomogenen Filtermediums[m/s]

v_{hom} ..... mittlere Filtrationsgeschwindigkeit des homogenen Filtermediums [m/s]

Δp_{hom} ..... Druckverlust des homogenen Filtermediums [Pa]

$\Delta p_{in\,hom}$ ..... Druckverlust des inhomogenen Filtermediums [Pa]

Lajos [64] konnte mittels Simulation beweisen, dass das Verhältnis der Filtrationsgeschwindigkeiten von der relativen Standardabweichung $\frac{\sigma}{\bar{\alpha}}$ der Packungsdichte und der mittleren Packungsdichte $\bar{\alpha}$ des Filtermediums abhängt (Abb. 66).

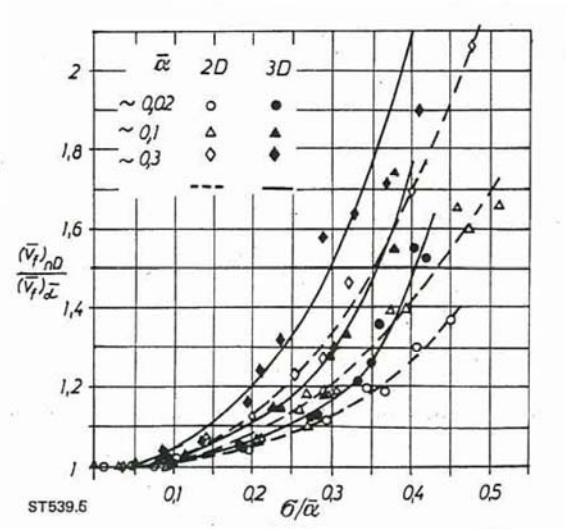


Abb. 66: Abhängigkeit des Inhomogenitätskoeffizienten von der relativen Standardabweichung der Packungsdichte und der mittleren Packungsdichte

Symbolik:

$\frac{(\bar{v}_f)_{nD}}{(\bar{v}_f)_{\bar{\alpha}}}$ ..... Verhältnis der mittleren Geschwindigkeiten bei inhomogener zu homogener Packungsdichteverteilung

Bewertet man die kontinuierliche Verstopfung unterhalb der Filtermedienoberfläche bei zunehmender Anzahl von Abreinigungszyklen als eine Art Tiefenfiltrationsmechanismus, liegt der Schluß nahe, dass die Inhomogenität der oberflächennahen Schicht von Abreinigungsfiltermedien einen großen Einfluß auf das Filtrationsverhalten besitzt. Die Strukturinhomogenität von Nadelfilzen kann z.B. anhand der Porenflächenverteilungen abgeschätzt werden.

Durchführung der Porenflächenverteilungs- und Inhomogenitätsbestimmung

Mit Hilfe des Programms „ImageJ“ wird jedes Bild des Bildersatzes in ein Graustufenbild umgewandelt, dann wird ein Threshold mithilfe der Otsu Methode ermittelt und angewendet. Die im resultierenden binarisierten Bild ersichtlichen Porenflächen werden durch Ellipsenflächen angenähert. Mit der Programmfunktion „Analyse Particles“ wird die Ellipsenapproximation durchgeführt (Abb. 67, Abb. 68).

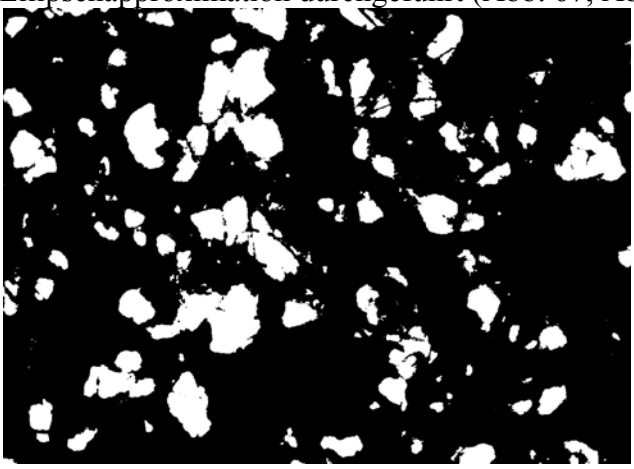


Abb. 67: Binärbild

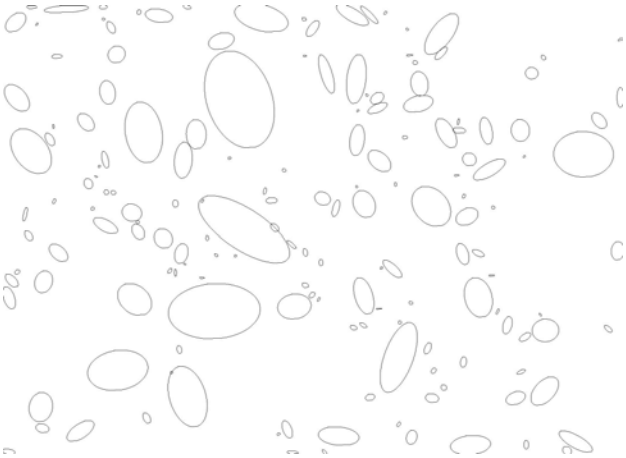


Abb. 68: Grafische Veranschaulichung des Ergebnisses der Ellipsenapproximation

Um die Bildanalysevorgänge zu automatisieren wurde ein Macro verfaßt, welches die beschriebenen Vorgänge automatisiert durchführt und die Ergebnisse als Datenfiles abspeichert (siehe Makro 2).

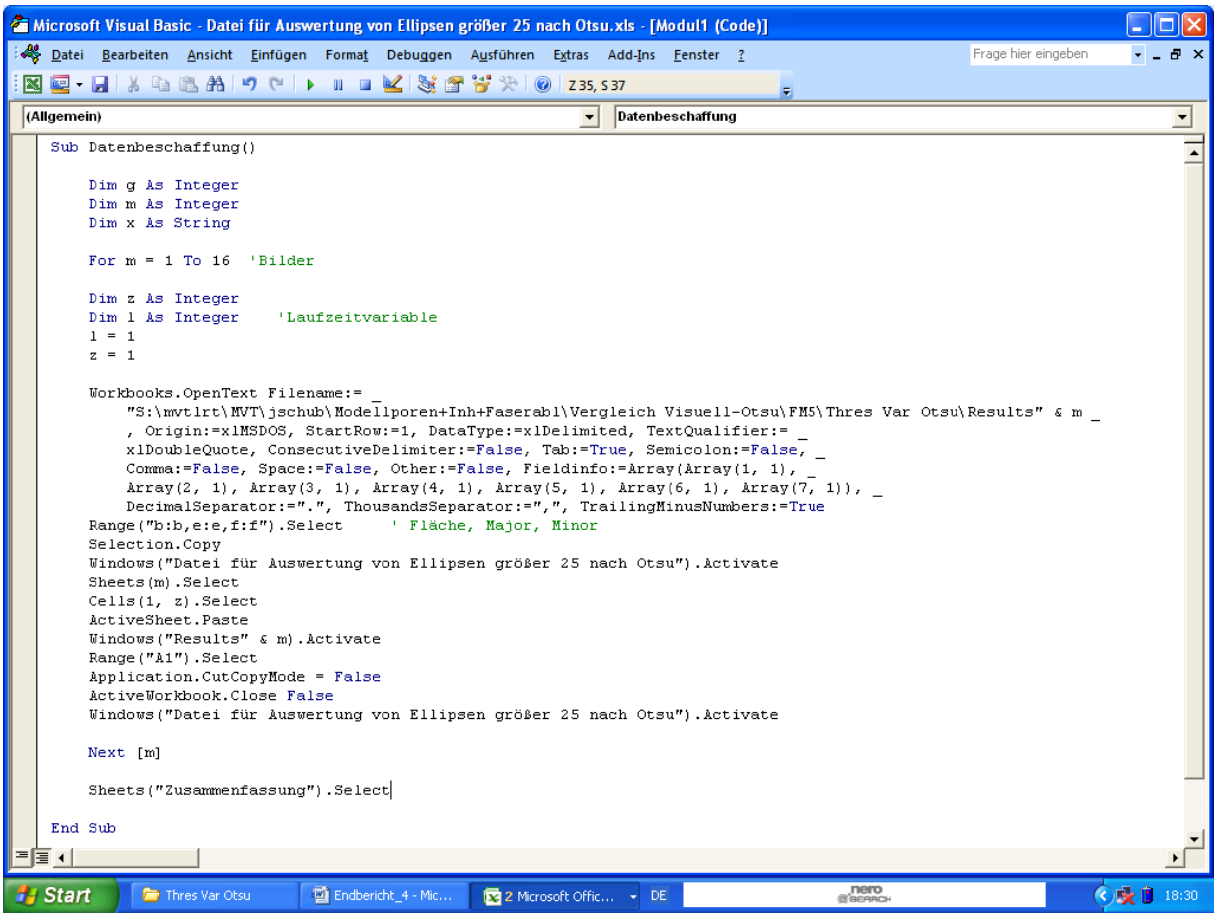
Macro TreshVar - Editor

Datei Bearbeiten Format Ansicht ?

```
for(m=1; m<17; m++) {
open("S:\\mvtlrt\\MVT\\jschub\\Modellporen+Inh+Faserabl\\wF\\B\\OP+Inh\\TV"+m+".jpg");
run("8-bit");
f=0;
run("MultiThresholder", "Otsu");
run("MultiThresholder", "Otsu apply");
run("Invert");
run("Set Measurements...", "area mean perimeter fit redirect=None decimal=2");
run("Analyze Particles...", "size="+f+"-Infinity circularity=0.0-1.00 show=Nothing display clear");
saveAs("Measurements", "S:\\mvtlrt\\MVT\\jschub\\Modellporen+Inh+Faserabl\\Binnig BWF\\B\\OP+Inh\\Results"+m);
close();
```

Makro 2: Makro zur Analyse der Porenverteilung

Nach der Porenanalyse gibt der Computer Daten files aus, in welchen für jede Pore die Fläche des Porenmundes und die Abmessung der Hauptachse und der Nebenachse der Ellipse aufgelistet sind. Diese Daten files werden mithilfe eines Excel Macros in ein vorgefertigtes Excel file importiert (Siehe Makro 3).



Makro 3: Makro zum Importieren der Bildanalysedaten in Excel files

Aus den Abmessungen der Hauptachsen und der Nebenachsen (siehe Abb. 69) wird der Ellipsenumfang berechnet, welcher zur Berechnung des hydraulischen Durchmessers (Formel 27) benötigt wird. Mit Hilfe einer Reihenentwicklung kann der Umfang der Ellipse berechnet werden. Als gute Näherung für die Berechnung des Ellipsenumfangs mit einem Fehler kleiner $4 \cdot 10^{-4}$ im Vergleich zum Ergebnis der Reihenentwicklung wird Formel 26 verwendet.

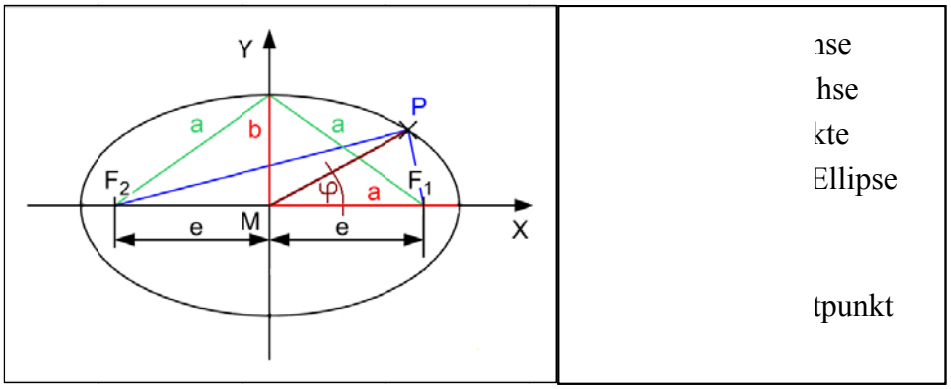


Abb. 69: Symbolschlüssel zur Berechnung des Ellipsenumfangs aus Haupt- und Nebenachse

$$U = \pi \cdot (a+b) \cdot \left(1 + \frac{3 \cdot \lambda^2}{10 + \sqrt{4 - 3 \cdot \lambda^2}}\right) \quad \text{mit} \quad \lambda = \frac{a-b}{a+b} \qquad \text{(Formel 26)}$$

Symbolik:
a_____Hauptachse

b ..... Nebenachse
U ..... Umfang

Mit Hilfe folgender Formeln werden nun für jede Ellipse die folgenden Einzelporenkenngrößen ermittelt:

Hydraulischer Durchmesser der Einzelpore:

$$d_{h,i} = \frac{4 \cdot A_i}{U_i} \qquad \text{(Formel 27)}$$

Symbolik:

$d_{h,i}$ ..... hydraulischer Durchmesser der i-ten Einzelpore
A_i ..... Ellipsenfläche der i-ten Pore
U_i ..... Umfang der i-ten Pore

Hydraulische Einzelporenfläche :

$$A_{h,i} = \frac{{d_{h,i}}^2 \cdot \pi}{4} = \left(\frac{4 \cdot A_i}{U_i} \right)^2 \cdot \frac{\pi}{4} \qquad \text{(Formel 28)}$$

Unterschiede in den Porenflächenverteilungen können durch die Flächenverteilungsdichtefunktion $q_2\left(d_{h,Klasse,i}\right)$ beschrieben werden, welche nach Formel 29 ermittelt wird.

$$q_2\left(d_{h,Klasse,i}\right) = \frac{\frac{\bar{d}^2_{h,Klasse,i} \cdot \pi}{4} \cdot n_{Klasse,i}}{\Delta d_{h,Klasse} \cdot \sum_{Klasse,i} \frac{\bar{d}^2_{h,Klasse,i} \cdot \pi}{4} \cdot n_{Klasse,i}} \qquad \text{(Formel 29)}$$

Symbolik:

$\bar{d}^2_{h,Klasse,i}$ ..... Mittlerer hydraulischer Durchmesser der Klasse i
$n_{Klasse,i}$ ..... Porenanzahl in der hydraulischen Durchmesser Klasse i
$\Delta d_{h,Klasse,i}$ ..... Klassenbreite der hydraulischen Durchmesserklasse i

Aus den Einzelporenkenngrößen werden folgende Kollektivkenngrößen errechnet:

Hydraulische Oberflächenporosität:

$$\varepsilon_h = \frac{\sum_{i=1}^{N_{tot}} A_{h,i}}{A_{Bild}} \qquad \text{(Formel 30)}$$

Symbolik:

ε_h ..... hydraulische Oberflächenporosität

A_{Bild} ..... Bildfläche
$A_{h,i}$ ..... hydraulische Porenfläche der i-ten Pore

Mittlerer Porenflächenanteil der Einzelporen ($\varepsilon_{h,i}$):

$$\varepsilon_{h,i} = \frac{\varepsilon_h}{N_{tot}} = \frac{1}{N_{tot}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{tot}} \frac{A_{h,i}}{A_{Bild}} \qquad \text{(Formel 31)}$$

Standardabweichung des Porenflächenanteils:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N_{tot} - 1} \cdot \sum_{i=1}^{N_{tot}} \left(\frac{A_{h,i}}{A_{Bild}} - \frac{\varepsilon_h}{N_{tot}} \right)^2} \qquad \text{(Formel 32)}$$

Symbolik:
s ..... Standardabweichung des Porenflächenanteils
N_{tot} ..... Gesamtanzahl der Poren

Relative Standardabweichung (RSD):

$$RSD = \frac{s \cdot N_{tot}}{\varepsilon_h} \qquad \text{(Formel 33)}$$

Die Berechnung der $q_2(d_h)$-Verteilung mithilfe der bildanalytischen Messwerte kann im Berechnungsbeispiel 2 nachvollzogen werden.

- Berechnungsbeispiel 2: Berechnung der $q_2(d_h)$-Verteilung

Aufgabenstellung: Von 6 ausgewerteten Poren wurden die Flächen, die Ellipsenhauptachsen und die Ellipsennebenachsen ermittelt (Angaben Tab. 20). Es soll daraus die $q_2(d_h)$-Verteilung berechnet werden. Umrechnungsfaktor: 1 Pixellänge = 3,45 µm.

Porennummer	Fläche [px]	Hauptachse [px]	Nebenachse [px]
1	30	20	5
2	60	25	15
3	63	26	13
4	150	25	22
5	200	30	15
6	40	18	3,2

Tab. 20: Abmessungen von 6 ausgewerteten Poren

Mithilfe von Formel 26, Formel 27 und Formel 28 wird der Ellipsenumfang, der hydraulische Durchmesser und die hydraulische Porenfläche berechnet (Tab. 21).

Porennummer	d_h [µm]	A_h [µm^2]
1	9,7	73
2	13,0	132
3	13,8	150
4	28,0	616
5	38,0	1133
6	14,7	170

Tab. 21: Hydraulischer Durchmesser und hydraulische Porenfläche

Die berechneten d_h-Werte werden in 10 µm Klassen eingeteilt (Tab. 22) und es wird mit Formel 29 die $q_2(d_h)$-Verteilung berechnet, welche in Abb. 70 dargestellt ist.

d_h Klasse	Porenanzahl pro Klasse [ ]	$Q_2(d_h)*A_{h,ges}$ [µm2]	$Q_2(d_h)$ [ ]	$q_2(d_h)$ [μm^{-1}]
10	1	73	0,03	0,0032
20	3	525	0,23	0,0199
30	1	1141	0,50	0,0271
40	1	2275	1,00	0,0498
50	0	2275	1,00	0

Tab. 22: Berechnung der $q_2(d_h)$-Verteilung

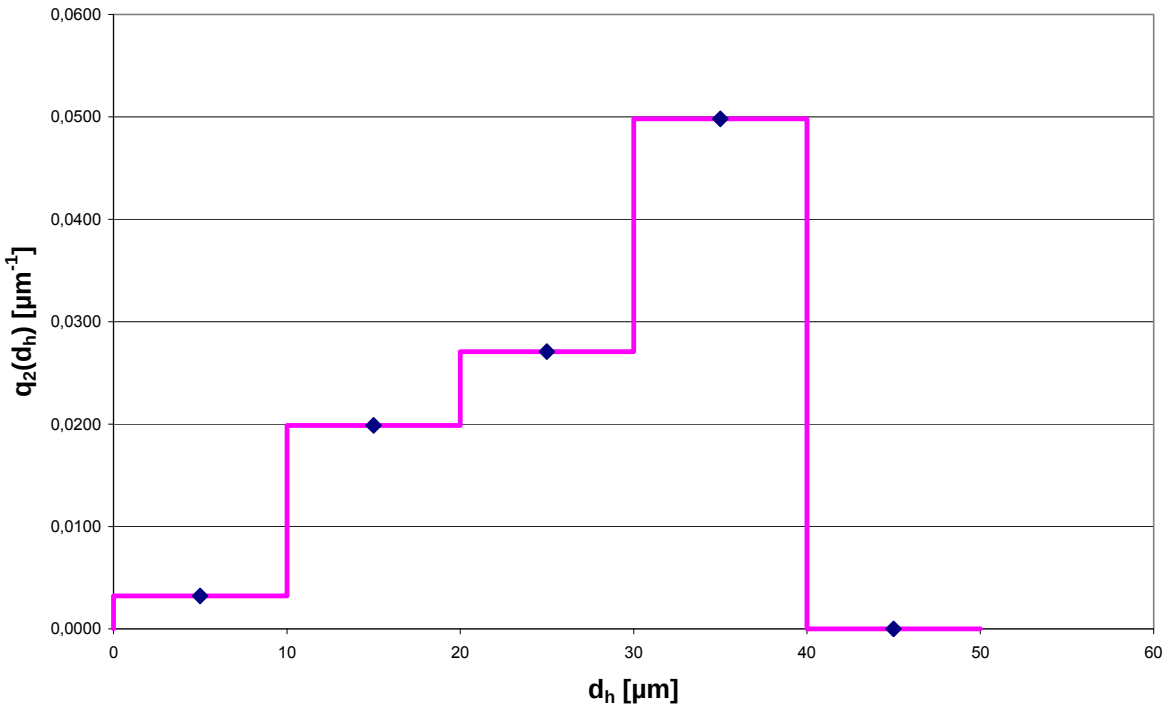


Abb. 70: Verteilungsdichte - Funktion des hydraulischen Durchmessers

8.1.3 Oberflächenporositätsbestimmung

Die Oberflächenporosität ist definiert als der Quotient aus der Summe aller Porenflächen und der Bildfläche des untersuchten Nadelfilzes (Abb. 71). Die Fokusebene wird in jene Ebene gelegt in der die Auflösung des Bildes am besten ist. Ein Nadelfilz ist kein symmetrisches Gebilde und die Oberfläche weist eine aus dem Herstellungsprozess resultierende unregelmäßige Struktur auf. Mit Hilfe eines Bildes kann aber nur ein Ausschnitt mit einer Fläche von einigen Quadratmillimetern der Oberfläche eines Nadelfilzes erfaßt werden, deshalb werden 16 Bilder mit der in Abb. 45 beschriebenen Probennahmemethode aufgenommen. Für die Oberflächenprositätsbestimmung werden die Bilder nicht unter Auflichtbeleuchtung sondern unter Durchlichtbeleuchtung aufgenommen. Es wird die Durchlichtbeleuchtung verwendet, da die Unterschiede zwischen Poren und Umgebung im Durchlicht besser erkannt werden können. Mithilfe einer visuellen Segmentierung oder eines Segmentierungsalgorithmus nach Otsu (Siehe Kapitel 8.1.2.5, Seite 69) werden die Bilder in Poren und Hintergrund aufgeteilt (Abb. 65, Abb. 71). Mithilfe von Formel 35 und Formel 36 wird die durchschnittliche Oberflächenporosität des Bildersatzes errechnet. Zur automatisierten Oberflächenporositäts - Bestimmung mittels Otsu - Methode wird Makro 4 verwendet.

Makro Porositätsbestimmung - Editor

Datei Bearbeiten Format Ansicht ?

```
for(m=1; m<17; m++) {
open("S:\\mvtlrt\\MVT\\jschub\\Modellporen+Inh+Faserabl\\Binnig BWF\\B\\OP+Inh\\Tv"+m+".jpg");
run("8-bit");
run("MultiThresholder", "Otsu");
run("MultiThresholder", "Otsu apply");
run("Invert");
run("Set Measurements...", "area mean perimeter fit redirect=None decimal=2");
run("Analyze Particles...", "size=0-Infinity circularity=0.00-1.00 show=Nothing display clear summarize");
}
close();
```

Makro 4: Automatisierte Bestimmung der Oberflächenporosität mithilfe des Programms Image J

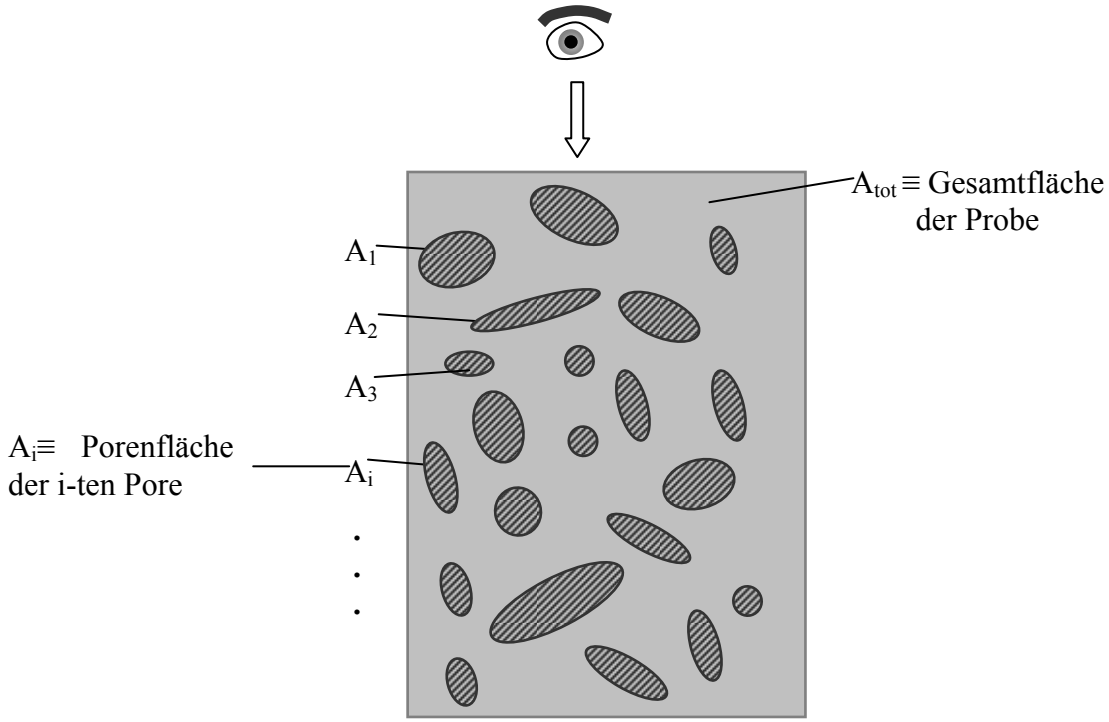


Abb. 71: Schematische Darstellung der Oberflächenporositätsermittlung

Die Gesamtporenfläche errechnet sich nach:

$$A_{p,tot} = \sum_{i=1}^{N_{tot}} A_i \qquad \text{(Formel 34)}$$

Symbolik:

$A_{p,tot}$ ..... Gesamtporenfläche [µm^2]
i ..... Porennummer [ ]
N_{tot} ..... Gesamtanzahl der Poren [ ]
A_i ..... Porenfläche der i-ten Pore [µm^2]

Die Oberflächenporosität E_0 eines Bildes ist definiert als:

$$E_{0,k} = \frac{A_{p,tot}}{A_{tot}} \qquad \text{(Formel 35)}$$

Symbolik:

$E_{0,k}$ ..... Oberflächenporosität des k-ten Bildes [ ]

$A_{p,tot}$ ..... Gesamtporenfläche [µm^2]
A_{tot} ..... Bildfläche [µm^2]

Die durchschnittliche Oberflächenporosität wird berechnet durch Mittelwertbildung der Oberflächenporositäten der Einzelbilder:

$$E_0 = \frac{\sum_{k=0}^{k=m} E_{o,k}}{m} \qquad \text{(Formel 36)}$$

m ..... Anzahl der Bilder
E_0 ..... durchschnittliche Oberflächenporosität
$E_{0,k}$ ..... Oberflächenporosität des k-ten Bildes

8.1.4 Modellpore

Die Modellpore wurde entwickelt, um aus der zweidimensionalen Information der Oberflächenporosität und der eindimensionalen Information der Porentiefenverteilung eine modellhafte dreidimensionale Information zu generieren. Die Form und Größe der Modellpore wird verwendet zur Abschätzung der Reststaubmasse nach der Abreinigung [38, 49]. Dafür wird auf der y-Achse die Porentiefe (hp) aufgetragen und auf der x-Achse das Produkt aus Oberflächenporosität und Porentiefensumme (siehe Abb. 72).

$$E'_0(hp_i) = Q_0(hp_i) \cdot E_0 \qquad \text{(Formel 37)}$$

Symbolik:
$E'_0(hp_i)$ ..... einsehbare Flächenporosität in der Tiefe hp_i [ ]
$Q_0(hp_i)$ ..... Verteilungssumme der Porentiefenverteilung in der Tiefe hp_i [ ]
E_0 ..... durchschnittliche Oberflächenporosität [ ]

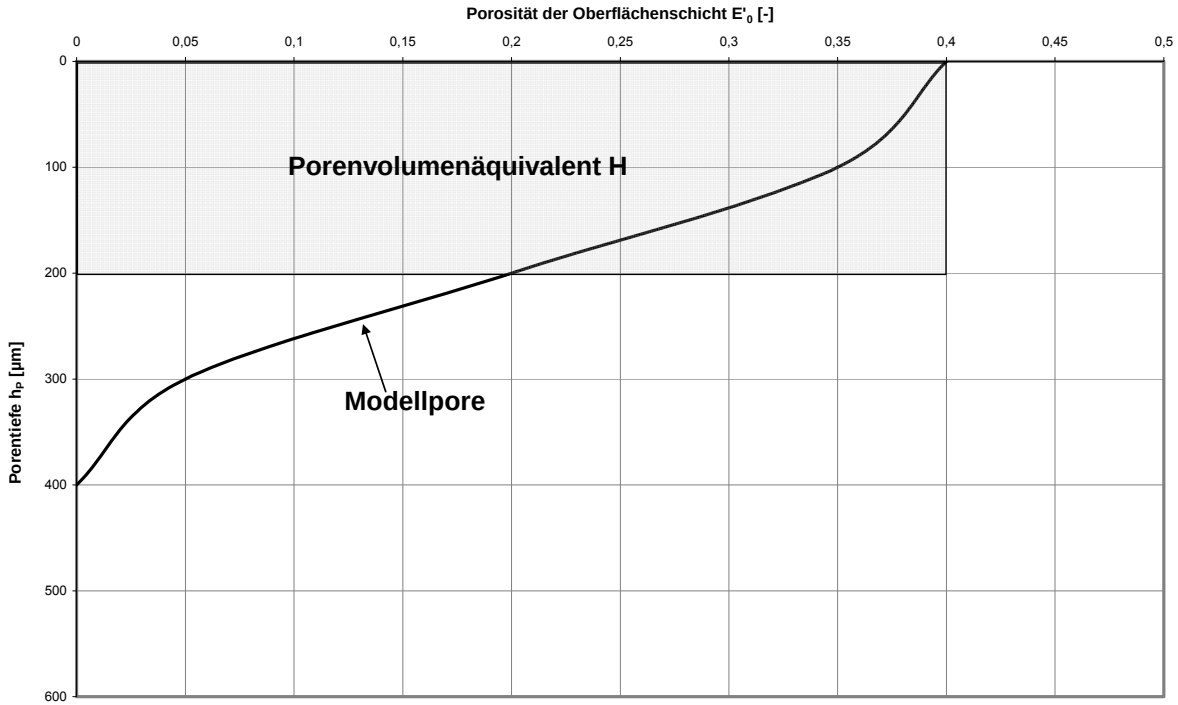


Abb. 72: Darstellung der Modellpore bzw. des Porenvolumenäquivalents H

In Abb. 72 wurde ebenfalls die Fläche des Porenvolumenäquivalents H als rechteckige Fläche mit grauem Hintergrund eingezeichnet. Das Porenvolumenäquivalent gibt das Volumen der Modellpore wieder und wird mit Formel 38 berechnet.

$$H = \int_{hp=0}^{hp=hp_{max}} E_0 \cdot Q_0(hp_i) \cdot dhp = E_0 \cdot hp_{50,0} \qquad \text{(Formel 38)}$$

Symbolik:

$hp_{50,0}$ ..... Medianwert der Porentiefenverteilung [µm]
dhp ..... infinitesimale Änderung der Porentiefe [µm]
hp=0, hp_{max} ..... Tiefe der Poren
H ..... Porenvolumenäquivalent

Die Vergleichspore wird an der Ordinate gespiegelt dargestellt, damit die Form und Größe leichter erkannt werden kann, bzw. mehr Ähnlichkeit mit einer reellen Pore besteht (Abb. 73).

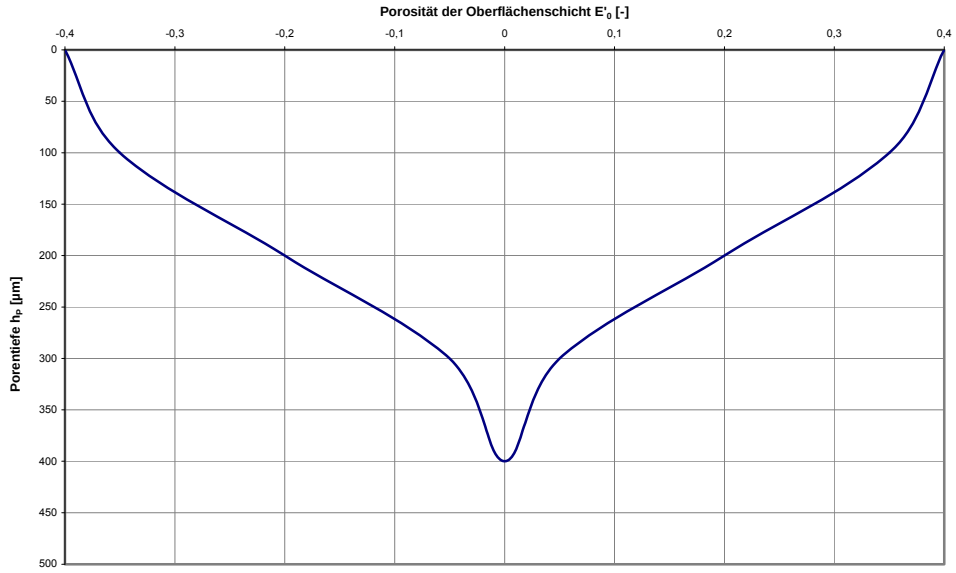


Abb. 73: Darstellung der an der Ordinate gespiegelten Modellpore

Das Porenvolumenäquivalent H eines Nadelfilzes wird in der Literatur mit der Reststaubmasse korreliert, es konnte unter bestimmten Versuchsbedingungen eine lineare Tendenz festgestellt werden [28, 29, 30].

9 Ergebnisse der Alterungsversuche und deren Interpretation mit Hilfe der Ergebnisse der Bildanalyse

9.1 Alterungsversuche und Interpretation der Ergebnisse

9.1.1 Ergebnis einer Filtermittelprüfung nach ISO Normentwurf

Es wurde vorerst, basierend auf dem Normentwurf ISO/CD 11057 [7], nach einer Vorkonditionierung mit 30 Zyklen (Abreinigungsdruck 1000 Pa) an der VDI 3926 Typ 2 Apparatur, ein Alterungstestlauf an der neuen Alterungskammer mit 2500 Zyklen und 20 s Zykluszeit sowie mit einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2 m/min durchgeführt. Danach wurden nach einer 10 Zyklen dauernden Beruhigungsphase wiederum 100 Zyklen an der VDI

3926 Typ 2 Apparatur (Abreinigungsdruck 1000 Pa) gefahren. Als Filtermedium wurden PI-Nadelfilze verwendet. In Abb. 74 und Abb. 75 sind Druckverlustverläufe während der Filtermittelprüfung beispielhaft dargestellt.

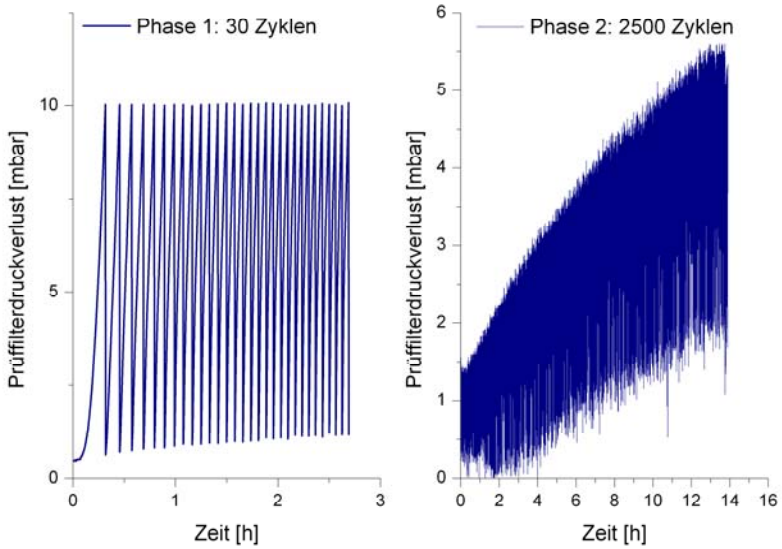


Abb. 74: Druckverlustverlauf während der ersten beiden Phasen einer Filterprüfung nach ISO/CD 11057 Normentwurf

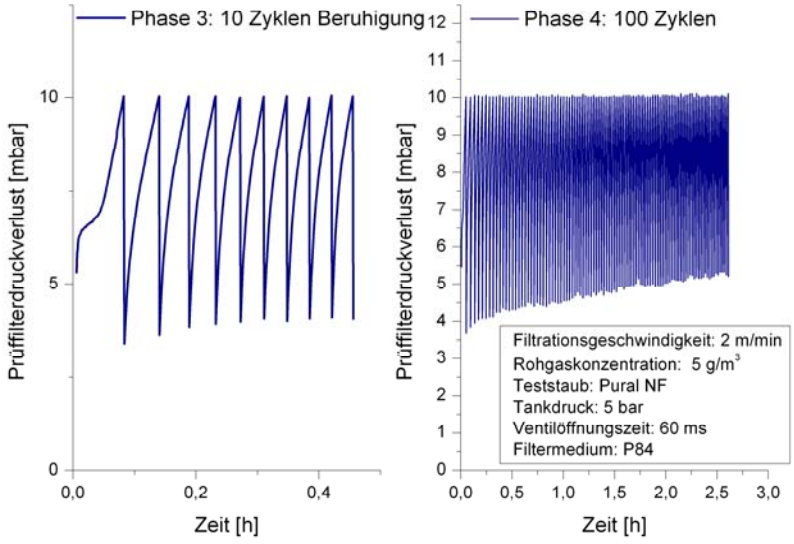


Abb. 75: Druckverluste während der Phase 3 und 4 der Filterprüfung nach ISO/CD 11057 Normentwurf [7]

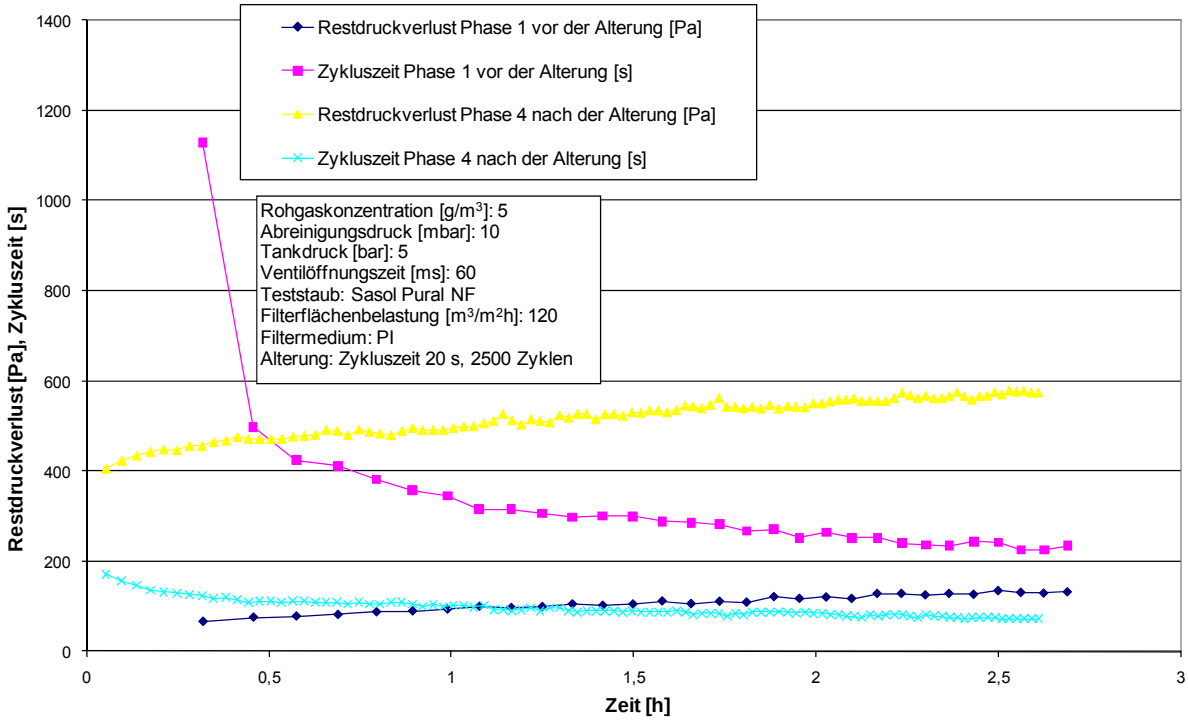


Abb. 76: Nach ISO/CD 11057 Normentwurf durchgeführter Test für Abreinigungsfilter. Darstellung des Restdruckverlustes und der Zykluszeit während der Phasen 1 und 4 der Filterprüfung.

In Abb. 76 sind der Restdruckverlust und die Zykluszeit während der Vorkonditionierung und nach der Alterung dargestellt. Es ist ersichtlich, dass nach den vorgeschlagenen 30 Zyklen nach der Alterung, sowie auch nach 100 Zyklen kein ausreichend stationärer Zustand erreicht werden konnte. Untersuchungen von anderen Filterprüfinstituten zeigen ein ähnliches Ergebnis (siehe Abb. 16 und Abb. 17). Aufgrund der erhaltenen Ergebnisse soll die Alterungsprozedur im Hinblick auf das Erreichen eines quasistationären Zustands näher untersucht werden.

9.1.2 Detaillierte Untersuchung des Alterungsdruckverlustverlaufs

Druckverlustmessungen während der Alterung, die jeweils in Abständen von 3 Sekunden aufgezeichnet wurden, zeigen, dass während der Alterung, nach 2500 Zyklen die obere und untere Druckgrenze weiter im Anstieg begriffen ist (siehe Abb. 77).

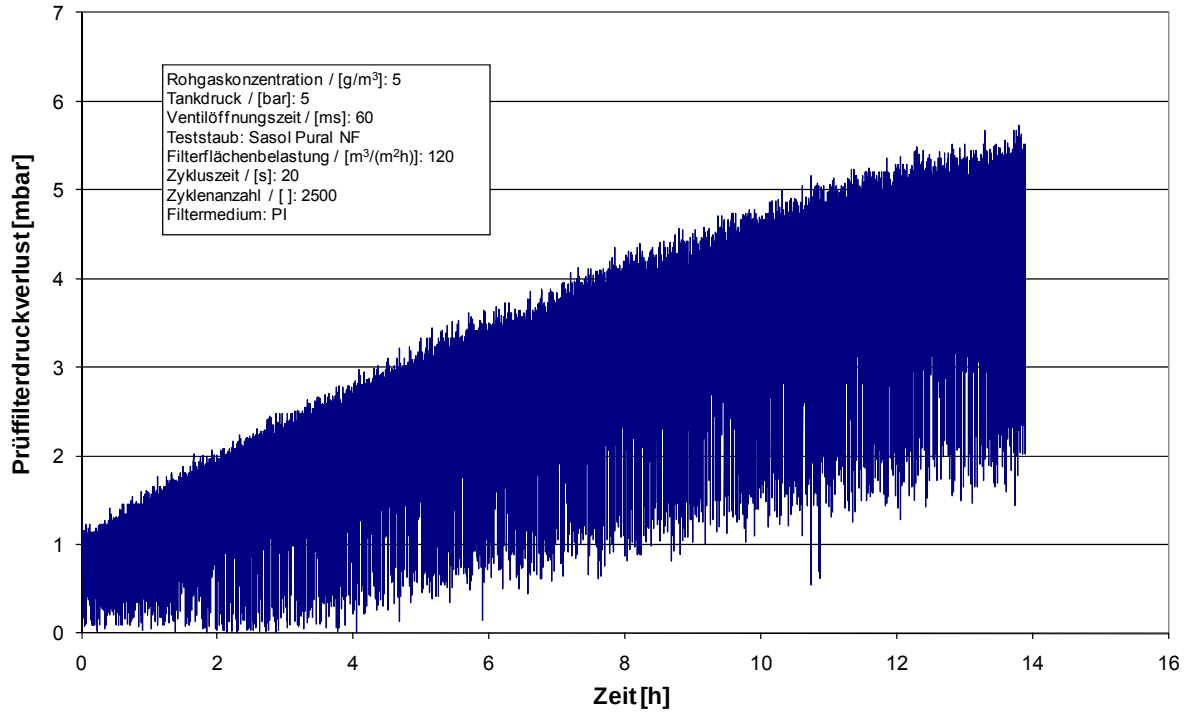


Abb. 77: Druckverlustverlauf während der Alterung (Prozedur und Parameter nach ISO Normentwurf [7]

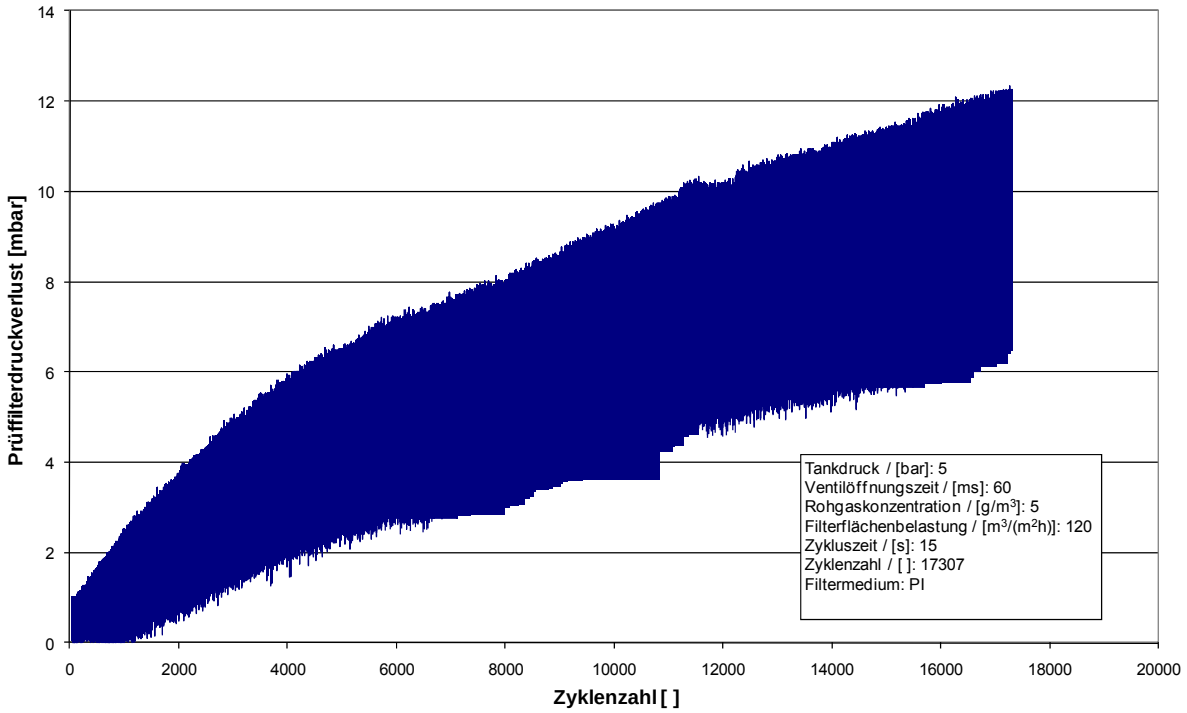


Abb. 78: Alterungsverlauf mit mehr als 17.000 Zyklen (Vorkonditionierung nach ISO Normentwurf)

Ein Alterungsverlauf mit 15 Sekunden Zykluszeit und einer Zyklenanzahl von mehr als 17.000 (Abb. 78) zeigte, dass selbst nach einer langen Alterungszeit von ca. 70 Stunden keine Stationarität des Druckverlustverhaltens absehbar ist.
Um zu sehen wohin die Alterung hinsichtlich der Druckverlustentwicklung und der Verstopfung schlußendlich führen kann, wurde der Alterungsprozess beschleunigt, indem für den nächsten Test eine etwas höhere Filtrationsgeschwindigkeit von 2,5 m/min anstelle von 2

m/min und eine vergleichsweise hohe Zykluszeit von 100 s anstelle von 15 s gewählt wurde (Abb. 79). Weiters wurde eine Rohgaskonzentration von 5,5 g/m^3 anstatt von 5 g/m^3 verwendet.

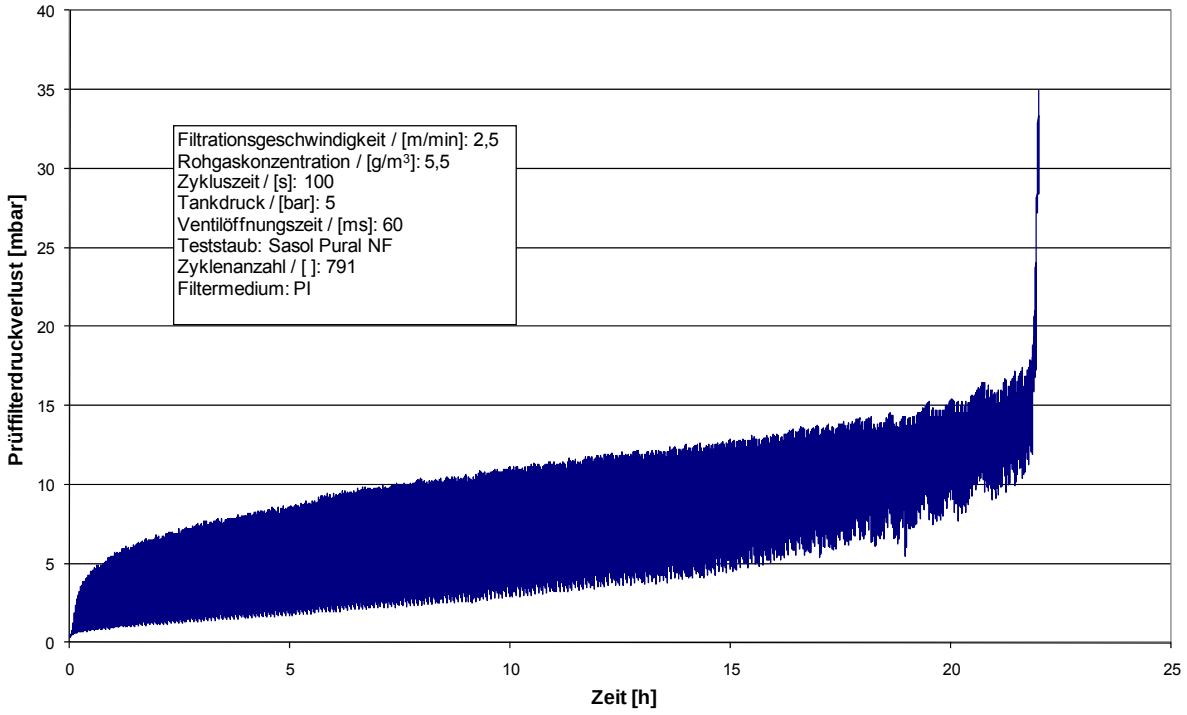


Abb. 79: Alterungsverlauf bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2,5 m/min, einer Zykluszeit von 100 s und einer Rohgaskonzentration von 5,5 g/m^3

Bei dem in Abb. 79 dargestellten Alterungsdruckverlustverlauf wurde auf die anfängliche Konditionierphase verzichtet. Es zeigte sich, dass die Druckverlustgrenzen, anfangs stark ansteigen, da der Staub durch Tiefenfiltration im Inneren des anfänglich unbestaubten Filtermediums eingelagert wird. Danach gehen diese Druckgrenzen in einen moderaten Anstieg über, da die Tiefenfiltration von einer Oberflächen- bzw. Kuchenfiltration abgelöst wird und die anfiltrierten Staubmassen vermehrt durch die Abreinigung entfernt werden. Nach einer Zeit von ca. 22 Stunden zeigt sich im Druckverlust plötzlich ein extremer Anstieg, der schlußendlich in einer vollständigen Filtermedienverstopfung endet. Die untere Druckgrenze, hier als Restdruckverlust bezeichnet, als auch die obere Druckgrenze zeigen insgesamt einen „S“-förmigen Verlauf.
Betrachtet man den Gesamtdruck jeweils knapp vor der Abreinigung (Restdruckverlust zuzüglich Druckabfall über der Zykluszeit) über die steigenden Zyklenzahlen, so wächst dieser anfangs vergleichsweise stark an. Die Ursache dafür ist, dass die Partikelabscheidung mit zunehmenden Zyklenzahlen nach dem Übergang von der Tiefenfiltration zur Oberflächenfiltration einen im Inneren des Filtermediums stattfindenden „patchy-cleaning“-ähnlichen Abscheidemechanismus aufweist. Zuvor, während der Tiefenfiltrationsphase, hat die Form des Druckverlaufes innerhalb der Zykluszeit (siehe Abb. 80 a) zu Beginn einen konkaven Verlauf, so dass der über der Zykluszeit erfolgte Druckanstieg gering bleibt. Später, im Bereich der „patchy-cleaning“ Phase bilden sich jeweils nach der Abreinigung im Inneren des Filtermediums inhomogene Staubablagerungen (manchmal kanalartige poröse Strukturen) aus, die über die Filterfläche gesehen, örtlich unterschiedliche Filtrationsgeschwindigkeiten zur Folge haben. Beim nächstfolgenden Bestaubungszyklus wird dann der Staub zuerst bevorzugt an den freien porösen Stellen bei hoher örtlicher Filtrationsgeschwindigkeit abgelagert, was einen progressiven Druckanstieg zur Folge hat. Nach Homogenisierung der Staubbelegung durch die Kuchenbildung vergleichmässigen sich dann die örtlichen

Filtrationsgeschwindigkeiten und die weitere Druckzunahme geht in einen moderateren Verlauf über. Die konvexe Form des Druckverlaufes mit dem progressivem Anstieg zu Beginn ist dann die Ursache, dass der Druckanstieg über der Zykluszeit hoch wird (siehe Abb. 80 b).
Mit weiter zunehmenden Zyklenzahlen beginnt der Druckanstieg (Kuchendruckabfall) über der Zykluszeit wieder abzunehmen. Gegen Ende dieser Phase geht der Gesamtdruckabfall bei ca. 15 mbar ebenso wie der Restdruckverlust plötzlich in einen extrem ansteigenden Verlauf über.

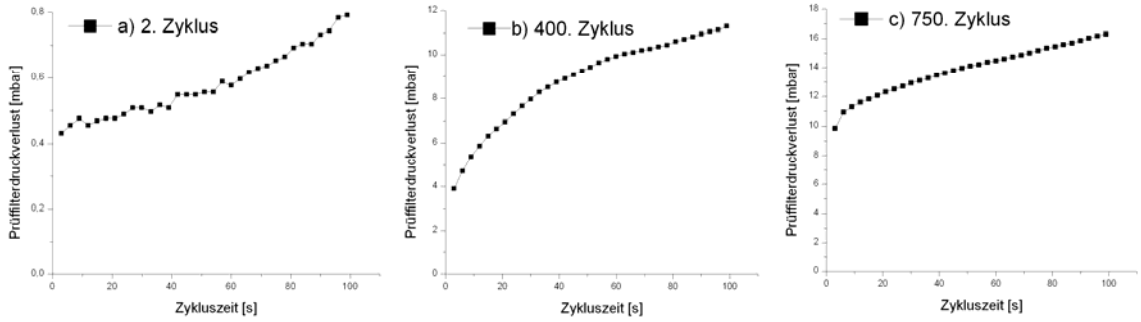


Abb. 80: Druckanstiege während der Zykluszeit bei einer Alterung mit 2,5 m/min Filtrationsgeschwindigkeit und 100 s Zykluszeit (siehe Abb. 79)
a): während der Tiefenfiltrationsphase
b): während der im Inneren des Filtermediums stattfindenden „patchy-cleaning“ Phase
c): Phase gleichmäßiger Steigung

Wenn der Verlauf des alleinigen Kuchendruckabfalls über der gesamten Testzeit betrachtet wird (siehe Abb. 81), so durchläuft dieser dabei ein Maximum.

Die Abnahme des Kuchendruckabfalls nach dem Maximum kann durch ein Auffüllen und einer nachfolgenden „Nichtabreinigung“ der bisher bestehenden im Inneren des Filtermediums inhomogen verteilten Porositätsstrukturen erklärt werden. Die Form des Druckverlaufes über der Zykluszeit, die in der „patchy-cleaning“ Phase einen gekrümmten Verlauf mit anfänglich progressiver und danach moderater Steigung hat, geht dann in eine über der gesamten Zykluszeit geringen, bzw. gleichmäßigen Steigung über (siehe Abb. 80 c). Dabei ist zu beachten, dass bei Abreinigung nach konstanten Zykluszeiten, der Gesamtdruck knapp vor der Abreinigung, welcher bei einer druckgesteuerten Abreinigung stets konstant bleibt, mit der Zyklenzahl bzw. der Testzeit ansteigt. In demselben Maß wie dieser Druck steigt, erhöht sich auch das Vakuum an der Reingasseite.
Die Abreinigungsdüse arbeitet stets mit konstantem Tankdruck und konstanter Ventilöffnungszeit. Abgesehen von den geringen Vakuumdruckänderungen von ca. ± 0,01 bar im Vergleich zur Tank-Reingasraum Durckdifferenz von ca. 5,01 bar wird ein nahezu konstantes Druckstoßluftvolumen in das reingasseitige Vakuum eingeblasen. Da aber das Vakuum mit zunehmender Zyklenzahl immer größer wird, wird ein immer größer werdender Teil des Druckstoßluftvolumens zum Ausgleichen des Vakuums verwendet (siehe Abb. 86). Die Verstopfung im Inneren des Filtermediums wird dann unzureichend beseitigt und der anfiltrierte Staubkuchen wird ebenfalls nur teilweise abgereinigt.

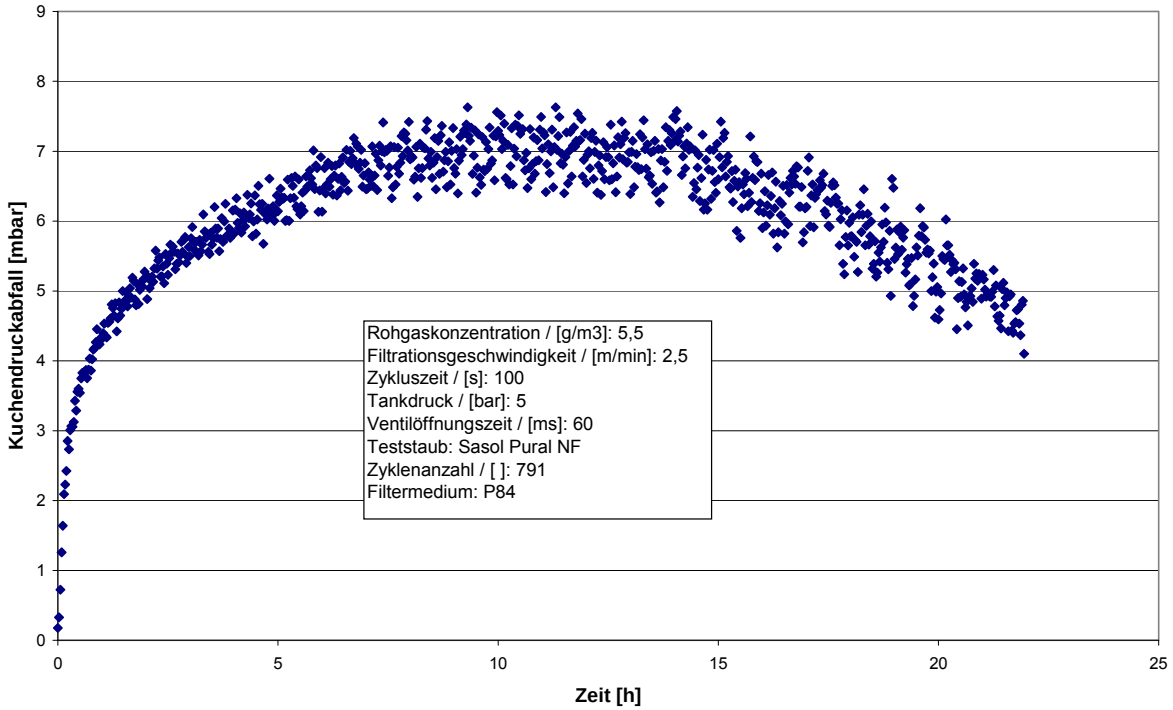


Abb. 81: Verlauf des alleinigen Kuchendruckabfalls über der Zeit

In weiterer Folge wurde dieser Alterungsverlauf bei verschiedenen Zykluszeiten (15 bis 250 s), und ebenfalls ohne anfängliche Konditionierphase untersucht. In Abb. 82 sind die Kurven des Prüffilterdruckverlustes über der Testzeit aufgetragen. Man erkennt, dass mit zunehmender Zykluszeit der Zeitpunkt der völligen Verstopfung kürzer wird. Der Restdruckverlustverlauf verschiebt sich mit steigender Zykluszeit zu geringeren Werten, aber die Bandbreite Gesamtdruckverlust minus dem Restdruckverlust, das ist der Druckabfall über dem Filterkuchen, wird mit steigender Zykluszeit größer.
Erklärbar wird die Restdruckverlustabnahme mit zunehmender Zykluszeit, wie auch in der Literatur bekannt [10] durch die größeren anfiltrierten Kuchendicken, die dann großflächiger und damit besser abgereinigt werden. Der Druckabfall über dem Filterkuchen wird mit zunehmender Zykluszeit aber auch größer, da mehr Kuchenmasse pro Zykluszeit anfiltriert wird.
Die beiden gegenläufigen Tendenzen, Abnahme des Restdruckverlustes und Zunahme des Kuchendruckverlustes durch größere Kuchenmassen, sind in Abb. 83 über der Zykluszeit dargestellt. Dabei wurde von jedem Alterungsversuch eine Mittelung von 30% der Gesamtmeßwerte im Mittenbereich der Versuchszeit durchgeführt und über der Zykluszeit aufgetragen. Der Einfluß des Kuchendruckverlustes auf den Gesamtdruckverlust überwiegt, je größer die Zykluszeiten werden. Es ist jedoch ersichtlich, dass der extreme Anstieg zur vollständigen Verstopfung stets bei einem Druckverlust von ca. 15 mbar erfolgt (Abb. 82).

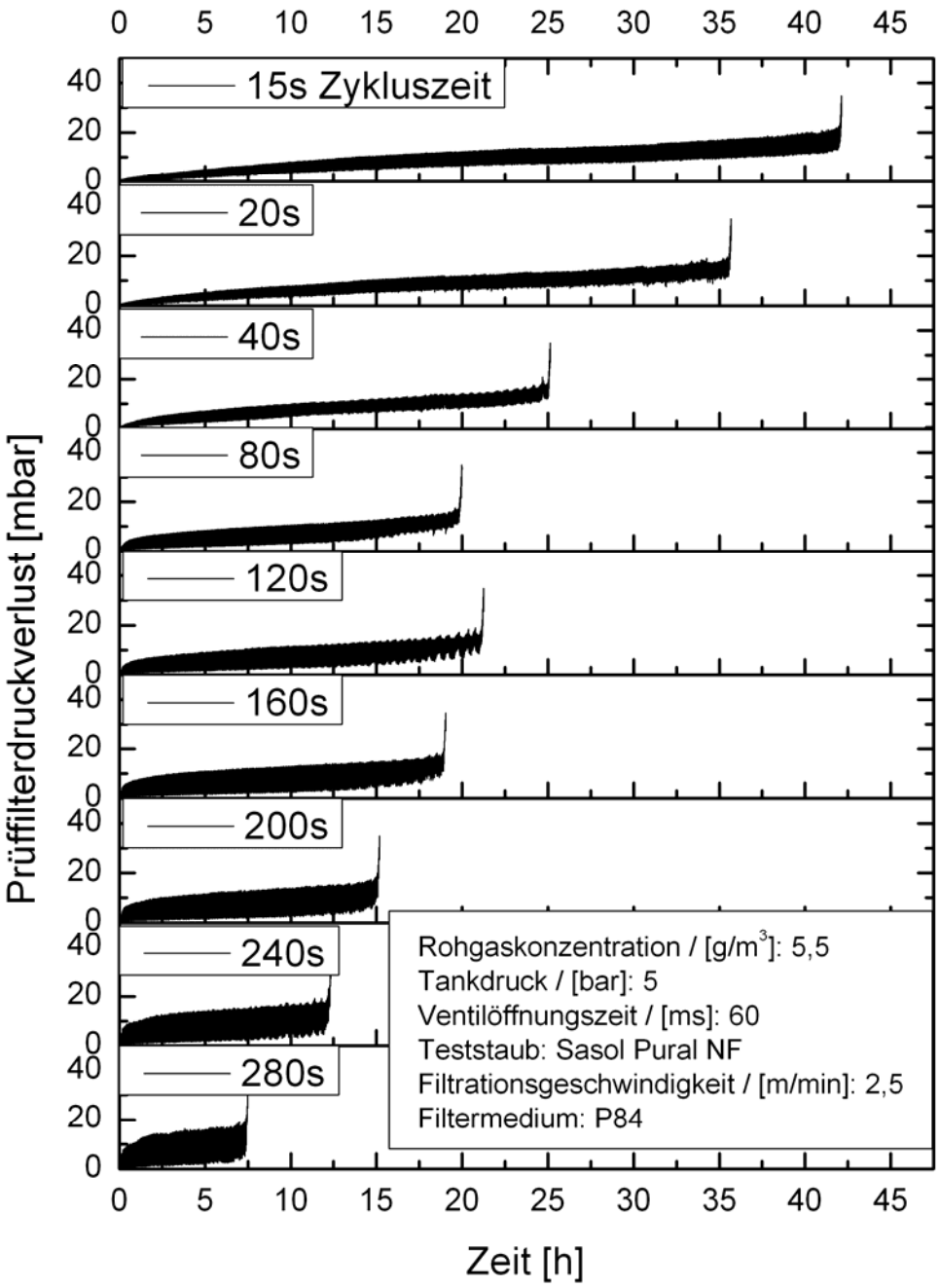


Abb. 82: Alterungsverläufe bei verschiedenen Zykluszeiten

Bei diesem Unterdruck an der Reingasseite scheint die Abreinigung nicht mehr erfolgreich zu sein und diese Druckgrenze ist bei allen Alterungsversuchen, die bei gleichen Abreinigungsparameterwerten gefahren wurden, von annähernd gleicher Größe. Wird beispielsweise die Ventilöffnungszeit von 60 auf 80 ms erhöht, so steigert sich die Abreinigungsintensität und es erhöht sich dementsprechend auch diese Druckgrenze (siehe Abb. 86 und Abb. 87). Beim VDI 3926 Typ 2 Filtermittelprüfstand im Vergleich zur Alterungskammer zeigt sich bei gleichen Prüfbedingungen eine höhere Druckgrenze und dadurch eine höhere Gesamttestzeit. Die niedrigere Druckgrenze bei der Alterungskammer ist auf das ca. 1,8 mal so große Reingasvolumen (das reingasseitige Volumen des Apparaturinnenraums nach dem Prüffilter), bei sonst gleicher konstruktiver Ausführung der Abreinigungseinheit zurückzuführen.

9.1.3 Festlegung eines Alterungskennwerts zur Charakterisierung des Druckverlustverhaltens während der zeitgesteuerten Alterung

Da der Zeitpunkt des Erreichens dieser maximalen Druckgrenze relativ eindeutig festzustellen ist und auch die Entwicklung des Restdruckverlustes und des Druckabfalls über dem Filterkuchen sich dabei in dem einzigen Zeitwert widerspiegeln, wird nun dieser als charakteristische Größe für das Druckverlustverhalten des Alterungsvorganges herangezogen. In Abb. 84 wird dieser über der Zykluszeit dargestellt. Darin ist erkennbar, dass dieser Alterungskennwert bei geringen Zykluszeiten von ca. 15 bis 20 Sekunden sehr hoch ist, dann steil absinkt und im Bereich von 80 bis 200 s ein niedriger gelegenes Plateau erreicht und dann später weiter abfällt. Die hohen Werte von ca. 40 Stunden zu Beginn, die bei noch kleineren Zykluszeiten wahrscheinlich noch höher sind, erklären, dass bei bisherigen zeitlich begrenzten Alterungsversuchen der extreme Druckverlustanstieg gegen Testende bisher noch nicht sichtbar wurde.

In einer weiteren Versuchserie wurden nun bei einer Zykluszeit von 100 s Alterungsversuche bei verschiedenen Filtrationsgeschwindigkeiten und auch für verschiedene Filtermedien durchgeführt (Abb. 86 und Abb. 87). Je höher die Geschwindigkeit ist, desto mehr wirkt sich dies auf den Druckabfall aus. Es wird schneller der maximale Druckabfall von 15 mbar erreicht und der Alterungskennwert wird kleiner. Der Verlauf dieses Alterungskennwertes über der Filtrationsgeschwindigkeit (Alterungskennlinie) gibt nun das Verstopfungsverhalten eines Filtermediums für eine bestimmte Zykluszeit und vorgegebenen Abreinigungsbedingungen an (Abb. 85). Wenn nun von einer noch vertretbaren Alterungstestzeit ausgegangen wird, in der die Zyklenzahl noch möglichst hoch ist, so liegt die optimale Zykluszeit im Bereich von ca. 80 bis 100 Sekunden (siehe Abb. 84) und wurde bei diesen Versuchen mit 100 s fixiert. Ab dieser Zykluszeit bleibt der Druckanteil des Restdruckverlustes nahe zu gleich und der Gesamtdruck und damit der Zeitpunkt der Verstopfung wird großteils durch den Kuchendruckanteil bestimmt (siehe Abb. 83).

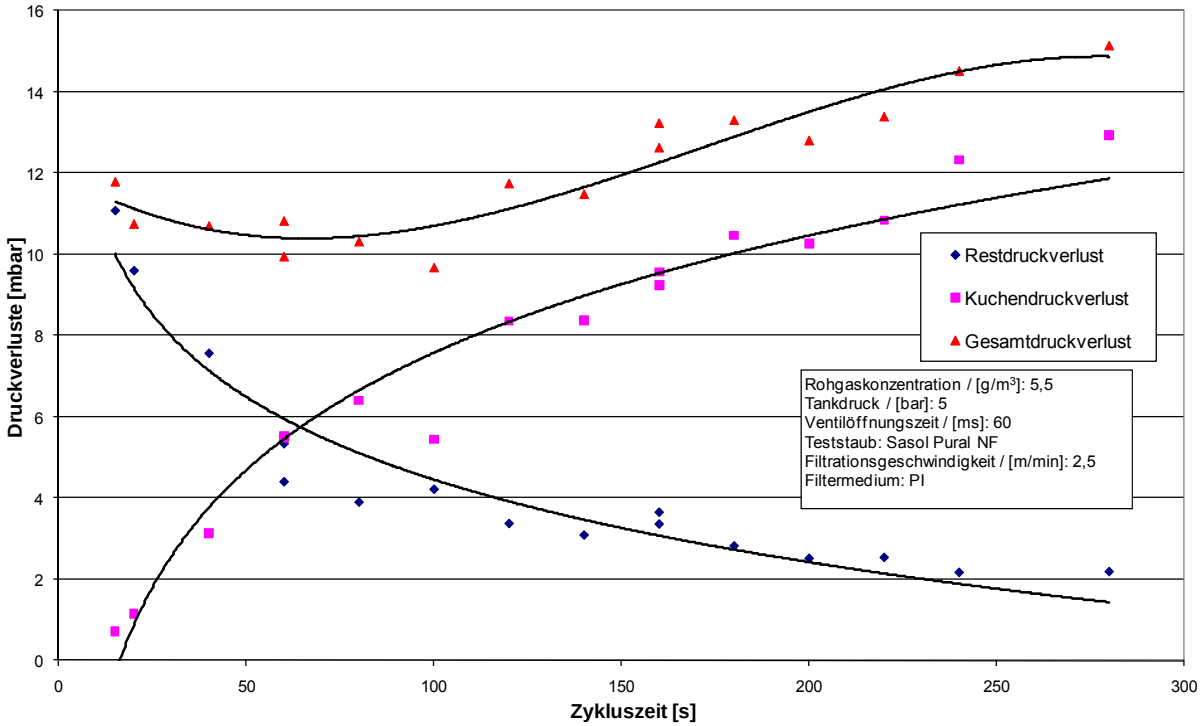


Abb. 83: Abnahme des Restdruckverlustes, Zunahme des Kuchendruckverlustes, sowie Gesamtdruckverlust über der Zykluszeit

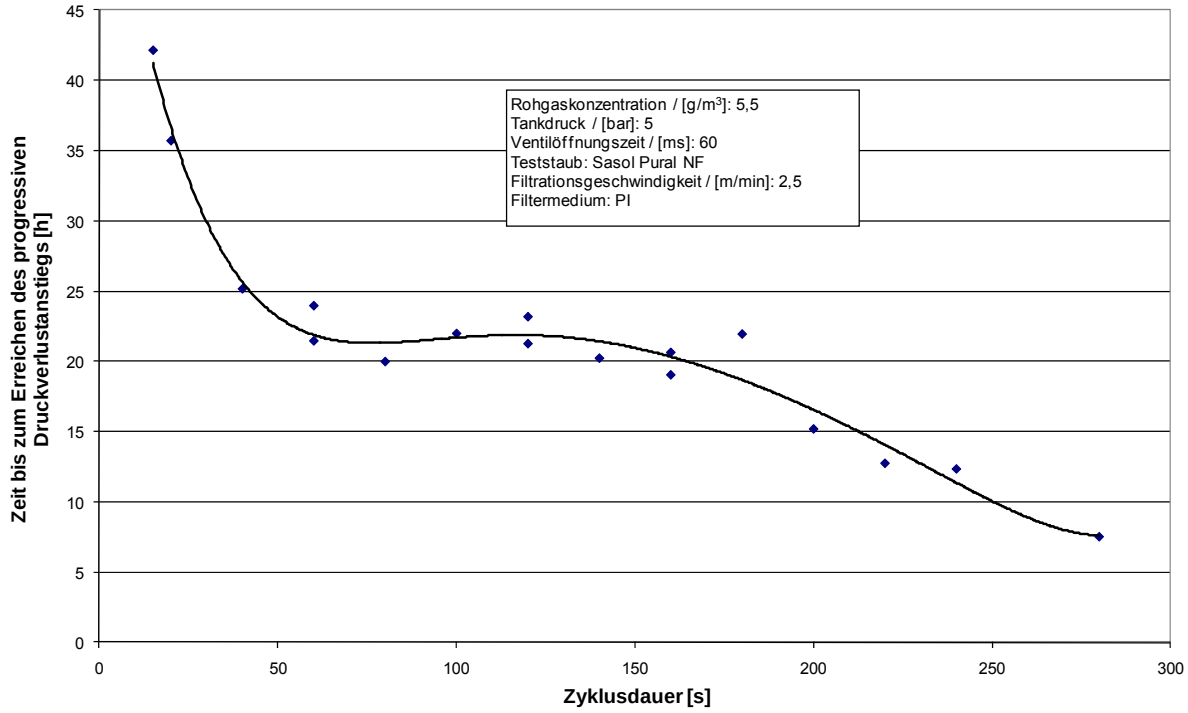


Abb. 84: Alterungskennwert mit steigender Zykluszeit

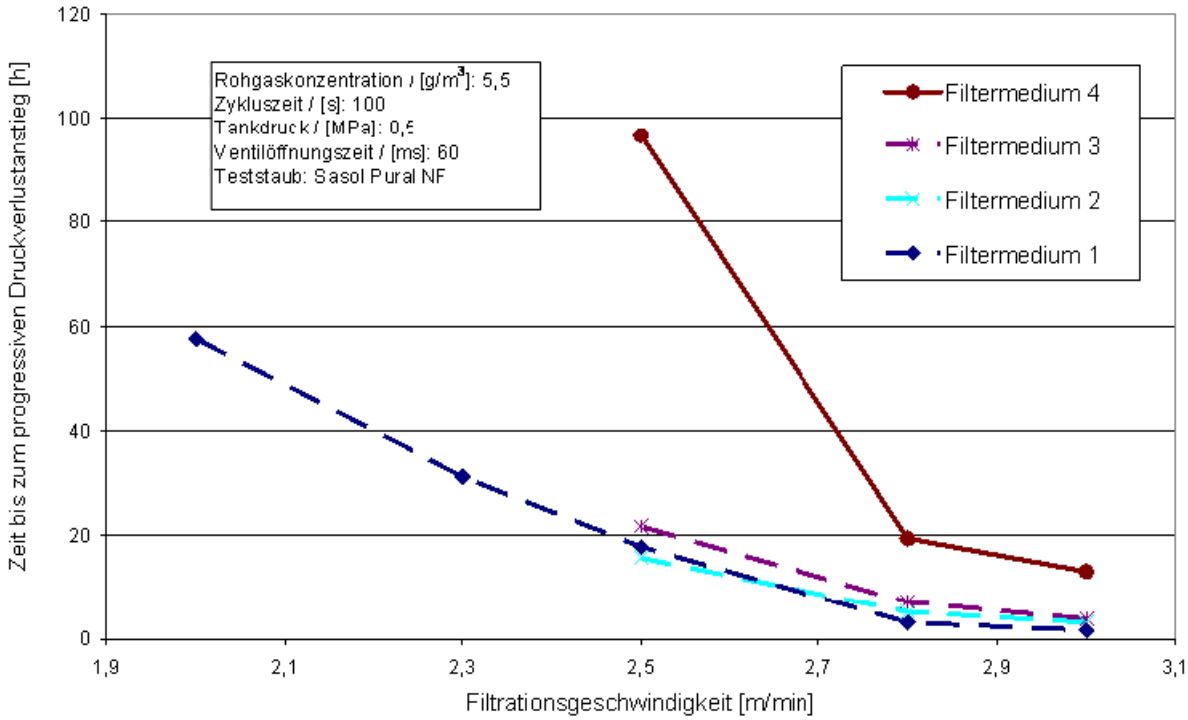


Abb. 85: Alterungskennlinie für verschiedene Filtermedien

Verschiedene Filtermedien können mit Hilfe der Alterungskennlinie verglichen werden (Abb. 85). Es ist ersichtlich, dass das Verstopfungsverhalten unterschiedlicher Filtermedien unterschiedlich stark durch die Filtrationsgeschwindigkeit beeinflußt wird. Beispielsweise kann der Verstopfungsunterschied zweier Filtermedien bei einer bestimmten Filtrationsgeschwindigkeit unwesentlich, jedoch bei einer anderen Geschwindigkeit doch von Bedeutung sein oder womöglich in seiner Auswirkung sich gegenteilig zeigen. Das wassergestrahlte P84 Filtermedium zeigte die besten Alterungskennwerte, welche auf die in

Kapitel 12.2 (Seite 113) beschriebenen geringeren Porentiefen bzw. kleineren Modellporen und die in Kapitel 10 (Seite 92) beschriebenen homogenen Porenflächenverteilungen bei kleineren mittleren hydraulischen Porendurchmessern zurückzuführen sind.

Gemäß dem Normvorschlag [7] wurden die bisherigen Versuche bei einer Ventilöffnungszeit von 60 ms gefahren und es ergab sich, wie bereits vorher erwähnt, eine obere Druckgrenze von ca. 15 mbar (siehe Abb. 86). Wird die Ventilöffnungszeit auf 80 ms erhöht, so verschiebt sich diese Druckgrenze zu ca. 20 mbar (Abb. 87). Der Einfluß der Ventilöffnungszeit auf das Verstopfungsverhalten kann für ein Filtermedium auch an der Verschiebung der Alterungskennlinien erkannt werden (siehe Abb. 88).

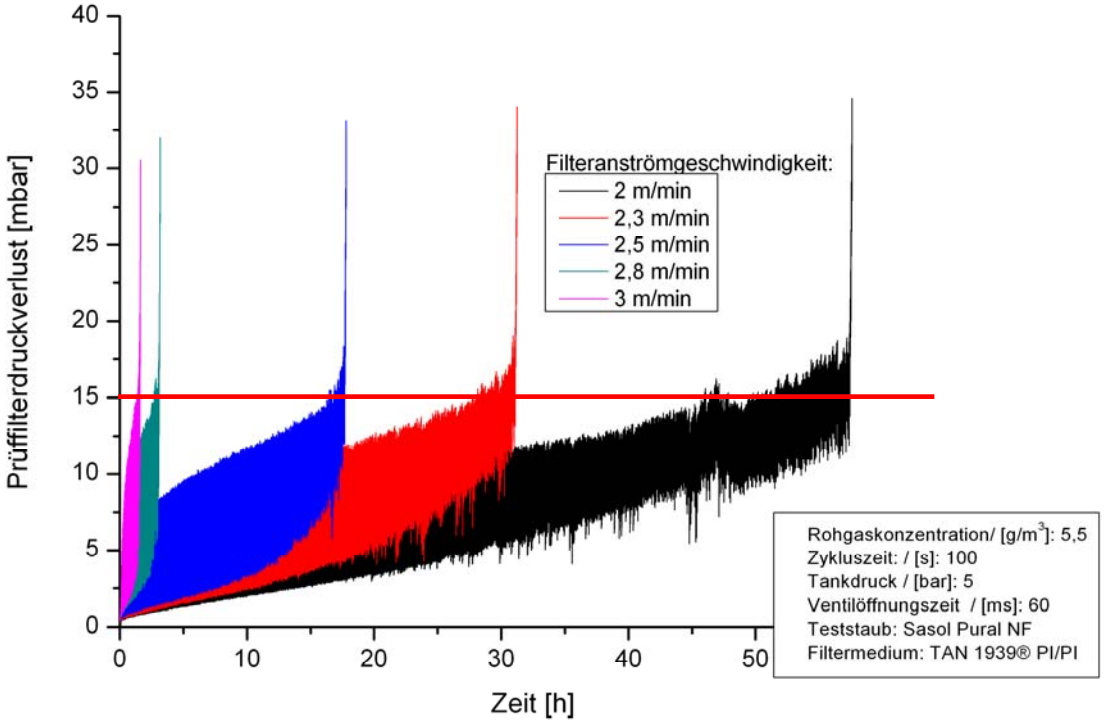


Abb. 86: Alterungstests bei einer Ventilöffnungszeit von 60 ms

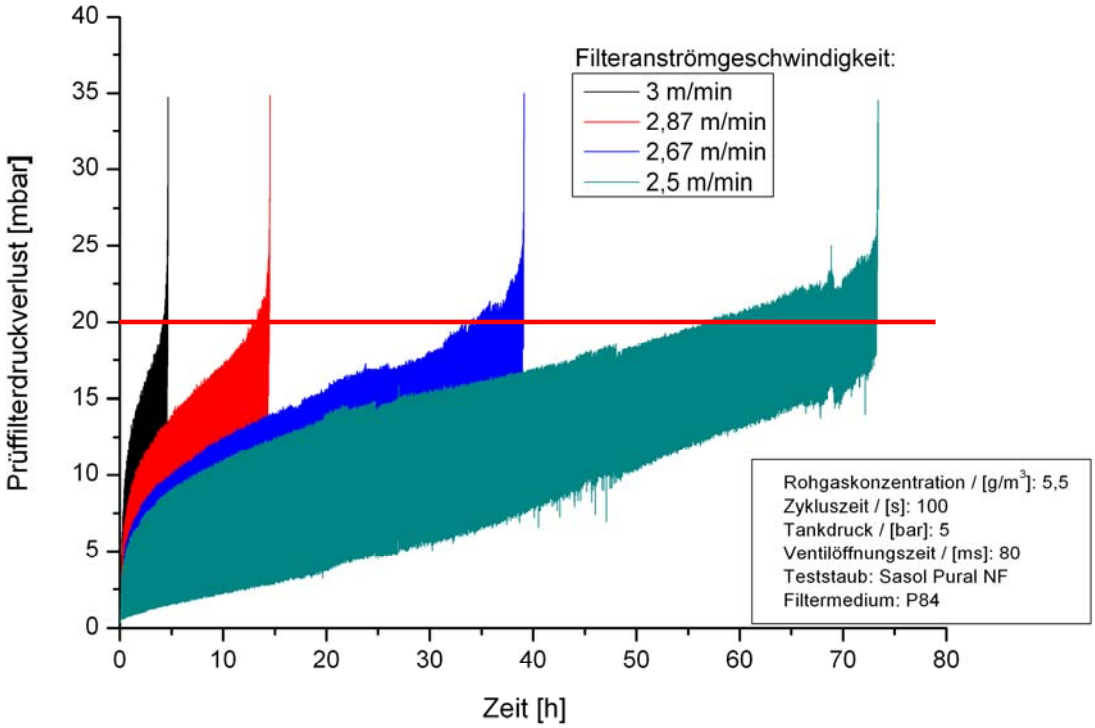


Abb. 87: Alterungstests bei einer Ventilöffnungszeit von 80 ms

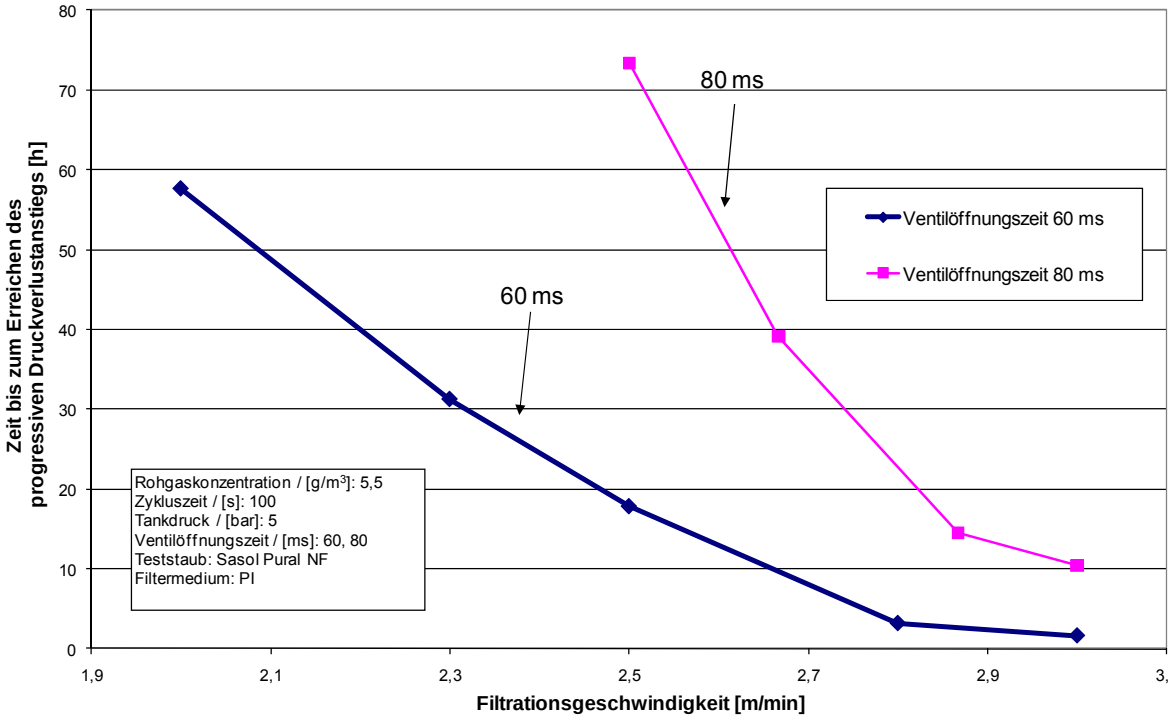


Abb. 88: Alterungskennlinien für ein Filtermedium bei zwei verschiedenen Ventilöffnungszeiten.

In Abb. 89 ist der Verlauf des Abreinigungsdruckverlusts über der Alterungszeit dargestellt. Weiters wurden die Druckverlustverläufe während der Abreinigung in das Diagramm eingefügt. Da die Abreinigung sehr schnell abläuft, werden die Druckverluste während der Abreinigung auf einer Zeitskala in ms dargestellt. Es kann erkannt werden, dass zu Beginn

der Alterung durch den Druckstoß auf der Reingasseite ein Überdruck aufgebaut wird (grau gefüllte Flächen), welcher die Triebkraft für die Abreinigung ist. Während der Alterung steigt jedoch der Abreinigungsdruckverlust kontinuierlich an und damit steigt der reingasseitige Unterdruck vor der Abreinigung (siehe Abb. 89). Dadurch wird der Druckstoß-Überdruck vermindert und in weiterer Folge sinkt die Abreinigungseffizienz. Der reingasseitige Unterdruck steigt nun solange an, bis der durch den Abreinigungsdruckstoß erzeugte reingasseitige Überdruck zu klein ist, um den Filterkuchen abzureinigen, dann steigt der Druckverlust extrem an.

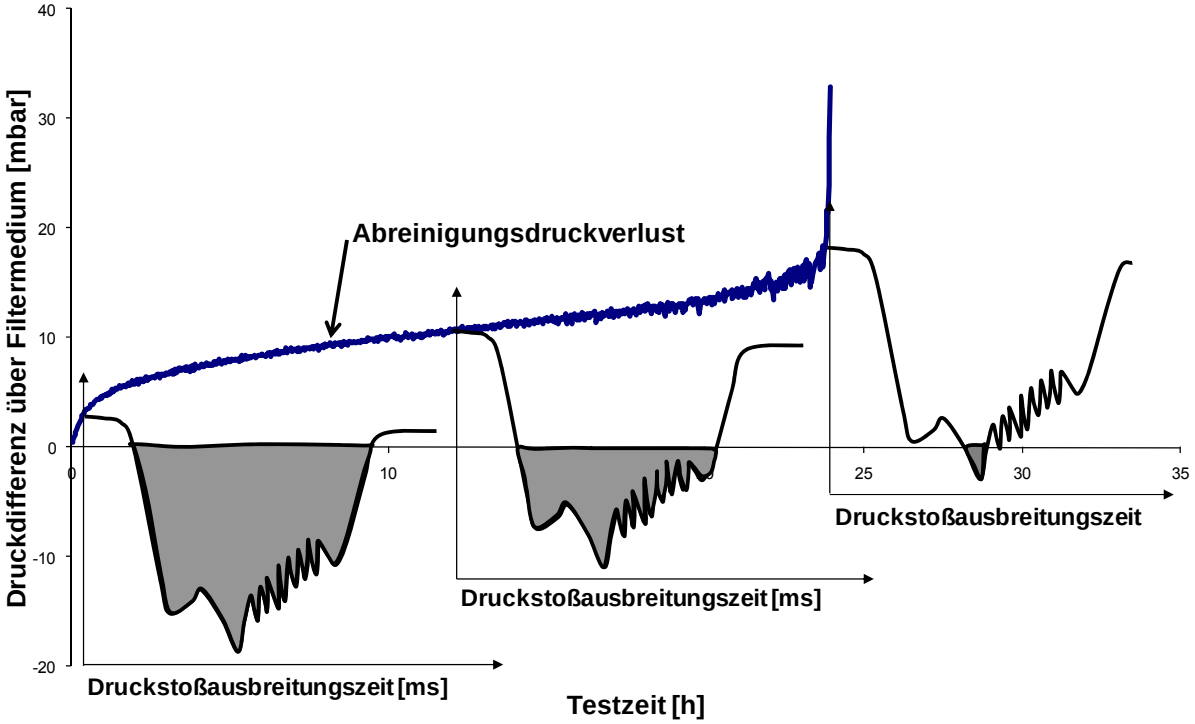


Abb. 89: Schematische Erklärung des Druckverlustverhaltens

Ein Anhaften des Filterkuchens nach der Abreinigung wurde bereits von Sievert [82] beobachtet und mithilfe von Hochgeschwindigkeitsdruckaufnehmern auf einen unzureichenden Überdruck zurückgeführt. Sieverts Versuche zeigen weiters, dass bei Offlineabreinigung (kein reingasseitiger Unterdruck) mit gleichen Abreinigungsparametern kein Anhaften des Kuchens beobachtet werden konnte.

Zur Beurteilung des Gesamtfiltrationsverhaltens werden in Analogie zu den Beurteilungsgrößen der VDI-Tests [3, 12] folgende Kenngrößen zur Beurteilung verwendet (Abb. 90):

- **Alterungskennwert**

Der Alterungskennwert wird wie in Kapitel 9.1.3, Seite 86 beschrieben ermittelt. In dem Alterungszeitkennwert, der die Zeit bis zur totalen Verstopfung angibt, ist der Einfluß der Zyklusdauer und des Restdruckverlustes enthalten. Zur Erfassung der Geschwindigkeitsabhängigkeit des Alterungskennwerts wird dieser über der Filtrationsgeschwindigkeit aufgetragen. Anhand dieser Alterungskennlinien kann das Druckverlust- bzw. Verstopfungsverhalten beurteilt werden.

- **mittlere Reingaskonzentration**

Die mittlere Reingaskonzentration wird durch Differenzwägung des Absolutfilters vor und nach der Alterung ermittelt. Die Gewichtsdifferenz wird auf das durchgesetzte Gasvolumen bezogen und in mg/m^3 angegeben.

- **eingelagerte Staubmasse** pro durchgesetztem Gasvolumen

Für die Ermittlung der eingelagerten Staubmasse wird das Filtermedium nach dem extremen Druckverlustanstieg off-line abgereinigt um den anhaftenden Filterkuchen zu entfernen. Durch Differenzwägung mit der unbestaubten Filterronde wird die eingelagerte Staubmasse ermittelt. Die eingelagerte Staubmasse wird auf das durchgesetzte Gasvolumen bezogen und in g/m^3 angegeben.

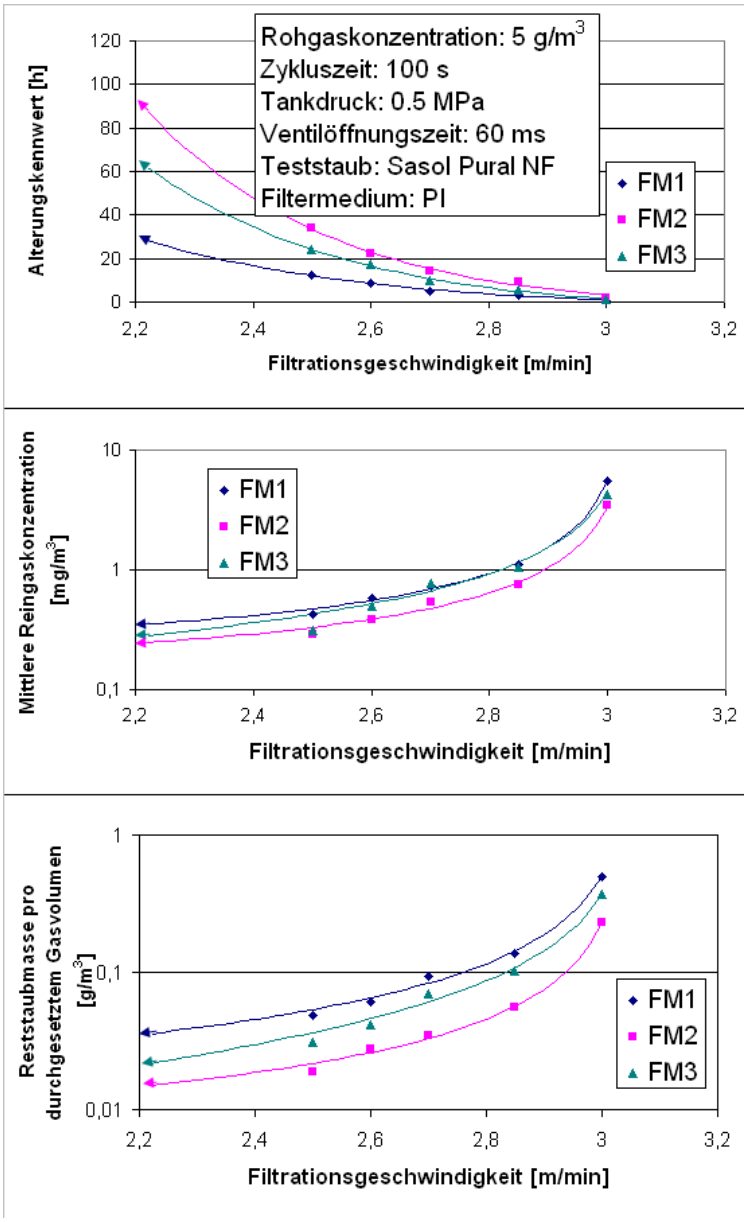


Abb. 90: Vergleichende Beurteilung der Filtrationseigenschaften von drei PI Nadelfilzen

In Abb. 90 kann erkannt werden, dass der Alterungskennwert der 3 getesteten Nadelfilze bei hohen Geschwindigkeiten geringe Unterschiede aufweist. Bei kleineren Geschwindigkeiten zeigen sich größere Unterschiede in den Alterungskennwerten.
FM2 das Filtermedium mit den größten Alterungskennwerten besitzt auch leicht niedrigere mittlere Reingaskonzentrationen und niedrigere eingelagerte Reststaubmassen pro durchgesetztem Gasvolumen.

9.2 Zusammenfassung der Ergebnisse des Kapitels 12

Bei Alterungstests mit Hilfe der Alterungskammer, welche in Anlehnung an den ISO-Normentwurf [7] zeitgesteuert ablaufen, zeigte sich, dass die Druckanstiege über der Zeit nicht stationär werden, sondern sogar ab einem bestimmten Zeitpunkt extrem ansteigen und zu einer vollständigen Filtermedienverstopfung führen. Der Zeitpunkt des extremen Anstieges hängt von der Größe und dem Zusammenwirken der filtrationsdruckbeeinflussenden Parameter ab, wie z.B. der Filtrationsgeschwindigkeit, der Zykluszeit, der Art des Teststaubes und auch des Filtermediums.
Für die im Normentwurf [7] festgelegten Filtrationsgeschwindigkeiten (2m/min) und Zykluszeiten (20s) wird der extreme Druckverlustanstieg im Laufe der festgelegten Alterungszeit von ca. 14 h für die meisten Filtermedien nicht sichtbar. Er tritt aber bei höheren Filtrationsgeschwindigkeiten und Zykluszeiten schon innerhalb der Testzeit auf.
Resultierend aus den Ergebnissen der Alterungsversuche und deren Interpretation wurde die Idee geboren, den Zeitpunkt des extremen Druckverlustanstieges als Alterungskennwert zu betrachten und damit einen Vergleichswert für das Verstopfungsverhalten verschiedener Filtermedien zu erhalten. Da die Filtrationsgeschwindigkeit das Verstopfungsverhalten verschiedener Filtermedien unterschiedlich beeinflußt, kann dieser Kennwert für verschiedene Filtrationsgeschwindigkeiten bestimmt werden und dadurch eine Alterungskennlinie geschaffen werden.
Der Grund für den nach einer gewissen Testzeit erfolgenden extremen Druckverlustanstieg liegt in der stetigen Erhöhung des reingasseitigen Unterdrucks. Durch den steigenden reingasseitigen Unterdruck wird der durch den Abreinigungsdruckstoß erzeugte Überdruck erniedrigt, bis schließlich der Filterkuchen während der Abreinigung haften bleibt infolge steigt der Druckverlust extrem an.
In Analogie zu den Beurteilungsgrößen der VDI-Tests [3, 12] werden folgende Kenngrößen zur Beurteilung des Alterungsverhaltens verwendet:

- Der Alterungskennwert, welcher zur Beurteilung des Verstopfungsverhaltens von Filtermedien verwendet wird. Im Alterungskennwert spiegelt sich sowohl der Kuchendruckverlustverlauf als auch der Restdruckverlustverlauf des Filtermediums wieder.
- Die mittlere Reingaskonzentration gibt Aufschluß über den Partikeldurchtritt während der Alterung.
- Die eingelagerte Reststaubmasse pro durchgesetztem Gasvolumen.

Die Kenngrößen werden jeweils in Abhängigkeit zur Filtrationsgeschwindigkeit dargestellt (siehe Abb. 90).

10 Interpretation von Alterungsergebnissen verschiedener Filtermedien mithilfe der Inhomogenitätsbestimmung

Für die Untersuchung der Auswirkung von Porenflächeninhomogenitäten auf den Alterungskennwert wurden folgende Filtermedien ausgewählt:

Bezeichnung	Verfestigungsart	Faserauflage	Faserunterlage
100 % P84 (2,2 dtex)	Nadeln, Produktionsnadelbrett	P84 2,2 dtex	P84 2,2 dtex
50/50 P84/PPS (2,2 dtex) Technikum	Nadeln, Technikumsnadelbrett	50 % P84 2,2 dtex; 50 % PPS 2,2 dtex	PPS 2,2 dtex
100 % PPS (2,2 dtex)	Nadeln, Produktionsnadelbrett	PPS 2,2 dtex	PPS 2,2 dtex
100 % P84 (2,2 dtex) Technikum	Nadeln, Technikumsnadelbrett	P84 2,2 dtex	P84 2,2 dtex
100 % P84 (0,6 dtex) wassergestrahlt	Wasserstrahlen	P84 0,6 dtex	P84 2,2 dtex

Bezeichnung	Stützgewebe	Ausrüstung	Luftdurchlässigkeit bei 200 Pa [l/(dm^2*min)]
100 % P84 (2,2 dtex)	P84	sengen	163
50/50 P84/PPS (2,2 dtex) Technikum	PPS	sengen	154
100 % PPS (2,2 dtex)	PPS	kalandrieren	144
100 % P84 (2,2 dtex) Technikum	P84	sengen	147
100 % P84 (0,6 dtex) wassergestrahlt	P84	sengen	66

Tab. 23: Beschreibung der untersuchten Filtermedien

Begriffserklärung:

1 dtex ≡ 1 g/10.000 m. Einheit für die Faserfeinheit welche als Verhältnis von Masse zu Länge angegeben wird.

10.1 Ergebnis der bildanalytischen Untersuchungen

Die Untersuchung der Inhomogenität wurde wie in Punkt 8.1.2 (Seite 62) erläutert durchgeführt [83].
In Abb. 91 bis Abb. 100 ist jeweils eine Bildstichprobe der in Tab. 23 aufgeführten Filtermedien nach der Filtermedienkonditionierung mit resultierendem Schwarzweißbild abgebildet. Das wassergestrahlte P84 Feinfaserfiltermedium (Abb. 99 und Abb. 100) weist eine größere Anzahl an kleineren Poren auf als die untersuchten Nadelfilze.

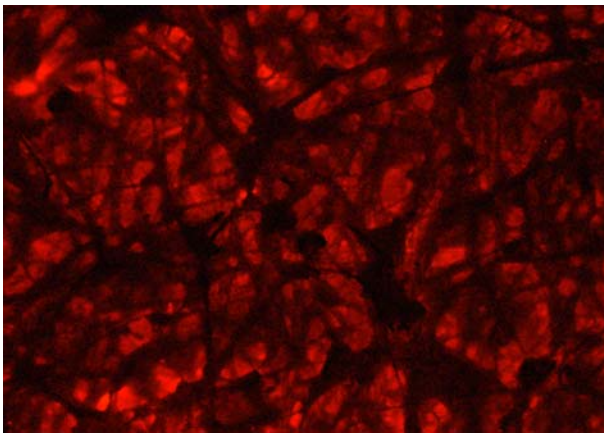


Abb. 91: 100% P84 (2,2 dtex)

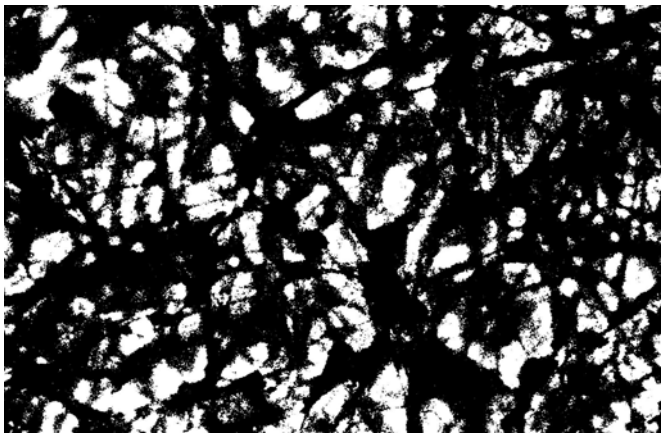


Abb. 92: 100% P84 (2,2 dtex) nach der Binärisierung

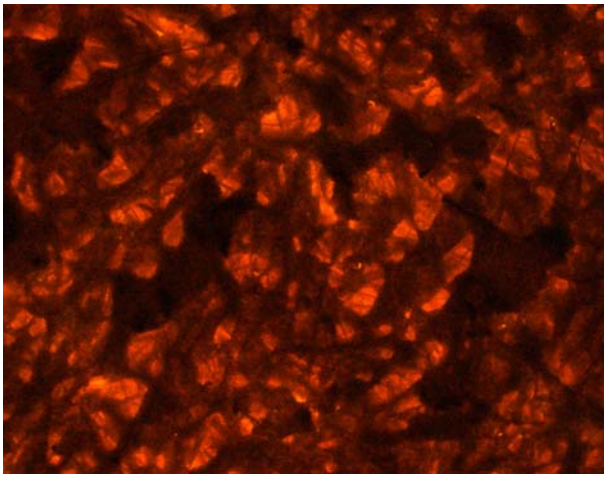


Abb. 93: 50/50 P84/PPS 2,2 dtex Technikum

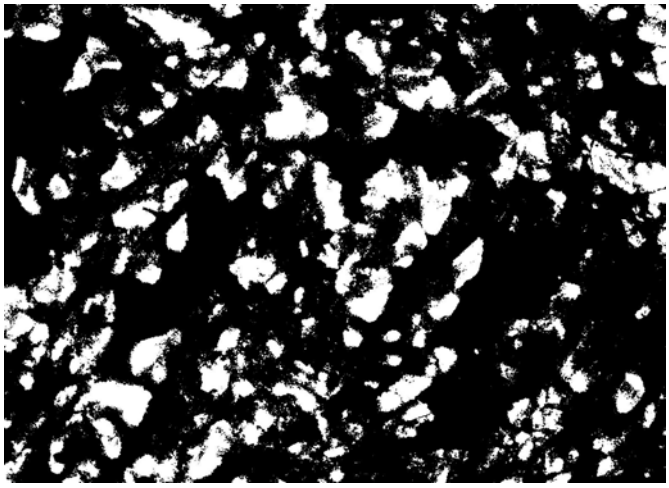


Abb. 94: 50/50 P84/PPS 2,2 dtex Technikum nach der Binärisierung

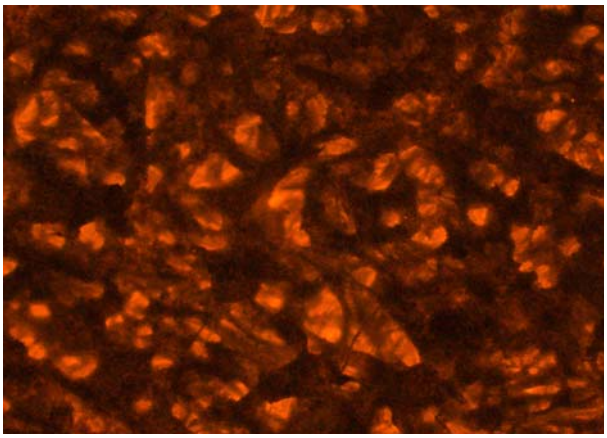


Abb. 95: 100% PPS (2,2 dtex)

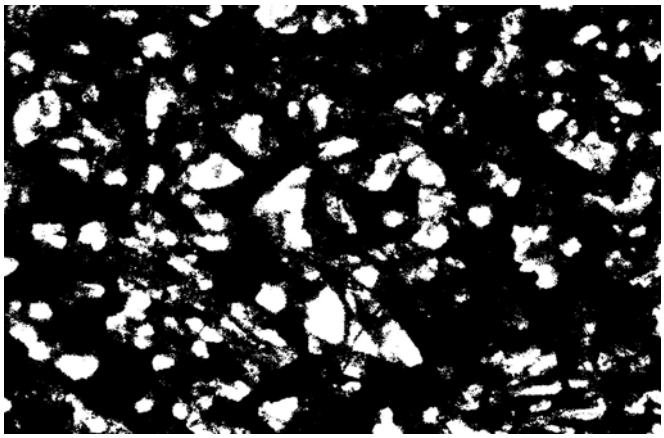


Abb. 96: 100% PPS (2,2 dtex) nach der Binärisierung

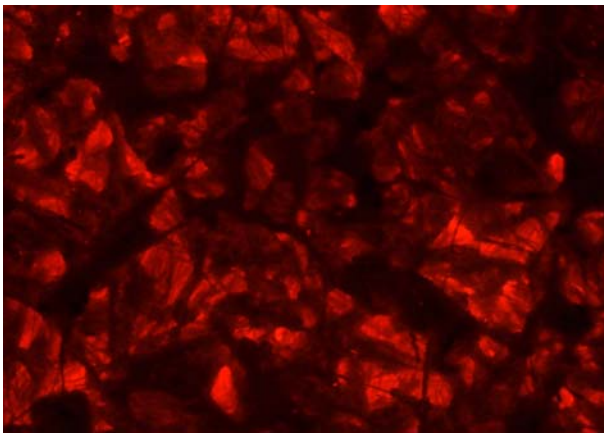


Abb. 97: 100 % P84 (2,2 dtex) Technikum

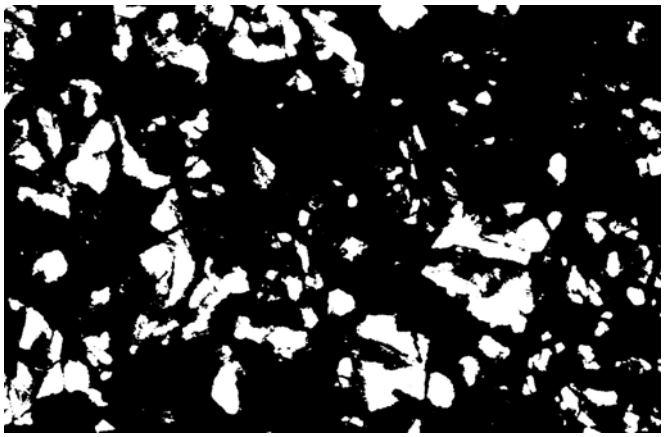


Abb. 98: 100 % P84 (2,2 dtex) Technikum nach der Binärisierung

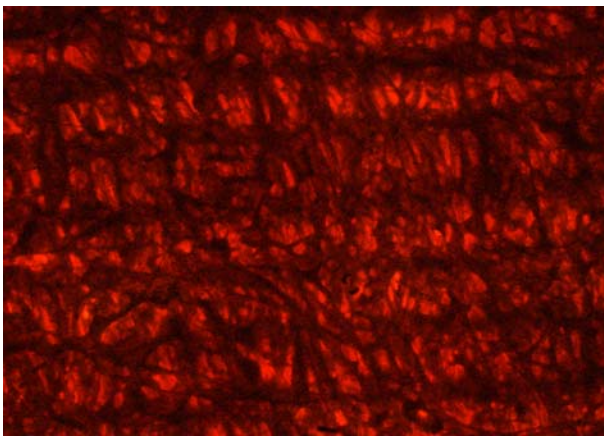


Abb. 99: 100% P84 0,6 dtex wassergestrahlt

Abb. 100: 100% P84 0,6 dtex wassergestrahlt nach der Binärisierung

Das Ergebnis der Porenflächenauswertung in Form von Verteilungsdichtefunktionen ist in Abb. 101 dargestellt.

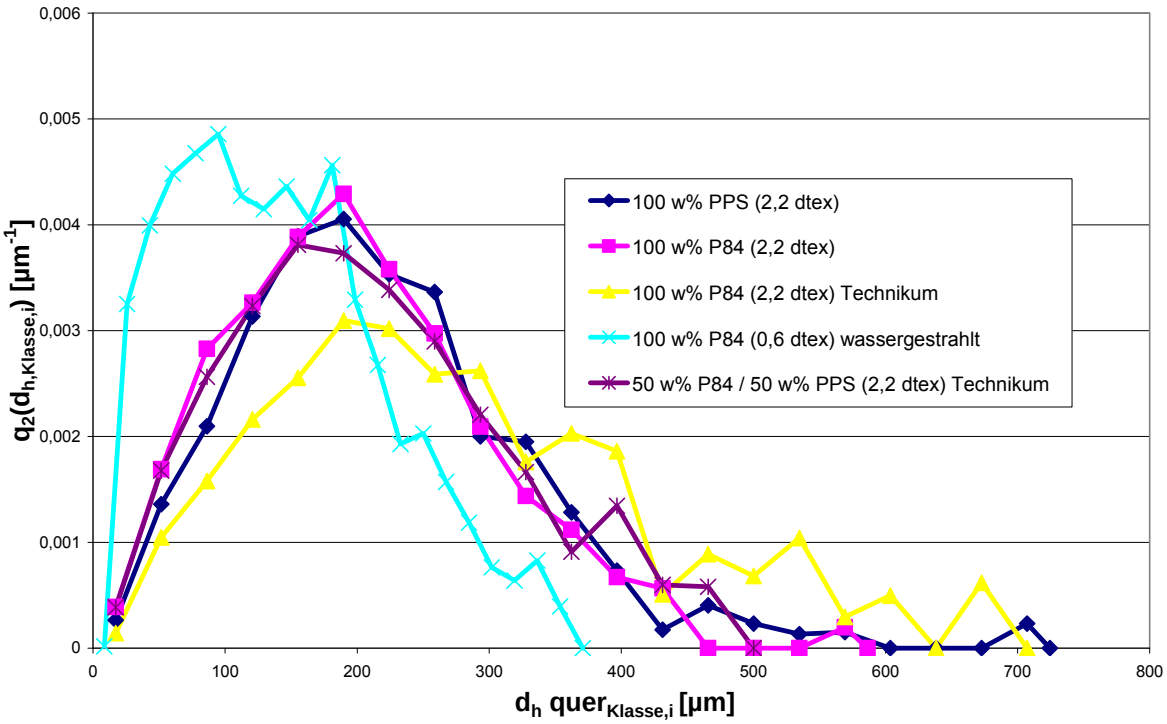


Abb. 101: Porenflächenverteilungsdichtefunktionen der untersuchten Filze

In Abb. 101 ist erkennbar, dass das wasserstrahlverfestigte P84 Filtermedium eine in Richtung kleinerer hydraulischer Porendurchmesser verschobene Dichtefunktion besitzt. Von den vier untersuchten Nadelfilzen zeichnet sich nur der 100% P84 (2,2 dtex) Technikum Nadelfilz durch eine Verschiebung zu größeren Porenflächen aus.
Im folgenden Abschnitt (Abb. 102 bis Abb. 106) werden die Porenkollektivkenngrößen bzw. Inhomogenitätskenngrößen diskutiert, welche nach Formel 22-28 berechnet werden.

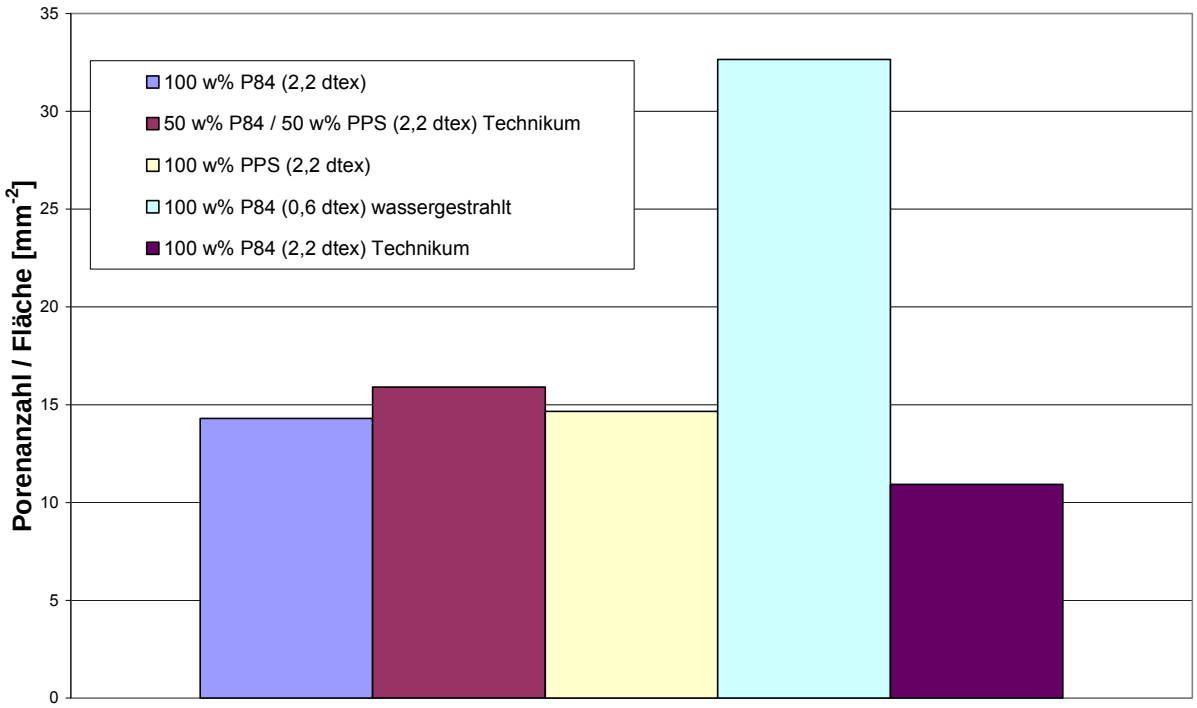


Abb. 102: Gegenüberstellung der Porenanzahl / Bildfläche der untersuchten Filtermedien

Das wassergestrahlte P84 (0,6 dtex) Feinfaserfiltermedium besitzt eine deutlich größere Porenanzahl pro Bildflächeneinheit (Abb. 102) bzw. einen kleineren mittleren hydraulischen Durchmesser (Abb. 103) im Vergleich zu den untersuchten Nadelfilzen. Jener P84-Nadelfilz, welcher auf dem Technikumsnadelbrett genadelt wurde, besitzt den größten mittleren hydraulischen Durchmesser (Abb. 103) und die größte mittlere hydraulische Porenfläche (Abb. 104) der untersuchten Filtermedien. Dieses Ergebnis zeigt den deutlichen Einfluß der Vernadelung auf die Oberflächenstruktur, die resultierende Porenflächenverteilung und die Inhomogenitätskenngrößen.

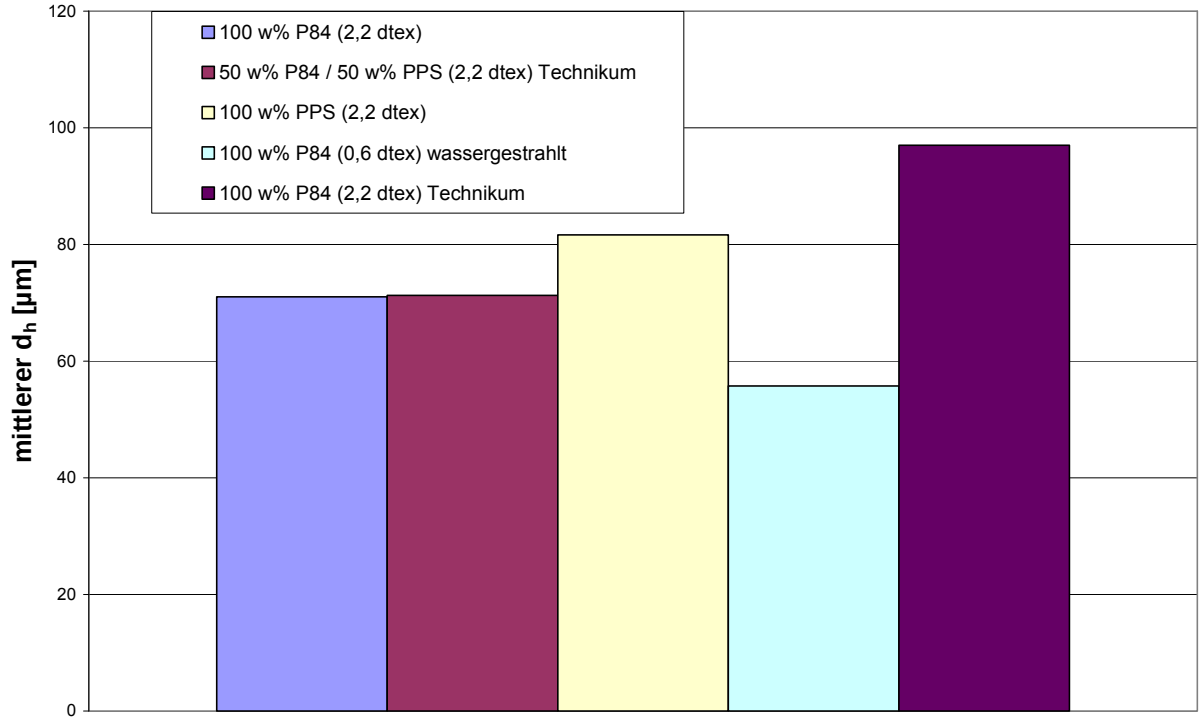


Abb. 103: Gegenüberstellung der mittleren hydraulischen Durchmesser der untersuchten Filtermedien

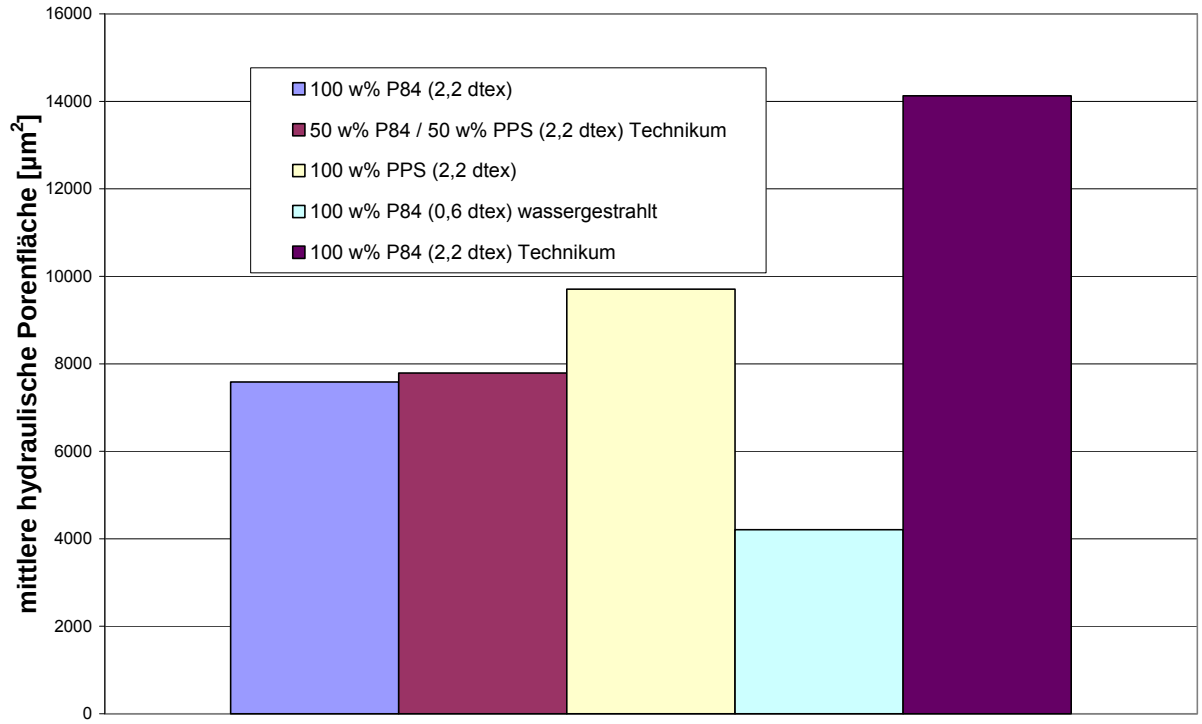


Abb. 104: Gegenüberstellung der mittleren hydraulischen Porenflächen der untersuchten Filtermedien

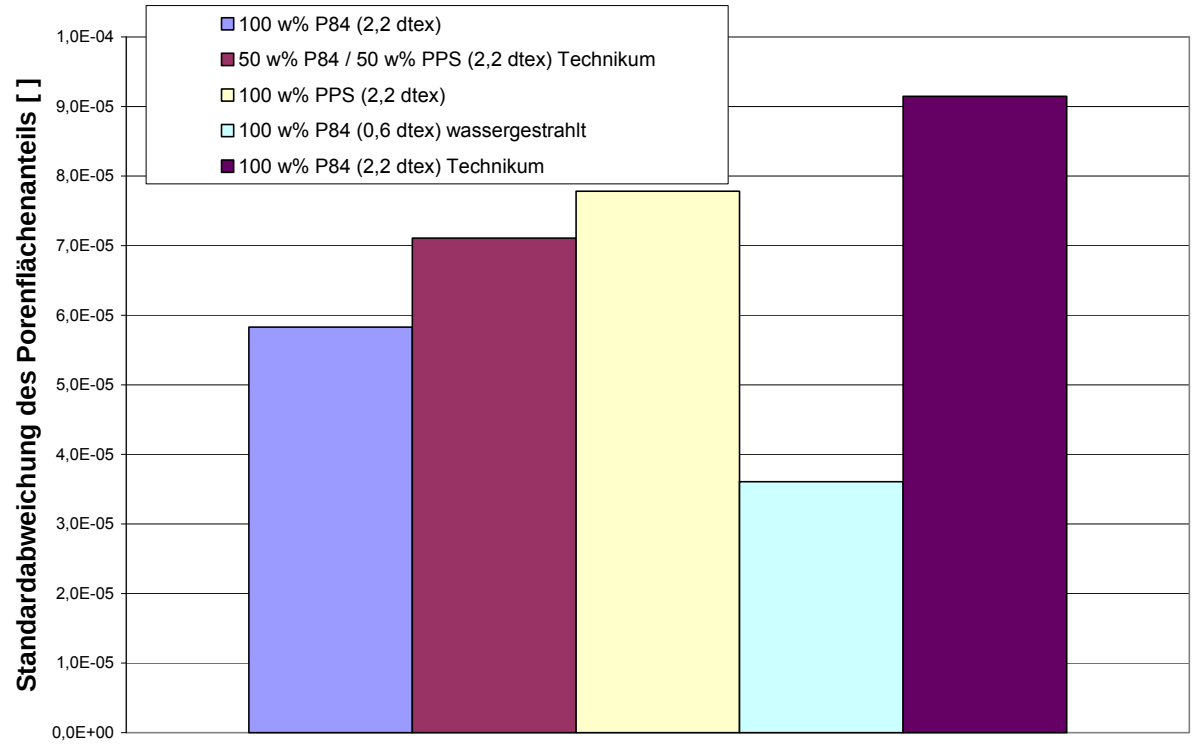


Abb. 105: Gegenüberstellung der Standardabweichungen des Porenflächenanteils der untersuchten Filtermedien

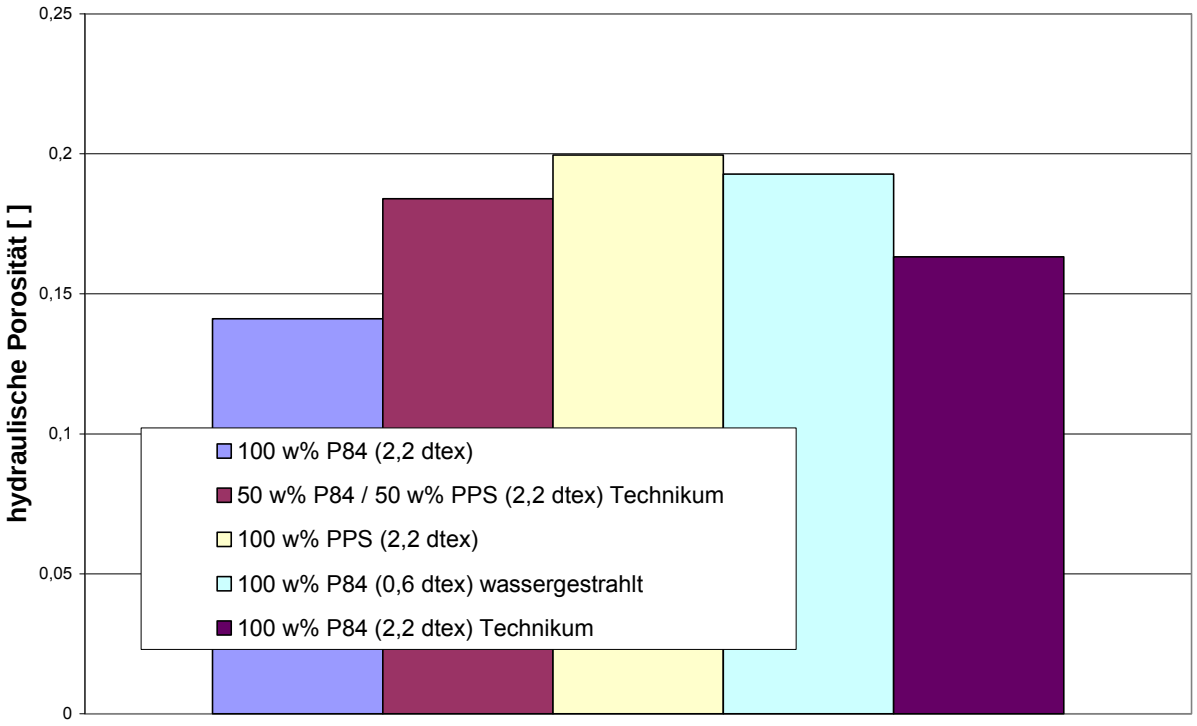


Abb. 106: Gegenüberstellung der hydraulischen Porositäten der untersuchten Filtermedien

Abb. 105 bzw. Abb. 106 zeigt, dass das wassergestrahlte P84 Feinfaserfiltermedium relativ kleine Standardabweichungen des Porenflächenanteils und große hydraulische Porositäten besitzt. Dies läßt auf eine homogene Durchströmung des Filtermediums schließen.
Weiters wurden die Alterungskennlinien der Filtermedien ermittelt und in Abb. 107 gegenübergestellt.

10.2 Ergebnis der Alterungsversuche

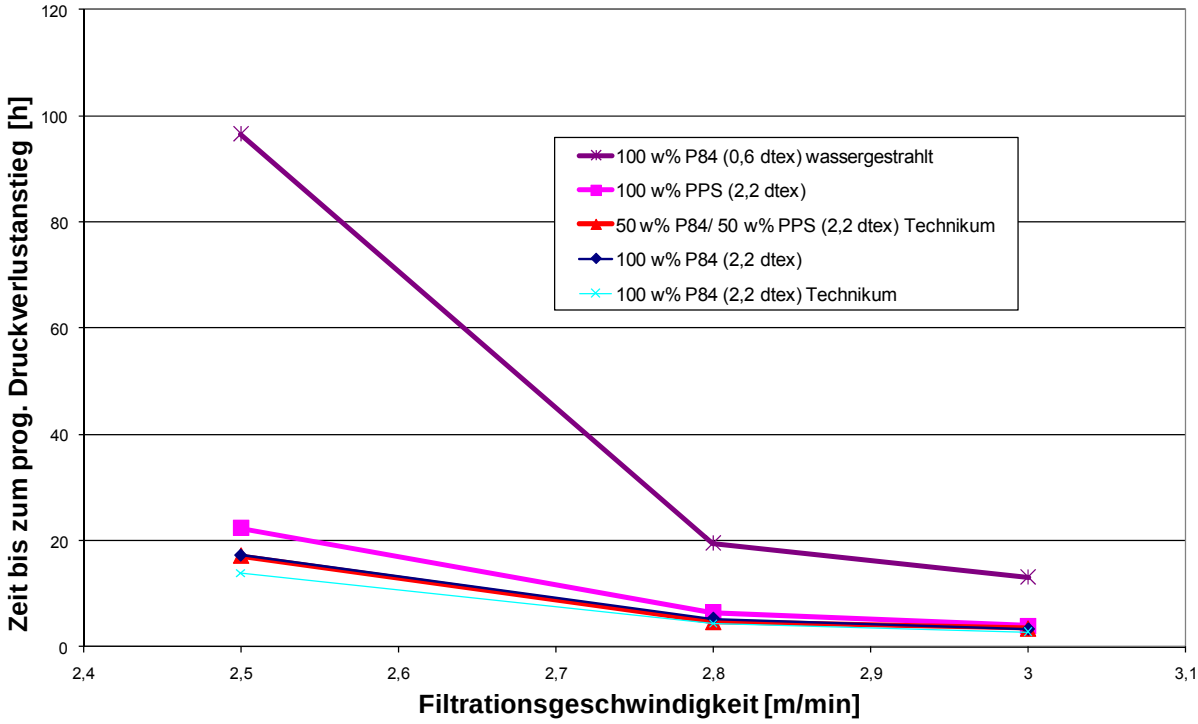


Abb. 107: Alterungskennlinien der untersuchten Filtermedien

Abb. 107 zeigt, dass das wassergestrahlte P84 Filtermedium deutlich höhere Alterungskennwerte besitzt als die anderen Filtermedien. Die höheren und damit besseren Alterungskennwerte sind auf die homogenere Porenstruktur (siehe Abb. 101 bis Abb. 106) zurückzuführen, welche in weiterer Folge zu einer homogeneren Durchströmung des wassergestrahlten P84 - Filtermediums während der Filtration führt bzw. eine effizientere Abreinigung zur Folge hat. Der auf dem Technikumsnadelbrett vernadelte P84 Filz zeigte die niedrigsten und damit schlechteren Alterungskennwerte. Bei den Inhomogenitätsuntersuchungen zeigte dieser Filz ebenfalls die größte Standardabweichung des Porenflächenanteils und die größten mittleren hydraulischen Porenflächen, was auf eine inhomogenere Durchströmung schließen läßt. Abschließend kann gesagt werden, dass eine optimale Porenverteilung aus einer möglichst großen Anzahl an möglichst keinen Poren besteht.

10.3 Zusammenfassung der Ergebnisse des Kapitels 10

Bei der Analyse der Porenflächenverteilungen bzw. der Inhomogenitäten zeigte sich, dass das wassergestrahlte P84 Filtermedium eine relativ hohe Anzahl sehr kleiner Poren im Vergleich zu den analysierten Nadelfilzen besitzt. Dies zeigt sich auch in den schmalen in Richtung kleinerer Poren verschobenen Porenflächenverteilungen. Das wassergestrahlte Filtermedium zeigt weiters sehr hohe und somit gute Alterungskennwerte. Jene Nadelfilze, welche am Technikumsnadelbrett vernadelt wurden, zeigten breitere zu größeren Porenflächen verschobene Porenflächenverteilungen und schlechtere Alterungskennwerte als am Produktionsnadelbrett vernadelte Filtermedien.

11 Interpretation der Filtrationsergebnisse von P84/PPS Mischfaserfilzen mithilfe der Bildanalyse

In Kapitel 11 wird untersucht ob die Bildanalysemethode und die Alterungsversuche für eine vergleichende Beurteilung von Mischfaserfilzen verwendet werden können.
In den folgenden Diagrammen und in der Diskussion wird nur die rohgasseitige-Fasermischung in der Legende aufgeführt, da sich in früheren Untersuchungen herausgestellt hat, dass die Rohgasseite hauptverantwortlich für die Filtrationseigenschaften bei der Abreinigungsfiltration ist [32].

Es wurden die in Tab. 24 aufgeführten P84/PPS - Mischnadelfilze untersucht.

	Rohgasseite		Reingasseite	
Nadelfilz Nr.	P84 2,2 dtex [w%]	PPS 2,2 dtex [w%]	P84 2,2 dtex [w%]	PPS 2,2 dtex [w%]
1	100	0	100	0
2	95	5	100	0
3	90	10	100	0
4	75	25	0	100
5	50	50	0	100
6	25	75	0	100
7	0	100	0	100

Tab. 24: Rohgasseitige und reingasseitige Fasermassenanteile der Versuchsreihe 1

11.1 Ergebnisse der bildanalytischen Untersuchungen

Bei der Porentiefenbestimmung wurden die in Abb. 108 dargestellten Porentiefensummenverteilungen erhalten.

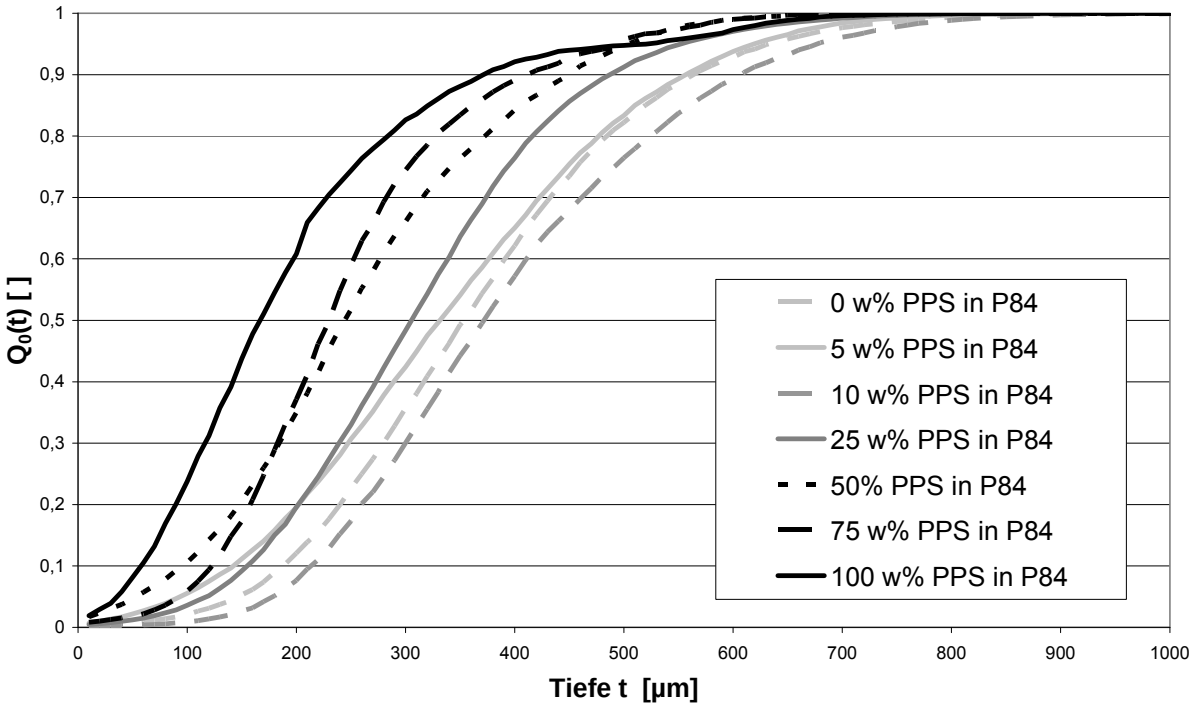


Abb. 108: Porentiefenverteilungssumme der P84/PPS- Mischnadelfilze

Die Oberflächenporositätsanalyse ergab das in Tab. 25 aufgeführte Ergebnis.

w% PPS in P84	Oberflächenporosität [%]
0	17,1
5	17,2
10	16,3
25	15,8
50	13,1
75	12,7
100	7,2

Tab. 25: Veränderung der Oberflächenporosität bei PPS Zumischung zu P84

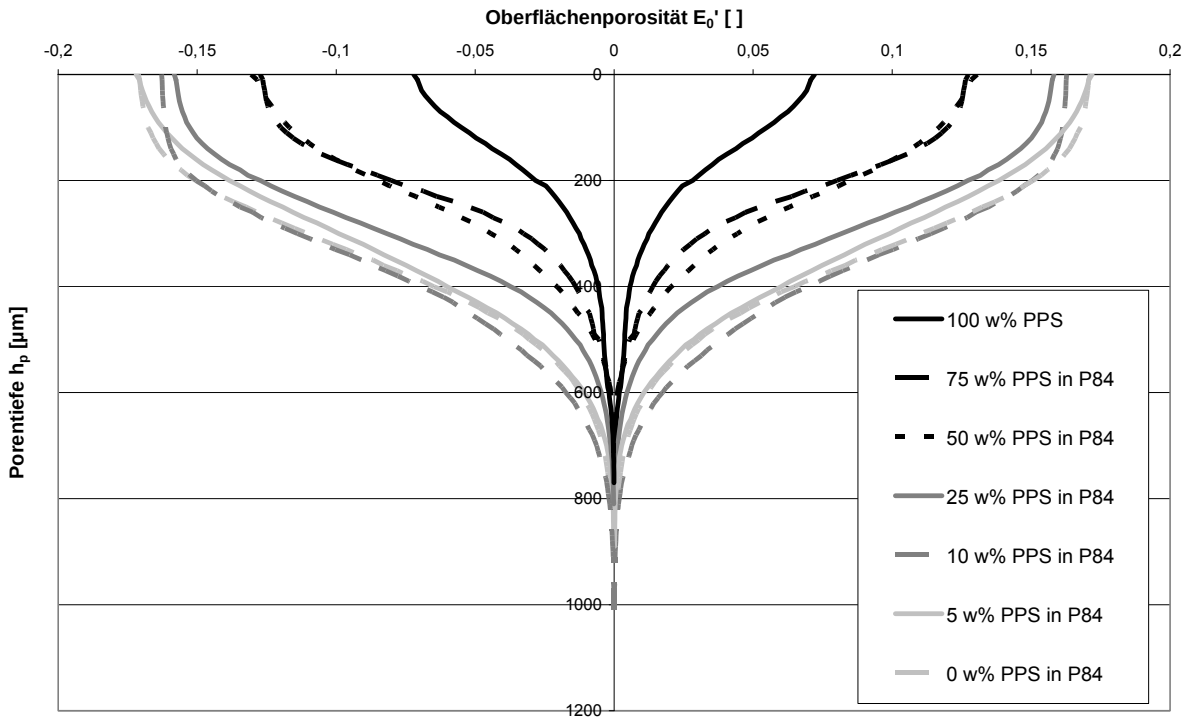


Abb. 109: Modellporen der P84/PPS Mischnadelfilze

In Abb. 109 kann erkannt werden, dass bei zunehmender PPS-Zumischung eine kleinere Modellpore resultiert. Dies kann durch die thermoplastischen Eigenschaften der PPS-Faser erklärt werden, welche im Gegensatz zu den duroplastischen Eigenschaften der P84- Faser stehen. Die thermoplastischen Eigenschaften der PPS-Faser bewirken eine bessere Verdichtung beim Kalanderprozess.

11.2 Ergebnisse der Filterprüfungen am VDI 3926 Typ 2 Filtermittelprüfstand

In Abb. 110 ist die nach 100 Zyklen eingelagerte Reststaubmasse gegen den Massenanteil an PPS Fasern aufgetragen.

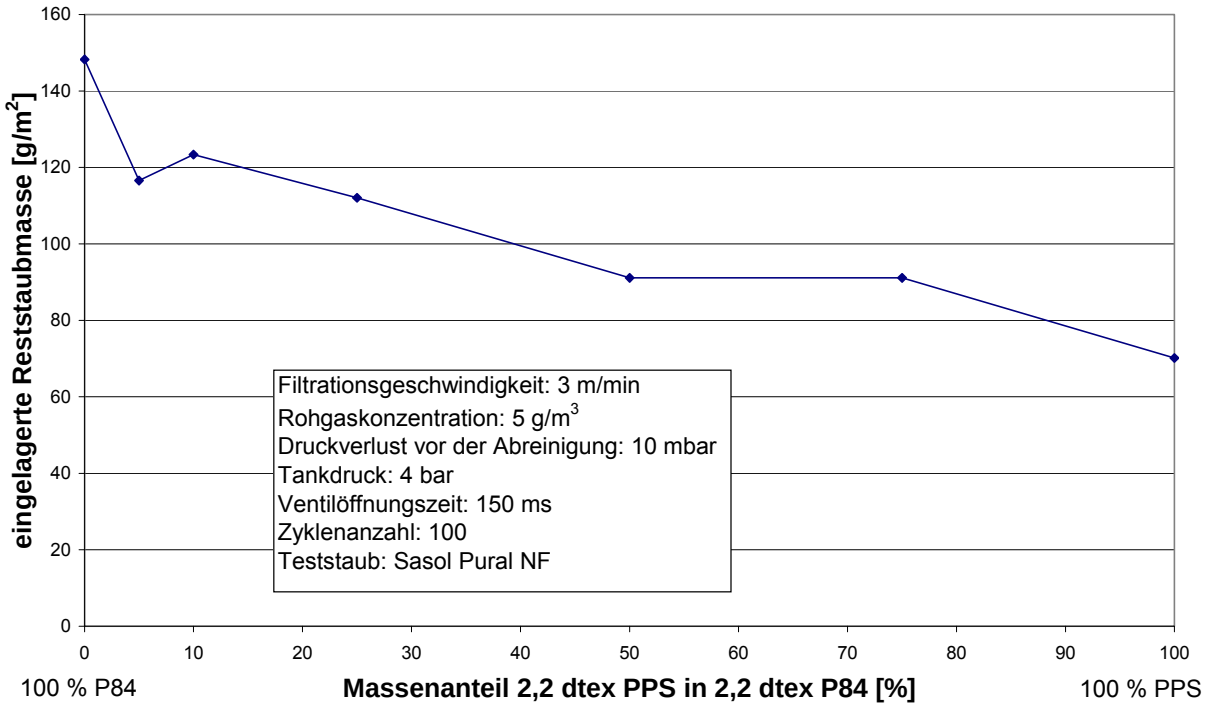


Abb. 110: Abhängigkeit der eingelagerten Reststaubmasse vom Massenanteil an 2,2 dtex PPS Fasern

In Abb. 110 ist ersichtlich, dass bei steigender Zumischung an PPS-Fasern die eingelagerte Reststaubmasse sinkt. Dies steht im Einklang mit der Verkleinerung der Modellpore, welche im Kapitel 11.1, Seite 101 diskutiert wurde. Eine kleinere Modellpore bedeutet eine Verdichtung bzw. Glättung der oberflächennahen Faser-Schicht, dies bedeutet wiederum eine geringere Anzahl an Haftpunkten für den Staubkuchen am Filtermedium. Weiters wird durch eine Glättung des Oberflächenreliefs auch das Vordringen des Staubes in die Tiefe erschwert.

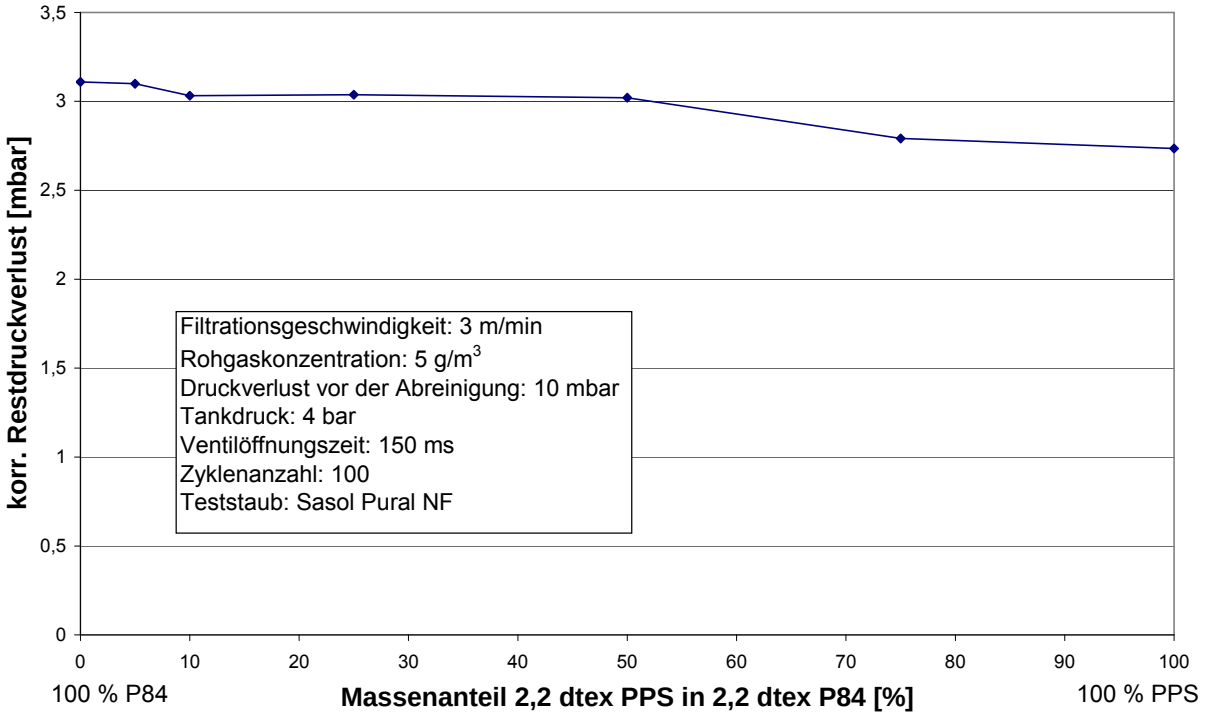


Abb. 111: Abhängigkeit des korrigierten Restdruckverlusts vom Massenanteil an PPS- Fasern

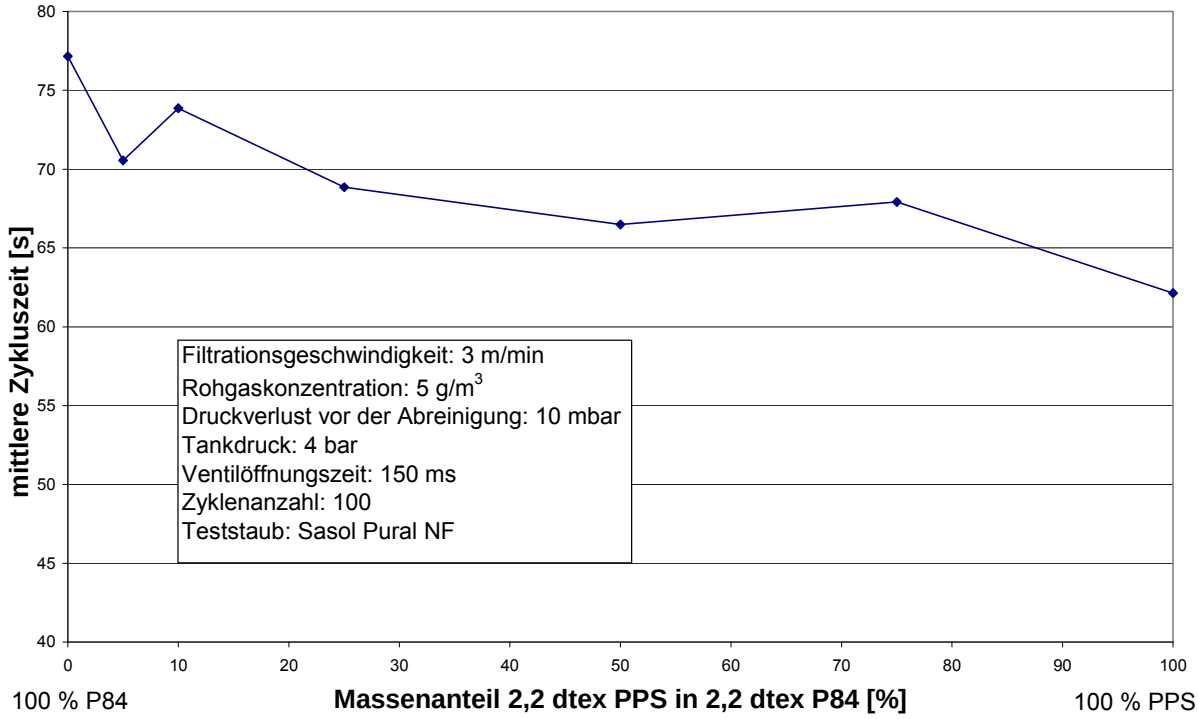


Abb. 112: Abhängigkeit der mittleren Zykluszeit vom Massenanteil an PPS- Fasern

Abb. 111 zeigt, dass der korrigierte Restdruckverlust bei höherem Massenanteil an PPS Fasern leicht abnimmt. Dies ist auf die Verkleinerung der Modellpore bzw. der Porentiefenverteilung zurückzuführen, welche im Kapitel 11.1, Seite 101 diskutiert wurde. Abb. 112 zeigt, dass die mittlere Zykluszeit bei größeren PPS Massenanteilen abnimmt. Dies ist u. a. auf einen größeren Tiefenfiltrationsanteil der Nadelfilze mit größerer Modellpore während der ersten Zyklen zurückzuführen. Der größere Tiefenfiltrationsanteil bedingt einen geringen Druckverlustanstieg während der ersten Zyklen und dadurch eine lange Zykluszeit zu Beginn des Versuchs, welche den Mittelwert der Zykluszeiten stark beeinflußt.

Eine Zumischung von PPS Fasern zu P84 Nadelfilzen bedingt eine Verkleinerung der Modellpore und dadurch eine geringere Reststaubmasseneinlagerung, welche für die Filtration vorteilhaft ist.

11.3 Vergleich der Alterungsergebnisse von P84/PPS-Mischfaserfilzen

Im Rahmen der Alterungsversuche mit P84/PPS Mischfilzen [84] wurden folgende Nadelfilze untersucht:

Nadelfilz Nummer	P84 2,2 dtex [w%]	PPS 2,2 dtex [w%]
1	100	0
2	50	50
3	0	100

Tab. 26: Rohgasseitige Fasermischung der Nadelfilze

Für die Alterungsversuche an der Alterungskammer wurden die in Tab. 27 aufgeführten Versuchsbedingungen gewählt.

Rohgaskonzentration	5 g/m^3
Filtrationsgeschwindigkeit	2,5 m/min
Zykluszeit	100 s
Abreinigungstankdruck	5 bar
Ventilöffnungszeit	60 ms
Teststaub	Sasol Pural NF

Tab. 27: Gewählte Versuchsbedingungen für die Alterungsversuche

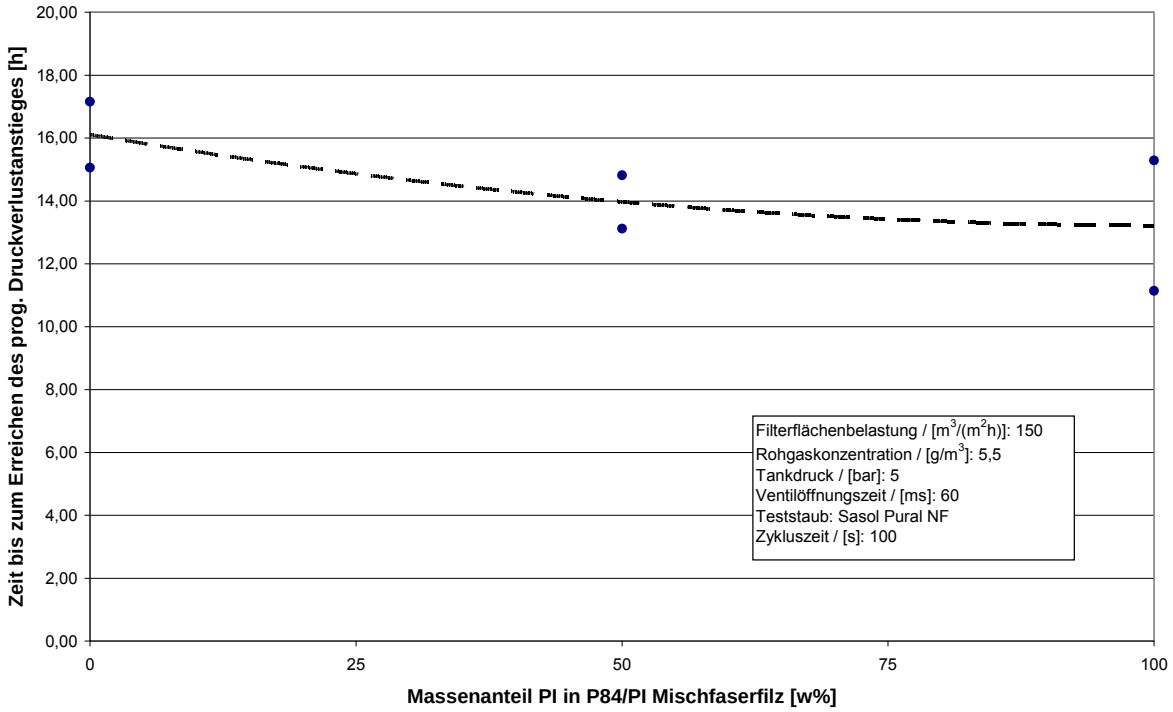


Abb. 113: Zeitabhängigkeit des extremen Druckverlustanstiegs vom P84 Massenanteil bei 2,5 m/min Filtrationsgeschwindigkeit

In Abb. 113 ist ersichtlich, dass der progressive Druckverlustanstieg bei größeren P84 Massenanteilen etwas früher auftritt. Dieser Trend kann auf die größeren Modellporen und Porentiefen (siehe Abb. 108 und Abb. 109) der Nadelfilze mit größerem P84 Massenanteil zurückgeführt werden, da PPS Fasern durch die thermoplastischen Eigenschaften besser kalandriert werden können. Die offenere Porenstruktur bedingt eine vermehrte Partikeleinlagerung, welche in Abb. 114 anhand der größeren eingelagerten Reststaubmassen bei Nadelfilzen mit höherem P84 Massenanteil sichtbar ist.

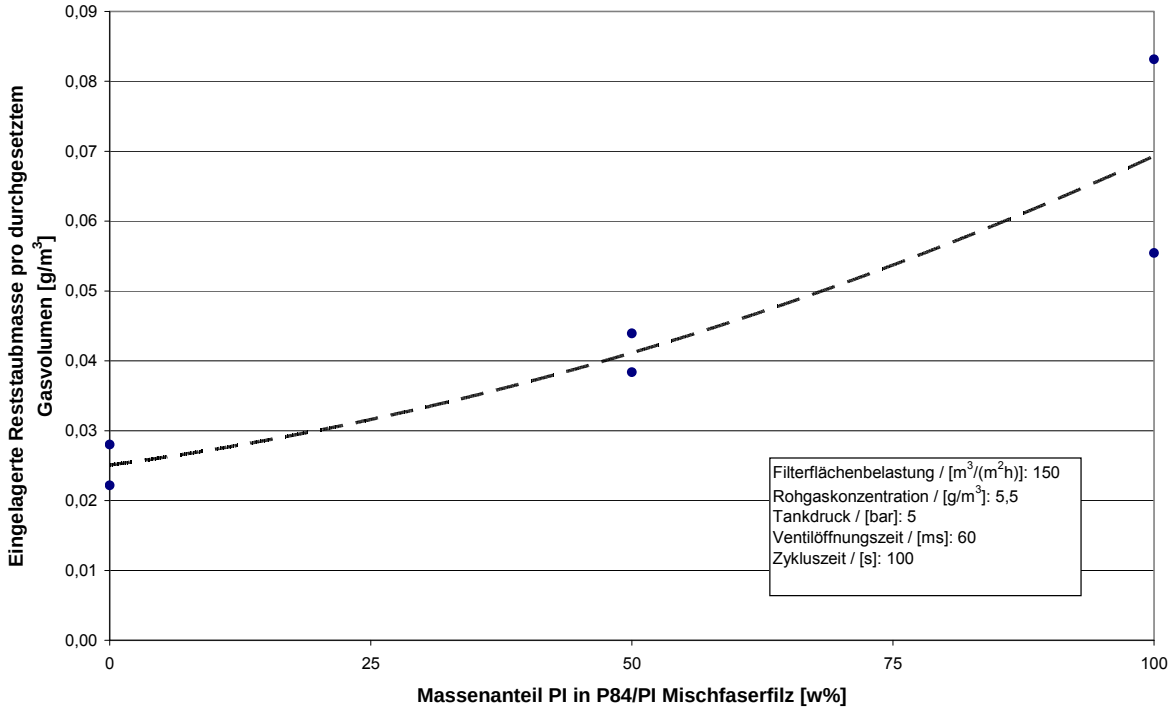


Abb. 114: Eingelagerte Reststaubmassen in Abhängigkeit von P84 Massenanteil bei 2,5 m/min Filtrationsgeschwindigkeit

11.4 Zusammenfassung der Ergebnisse des Kapitels 11

Durch die Bildanalyse und die Alterungsversuche konnte eine vergleichende Beurteilung der Mischnadelfilze durchgeführt werden.
Es zeigte sich, dass durch die Zumischung von PPS Fasern zu P84 Nadelfilzen die Modellpore verkleinert werden kann. Dies ist auf die thermoplastischen Eigenschaften der PPS Fasern zurückzuführen, welche deshalb beim Kalanderprozess besser verdichtet werden können. Die kleineren Modellporen bedingen eine geringere mittlere Reingaskonzentration, eine geringere eingelagerte Reststaubmasse und eine leichte Abnahme des korrigierten Restdruckverlusts bei Tests am VDI 3926 Typ 2 Filtermittelprüfstand. Die mittlere Zykluszeit vergrößerte sich nicht, da durch den größeren Tiefenfiltrationsanteil bei größerer Modellpore hohe Zykluszeiten zu Beginn der Filtration resultieren, welche den Zykluszeitmittelwert stark beeinflussen. Bei den Alterungsversuchen zeigte sich eine leichte Zunahme des Alterungskennwerts bei höherem PPS-Massenanteil, welche auf die kleineren Modellporen und die damit verbundene geringere Filterverstopfung zurückgeführt werden kann. Die größere Verstopfung bei größeren P84-Massenanteilen spiegelt sich auch in den größeren eingelagerten Reststaubmassen pro durchgesetztem Gasvolumen wieder.

12 Auswirkung der Faserfeinheit auf die Filtrationseigenschaften

In Kapitel 12 wird untersucht ob die Bildanalysemethode, die VDI 3926 Filtermittelprüfungen und die Alterungsmethode für eine vergleichende Beurteilung von Filzen mit Feinfaserzumischung verwendet werden können.

12.1 Vergleich von Mischfasernadelfilzen aus P84 2,2 dtex und P84 1,0 dtex Fasern

Es wurden die in Tab. 28 aufgeführten Nadelfilze untersucht.

	Rohgasseite		Reingasseite
Nadelfilz Nr.	P84 2,2 dtex [w%]	P84 1,0 dtex [w%]	P84 2,2 dtex [w%]
14	100	0	100
15	70	30	100
16	50	50	100
17	30	70	100
18	0	100	100

Tab. 28: Nadelfilze der Versuchsreihe 4

12.1.1 Ergebnisse der Bildanalyse

Mit Hilfe der Bildanalyse wurden die Porenflächenverteilungen der Nadelfilze bestimmt (Abb. 115).

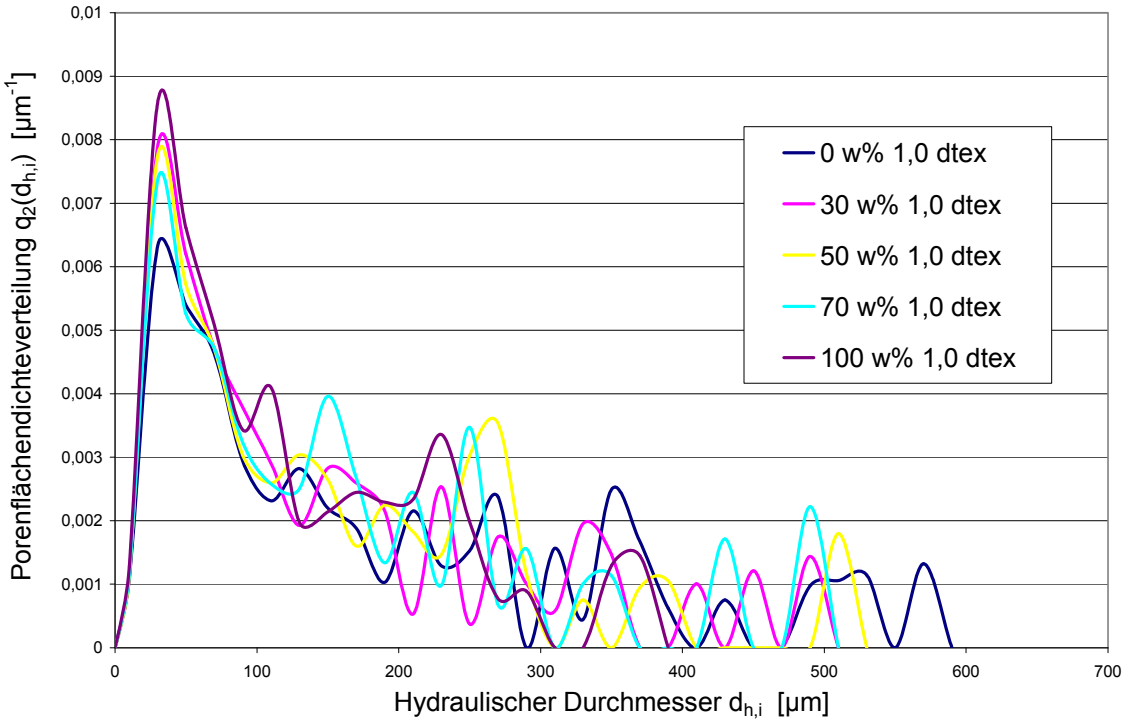


Abb. 115: Porenflächendichteverteilungen der in Versuchsreihe 4 untersuchten Mischfasernadelfilze

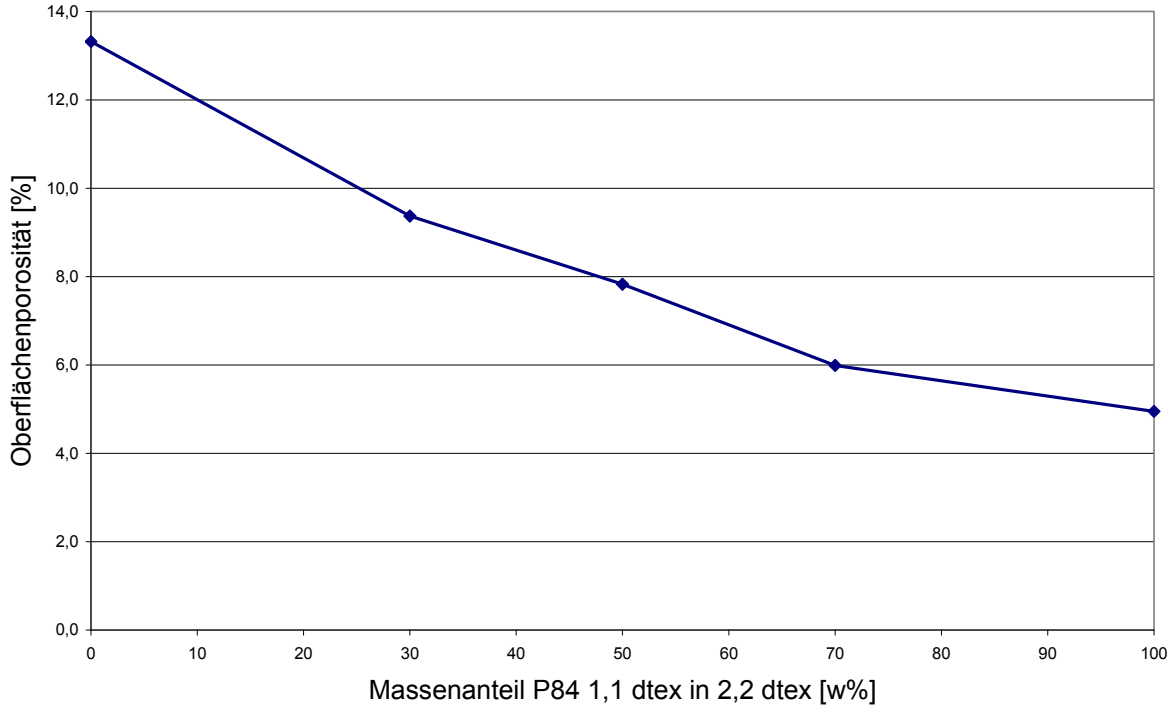


Abb. 116: Oberflächenporositäten der Nadelfilze mit P84 Feinfaserzumischung

In Abb. 115 ist ersichtlich, dass die Nadelfilze mit größeren Feinfaseranteilen eine größere Verteilungsdichte im Bereich der kleineren Poren besitzen und eine geringere Verteilungsdichte im Bereich der größeren Poren. In Abb. 116 ist ersichtlich, dass Nadelfilze mit größerem P84 Feinfasermassenanteil geringere Oberflächenporositäten besitzen als Nadelfilze mit kleineren P84 Feinfasermassenanteilen.

12.1.2 Ergebnisse der Filterprüfungen am VDI 3926 Typ 2 Filtermittelprüfstand

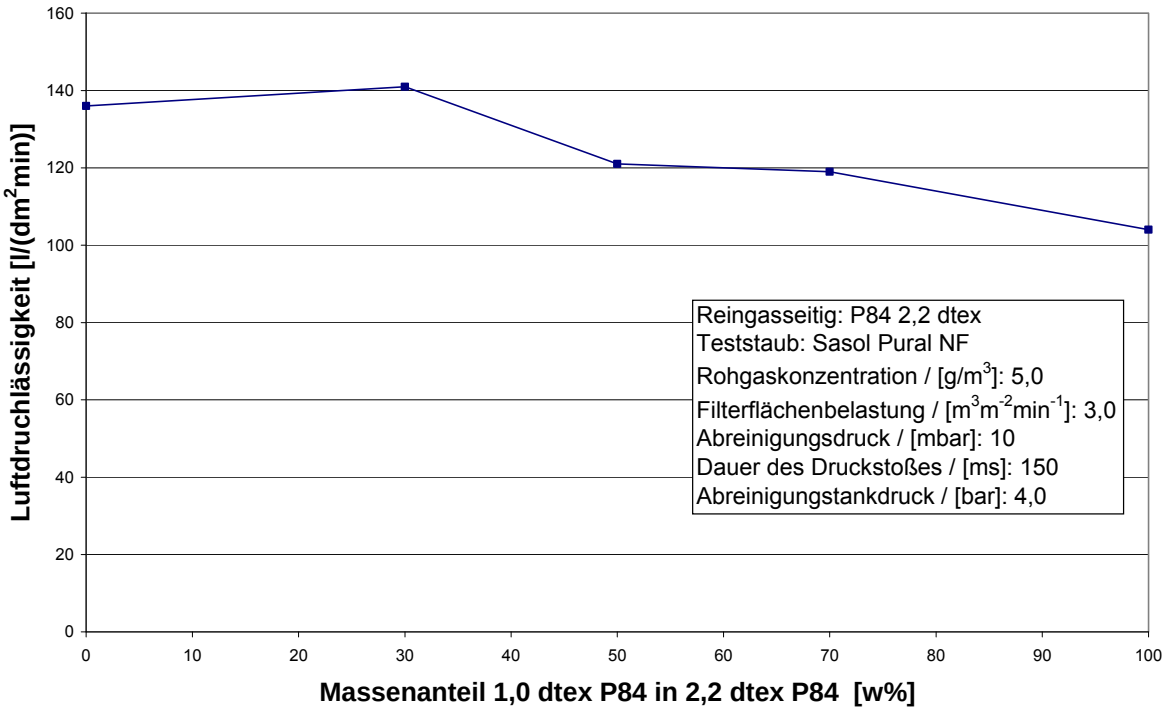


Abb. 117: Abhängigkeit der Luftdurchlässigkeit vom P84 Feinfasermassenanteil

In Abb. 117 ist ersichtlich, dass die Luftdurchlässigkeit mit steigendem Massenanteil an P84 Feinfasern sinkt. Dieses Ergebnis ist auf die geringeren Oberflächenporositäten (siehe Abb. 116) bei größeren P84 Feinfasermassenanteilen zurückzuführen.

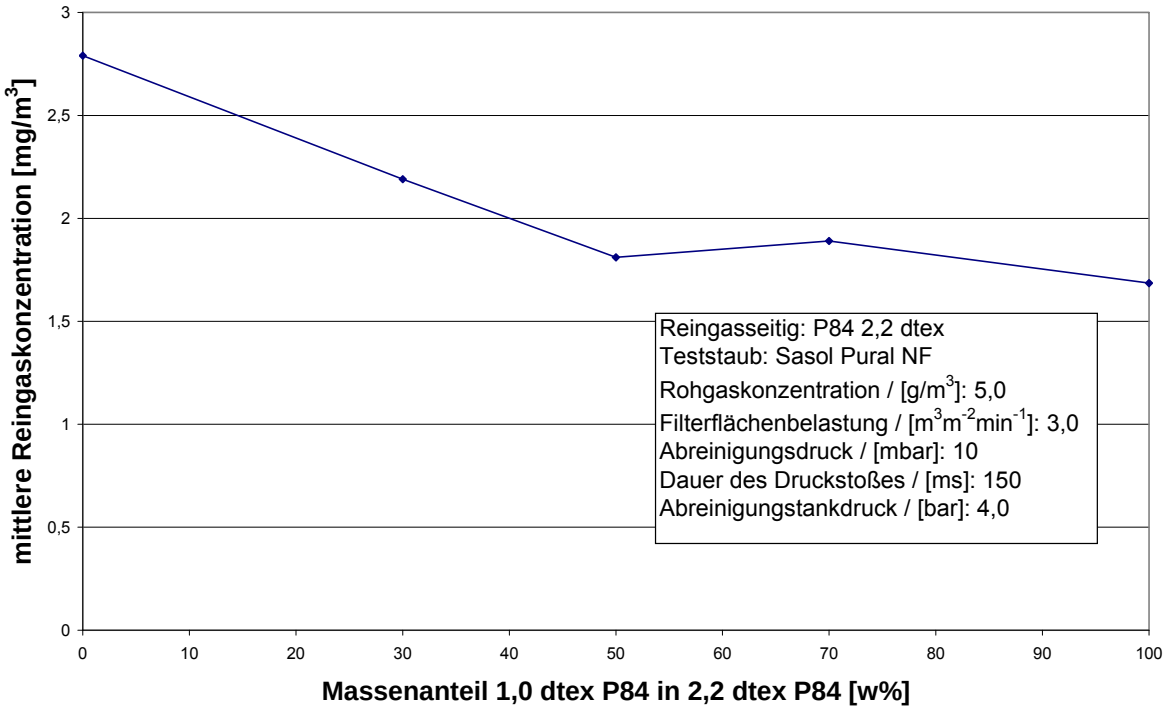


Abb. 118: Abhängigkeit der mittleren Reingaskonzentration vom P84 Feinfasermassenanteil

Die mittlere Reingaskonzentration in Abb. 118 nimmt bei steigendem P84 Feinfasermassenanteil deutlich ab. Dies ist auf die zu kleineren Poren verschobene Porenflächendichteverteilung zurückzuführen (siehe Abb. 115)

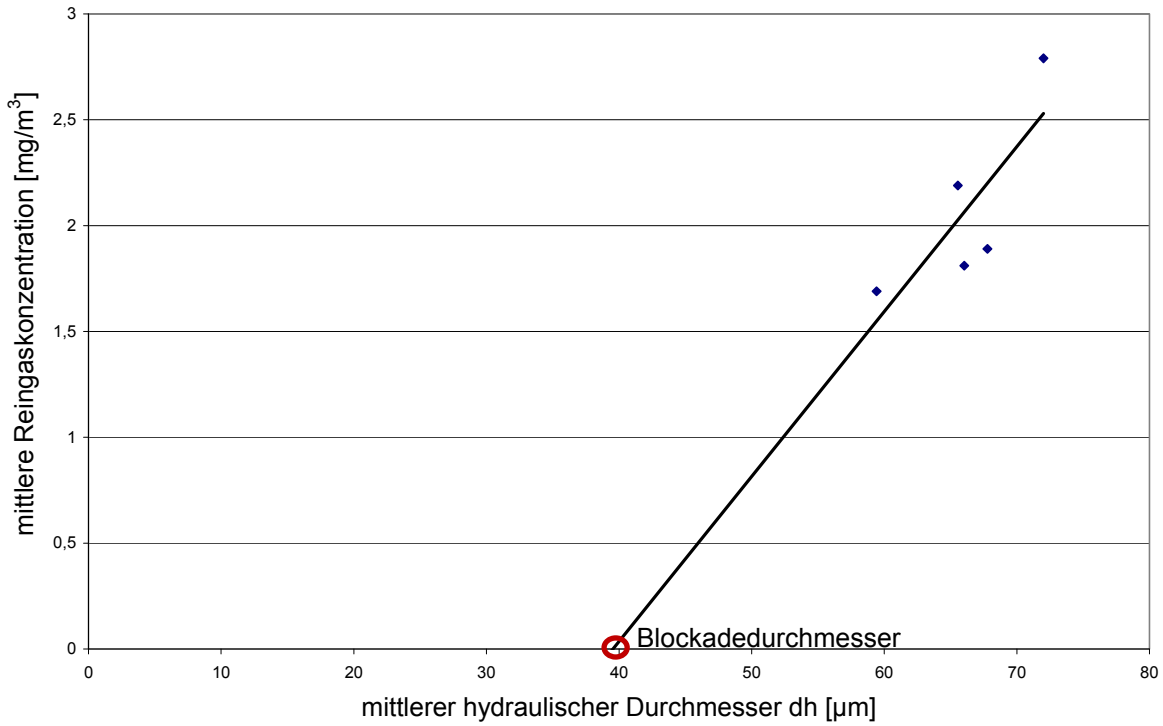


Abb. 119: Korrelation zwischen der mittleren Reingaskonzentration und dem mittleren hydraulischen Porendurchmesser

In Abb. 119 ist ersichtlich, dass bei größerem mittleren hydraulischen Porendurchmesser eine größere mittlere Reingaskonzentration resultiert. Der Schnittpunkt der extrapolierten Trendlinie mit der Abszisse zeigt jenen mittleren hydraulischen Durchmesser unterhalb dessen kein Staubdurchtritt mehr stattfinden sollte [30]. Bei den analysierten Nadelfilzen liegt dieser mittlere hydraulische Durchmesser bei ca. 40 µm. Aus den Versuchsergebnissen kann deshalb geschlossen werden, dass für den Partikeldurchtritt kleinere Poren eine untergeordnete Rolle spielen.

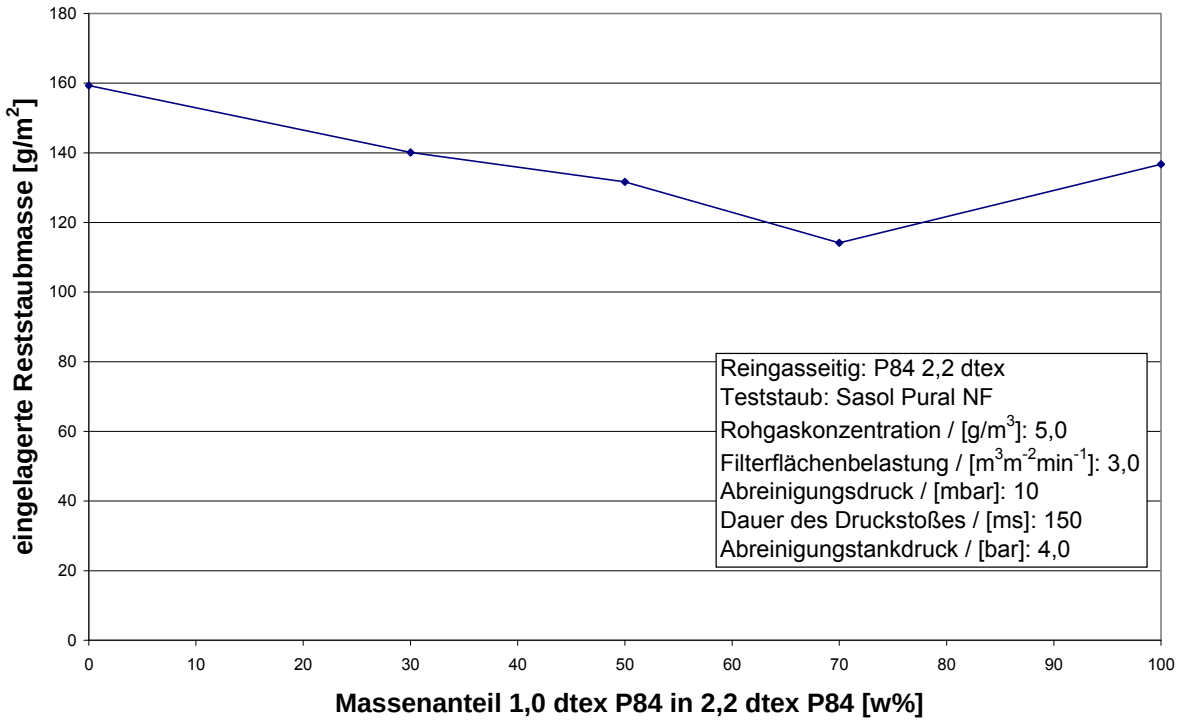


Abb. 120: Abhängigkeit der eingelagerten Reststaubmasse vom P84 Feinfasermassenanteil

Die eingelagerte Reststaubmasse sinkt mit steigendem P84 Feinfasermassenanteil, welches durch die Verschiebung der Porenflächenverteilung zu kleineren Poren begründet werden kann.

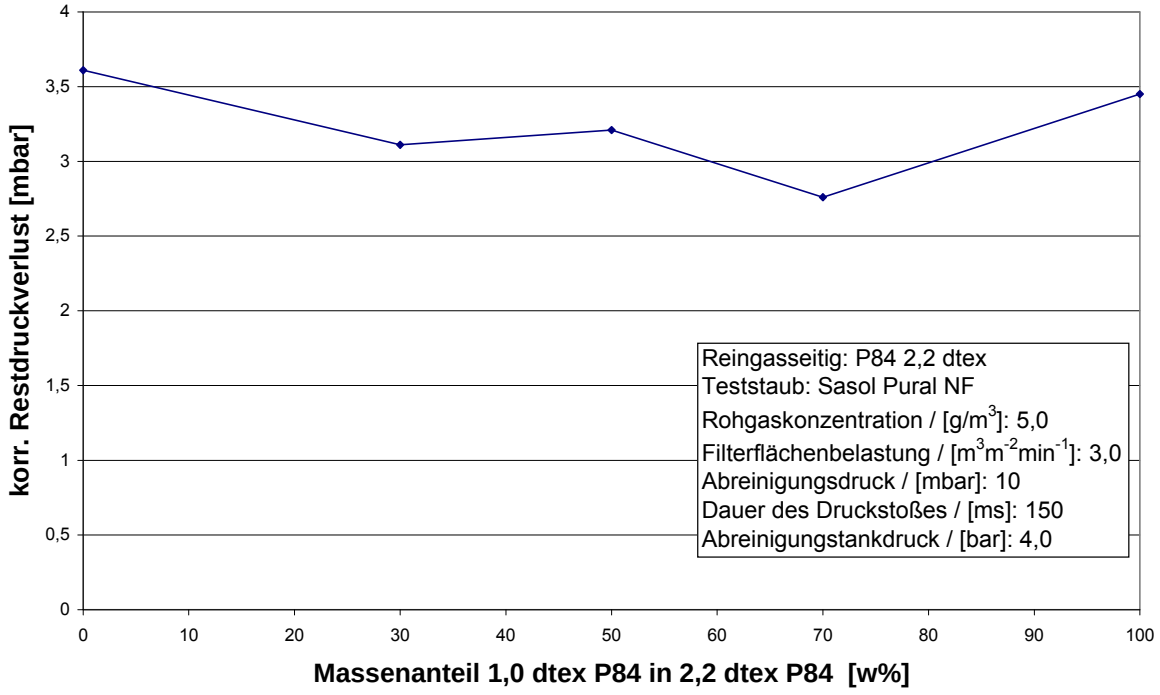


Abb. 121: Abhängigkeit des korrigierten Restdruckverlusts vom P84 Feinfasermassenanteil

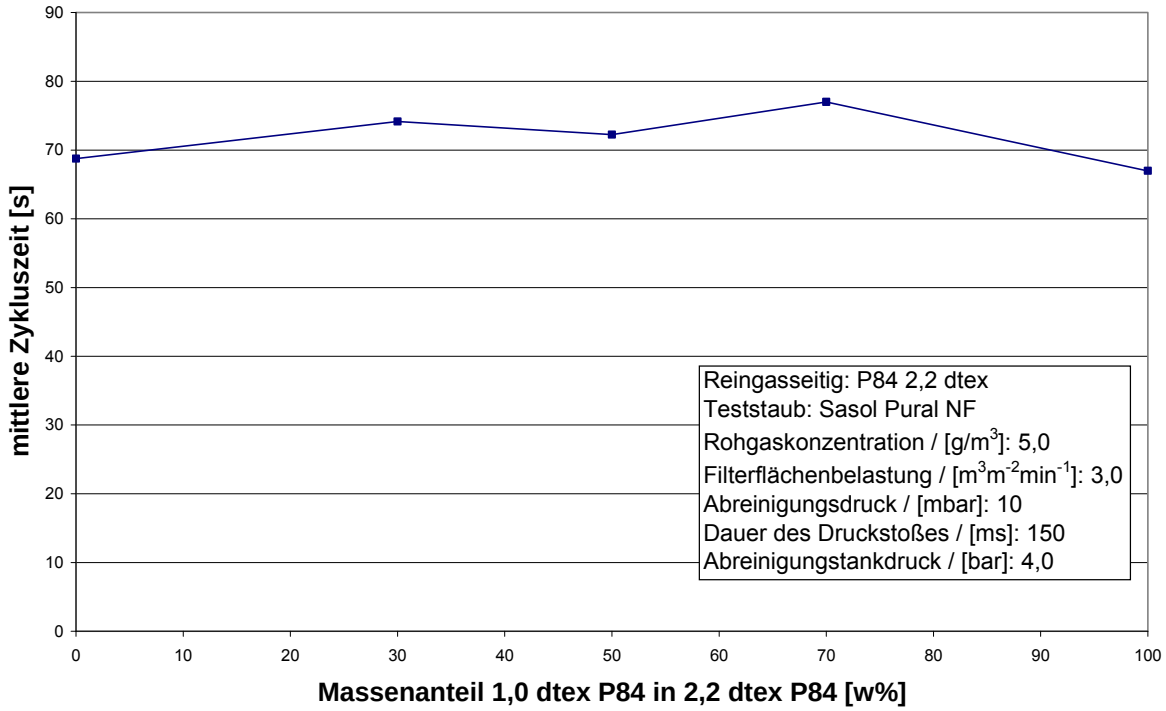


Abb. 122: Abhängigkeit der mittleren Zykluszeit vom P84 Feinfasermassenanteil

Aus der in Abb. 121 bzw. Abb. 122 dargestellten Abhängigkeit des korrigierten Restdruckverlusts bzw. der mittleren Zykluszeit vom P84 Feinfasermassenanteil kann kein Trend abgelesen werden. Um eindeutigere Aussagen zum Druckverlustverhalten machen zu können, müssen Langzeitversuche durchgeführt werden, da insbesondere die ersten 100 Zyklen stark von der Tiefenfiltration beeinflußt werden.

Durch die Zumischung von P84 Feinfasern zu P84 2,2 dtex Nadelfilzen konnte die mittlere Reingaskonzentration reduziert werden. Weiters wurde durch die Feinfaserzumischung die Luftdurchlässigkeit verringert.

12.2 Vergleich von P84-Nadelfilzen unterschiedlicher Faserfeinheit und Verfestigung

In Versuchsreihe 3 wurde ein P84 2,2 dtex Standardfilz mit einem P84 Filz mit 1,0 dtex Feinfaserauflage und einem wassergestrahlten P84 Feinfaserfilz verglichen.

	Rohgasseite			Reingasseite
Filz Nr.	P84 2,2 dtex [w%]	P84 1,0 dtex [w%]	P84 0,6 dtex [w%]	P84 2,2 dtex [w%]
11	100			100
12		100		100
13*			100	100

*wasserstrahlverfestigt

Tab. 29: Rohgasseitige und reingasseitige Fasermassenanteile der Versuchsreihe 3

12.2.1 Ergebnisse der bildanalytischen Untersuchungen

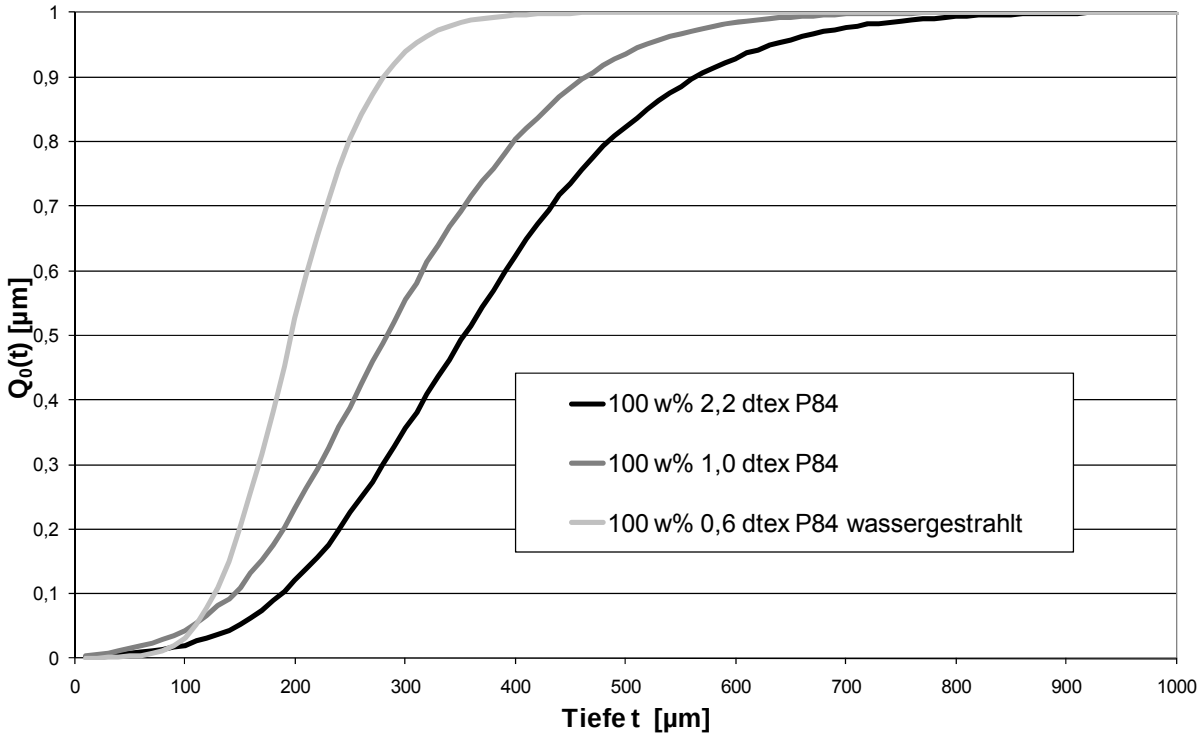


Abb. 123: Porentiefenverteilungssumme der Nadelfilze mit unterschiedlicher P84-Faserfeinheit und unterschiedlicher Verfestigung

Filtermittel	Oberflächenporosität [%]
100 w% 2,2 dtex P84	17,1
100 w% 1,0 dtex P84	14,6
100 w% 0,6 dtex P84 wassergestrahlt	7,0

Tab. 30:Oberflächenporositäten der Versuchsreihe 3

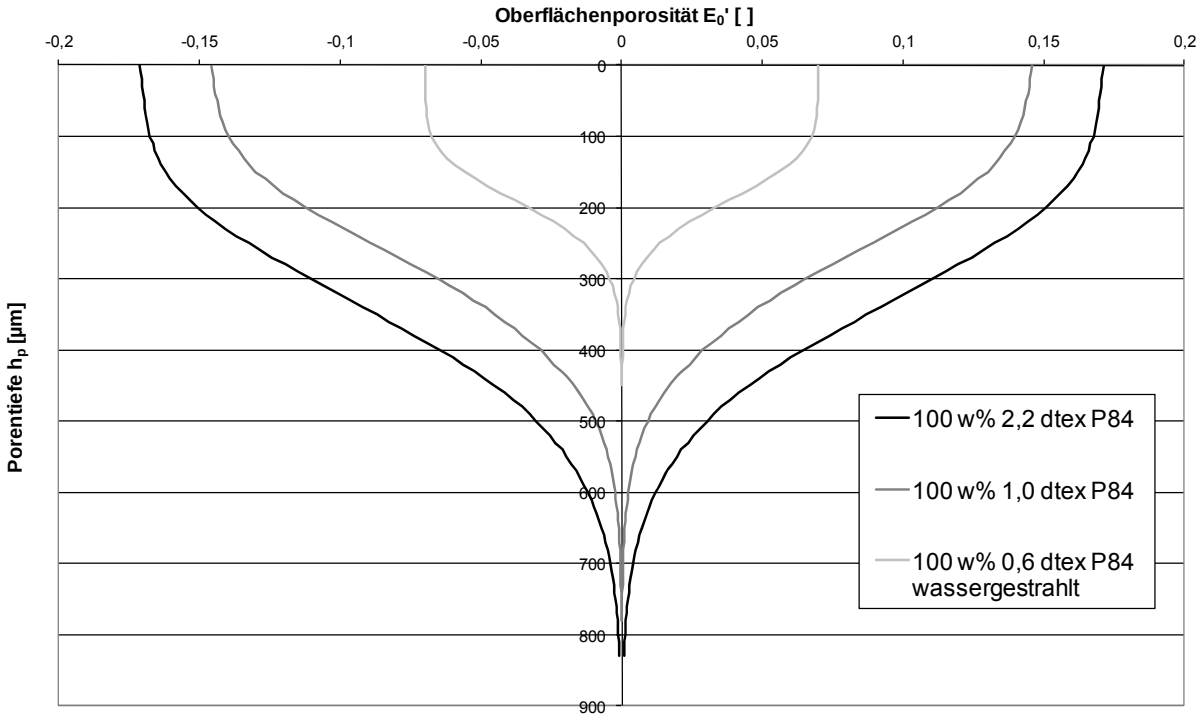


Abb. 124: Modellporen der Nadelfilze mit unterschiedlicher P84- Faserfeinheit und unterschiedlicher Verfestigung

In Abb. 123, Abb. 124 und Tab. 30 kann erkannt werden, dass die rohgasseitige Feinfaserauflage nur eine geringe Verkleinerung des Porentiefenmittelwerts, der Oberflächenporosität und der Modellpore bedingt. Deutlich können der Porentiefenmittelwert, die Oberflächenporosität und die Modellpore durch eine Wasserstrahlverfestigung einer Feinfaserauflage verkleinert werden.

12.2.2 Ergebnisse der Filterprüfung am VDI 3926 Typ 2 Filtermittelprüfstand

Die Ergebnisse der Filterprüfung der Versuchsreihe 3 sind in Tab. 31 dargestellt.

		100 w% 2,2 dtex P84	100 w% 1,0 dtex P84	100 w% 0,6 dtex P84 wassergestrahlt
Reststaubmasse	[g/m^2]	148	114	41
korrigierter Restdruckverlust	[mbar]	3,1	2,9	2,9
mittlere Reingaskonzentration	[mg/m^3]	3,4	1,7	0,3
mittlere Filtrationszyklusdauer	[s]	77	76	106
Luftdurchlässigkeit [200 Pa]	[l/(dm^{2}min)]	150	105	54

Tab. 31: Filtrationskenngrößen der Versuchsreihe 3

Der wassergestrahlte Filz besitzt im Gegensatz zu den beiden Nadelfilzen eine stark zu kleineren Tiefen verschobene Porentiefenverteilung und eine kleinere Modellpore (sieheAbb. 124, Seite 115). Dies spiegelt sich auch in den Filtrationskenngrößen wie der Reststaubmasse, der mittleren Reingaskonzentration und der Luftdurchlässigkeit wieder, welche im Vergleich zu den Nadelfilzen deutlich niedrigere Werte zeigen. Die mittlere Filtrationszyklusdauer des wassergestrahlten Filzes ist um ca. 30% länger und somit besser als jene der Nadelfilze. Der korrigierte Restdruckverlust der Nadelfilze und des wassergestrahlten Filzes ist etwa gleich.

Die deutliche Verbesserung der mittleren Zykluszeit, der Reststaubmasse und der Reingaskonzentration ist auf die relativ starke Verdichtung der Oberfläche zurückzuführen. Dadurch wird eine schnelle Kuchenbildung und eine bessere Abreinigung erreicht, welche in Summe den Anteil der Kuchenfiltration deutlich erhöht. Die Verwendung von 0,6 dtex Fasern für die Faserauflage ist ebenfalls ein Grund für die niedrige und somit bessere Reingaskonzentration, da sie feinere Porenstrukturen zur Folge hat.

12.3 Vergleich von industriell eingesetzten P84 Feinfaserfiltermedien unterschiedlicher Hersteller

Es wurden die P84- Feinfaserfilze von vier unterschiedlichen Herstellern verglichen.

12.3.1 Ergebnis der bildanalytischen Untersuchungen

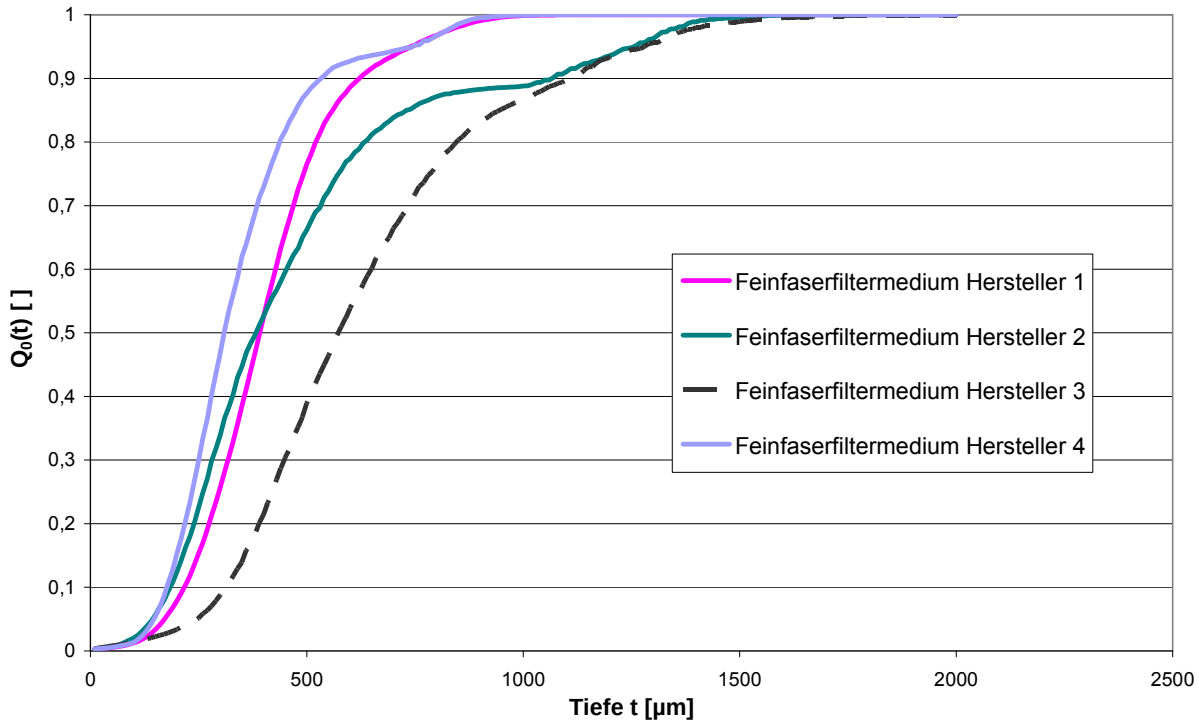


Abb. 125: Porentiefenverteilungen der untersuchten Feinfaserfilze

In Abb. 125 ist ersichtlich, dass die Porentiefenverteilungen der untersuchten Feinfaserfilze je nach Hersteller stark in ihrem $hp_{50,0}$ Wert schwanken. Dies kann zurückgeführt werden auf unterschiedliche Vernadelung, unterschiedliche Feinfaser/Grobfaser-Mischungen und unterschiedliche Nachbehandlungen. Das Feinfaserfiltermedium des Herstellers 4 besitzt die geringsten $hp_{50,0}$-Werte, welche auf eine sehr homogene und dichte Oberflächenstruktur mit einer geringen Anzahl an verbliebenen Nadeleinstichlöchern schließen lassen.

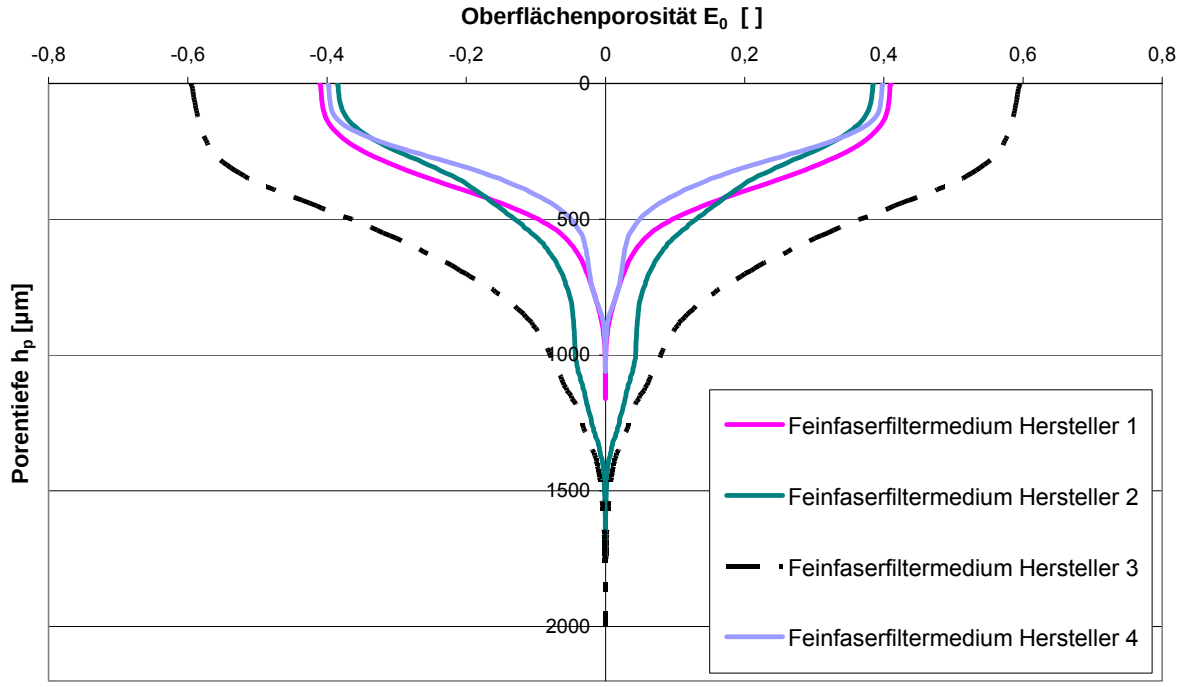


Abb. 126: Modellporen der untersuchten Feinfaserfilze

Abb. 126 zeigt, dass das Feinfaserfiltermedium des Herstellers 3 die deutlich größten Modellporen im Vergleich zu den anderen Nadelfilzen besitzt.

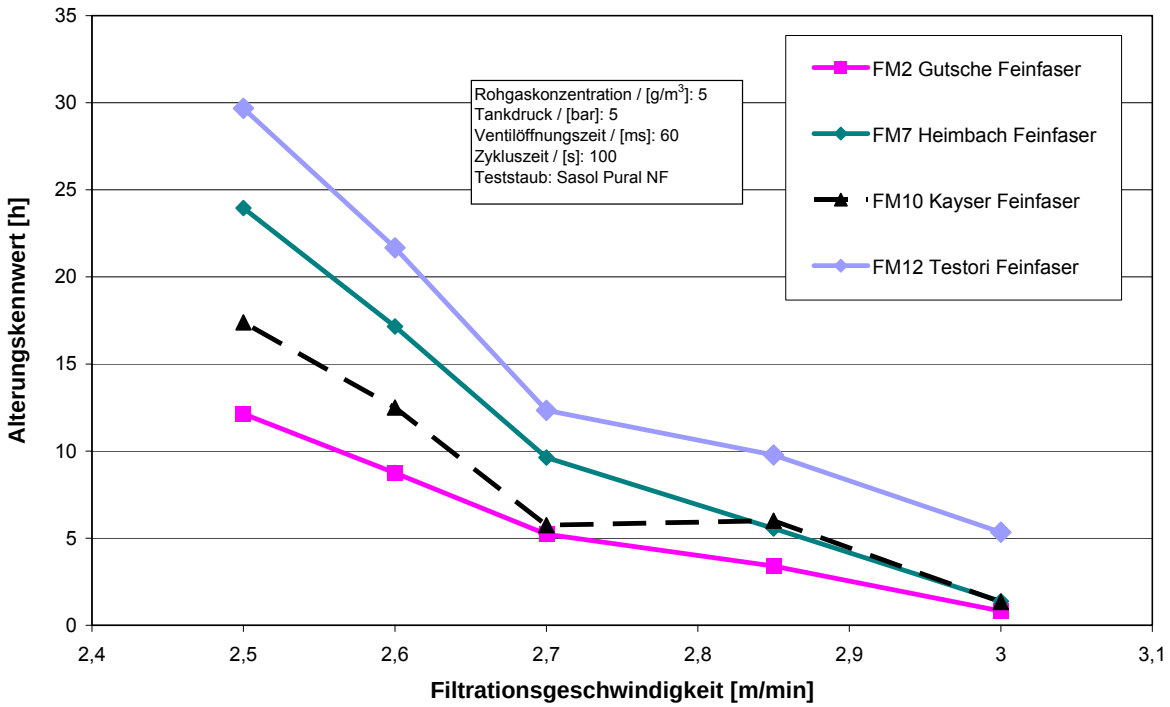


Abb. 127: Alterungskennlinien der Feinfaserfilze

In Abb. 127 ist ersichtlich, dass das Feinfaserfiltermedium des Herstellers 4 die größten Alterungskennwerte besitzt. Dieses Filtermedium zeichnete sich auch durch die kleinsten $hp_{50,0}$ Werte und durch eine sehr kleine Modellpore aus.

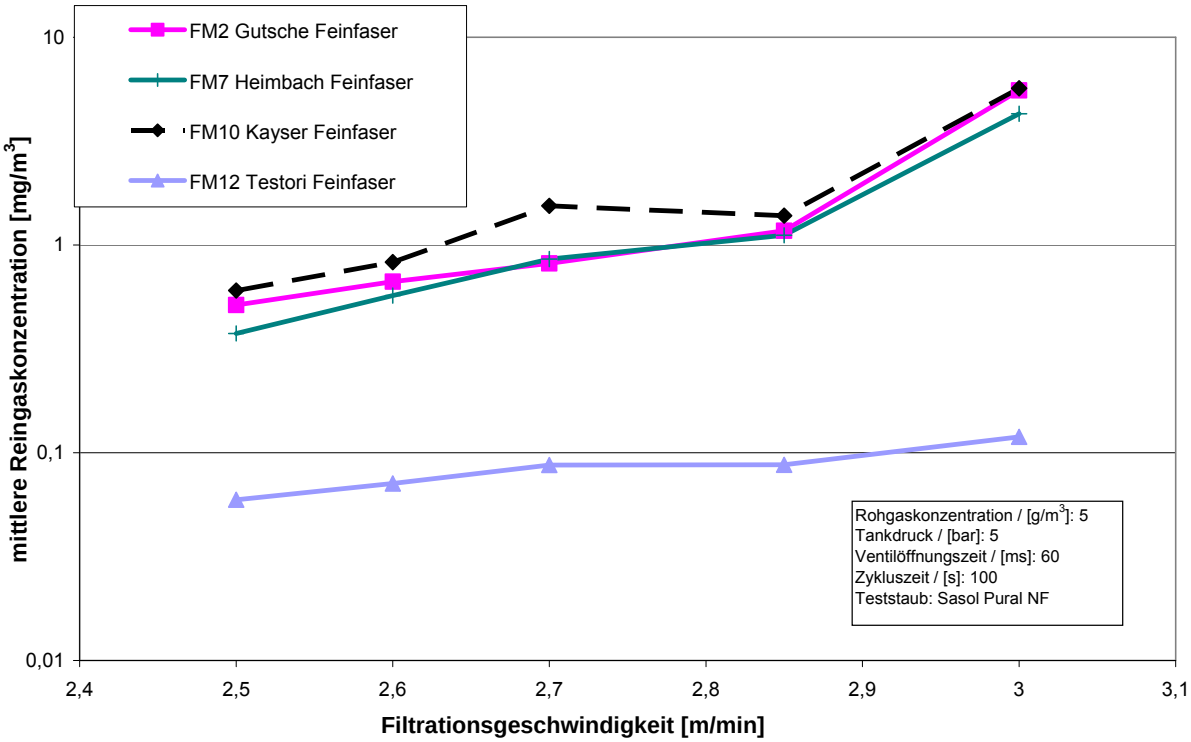


Abb. 128: Mittlere Reingaskonzentrationen der Feinfaserfilze

Das Feinfaserfiltermedium des Herstellers 4 zeichnet sich ebenfalls durch stark erniedrigte mittlere Reingaskonzentrationen aus. Diese sind auf die feineren Porenstrukturen der Feinfaserauflage in Kombination mit einer sehr guten Vernadelung und Nachbehandlung zurückzuführen, welche sich in den geringeren $hp_{50,0}$ Werten der Porentiefenverteilung manifestiert.

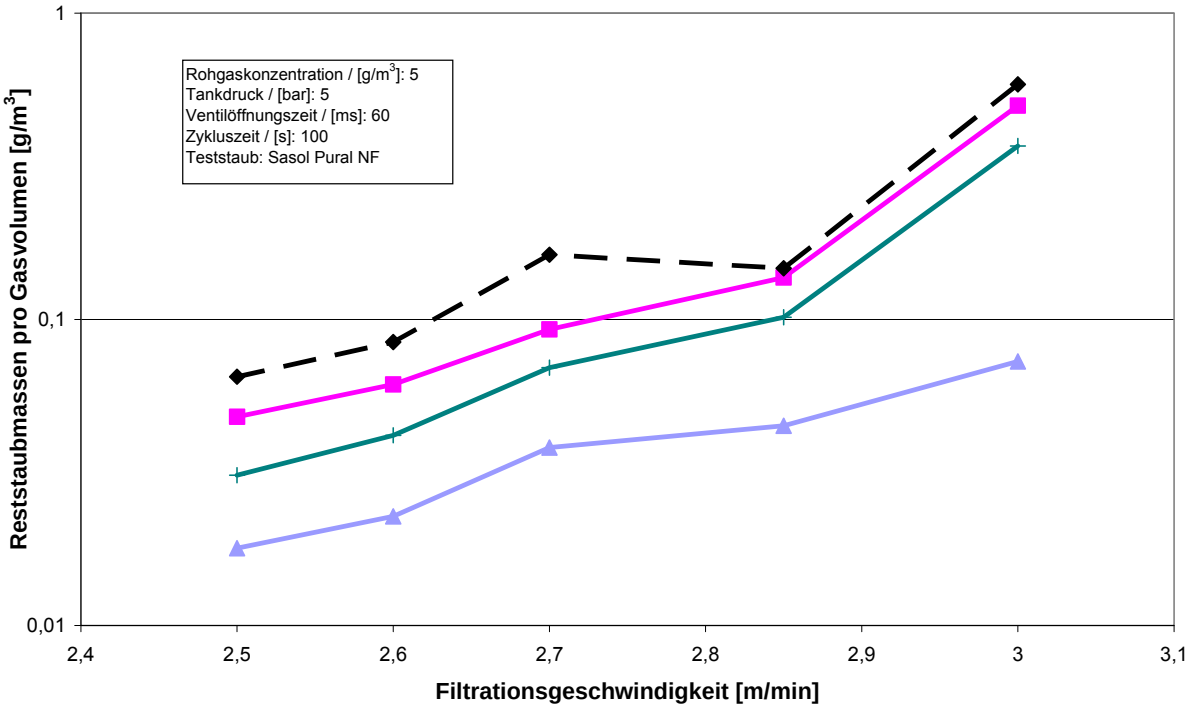


Abb. 129: Reststaubmassen der Feinfaserfilze

In Abb. 129 ist ersichtlich, dass das Filtermedium des Herstellers 3 mit der größten Modellpore auch die größten eingelagerten Reststaubmassen besitzt.

12.4 Zusammenfassung der Ergebnisse des Kapitels 12

Mithilfe der Bildanalyse, der VDI 3926 Filterprüfungen und der Alterungsversuche konnte eine vergleichende Beurteilung von Filzen mit Feinfaserzumischung durchgeführt werden. Die Filterprüfungsergebnisse konnten mit Hilfe der Bildanalyse interpretiert werden.

13 Untersuchung der Faserverbundstabilität (Faserlockerung) an der Filtermitteloberfläche

In Kapitel 13 wird mit Hilfe der automatisierten Porentiefenbestimmungsmethode die Faserverbundstabilität bei langzeitigen Belastungen von Filzen untersucht.

13.1 Untersuchung der Faserlockerung bei Beanspruchung mittels Alterungskammer

Ziel der Untersuchung:

Ein wassergestrahltes nicht nachbehandeltes Filtermedium soll mit einer hohen Anzahl (ca. 100.000) Abreinigungsdruckimpulsen beansprucht werden. Die Faserablösung soll mittels Porentiefenbestimmung mehrmals während der Testzeit ermittelt werden. Wobei jeweils ein Mittel aus vier Porentiefenbestimmungen gebildet wird um die statistische Sicherheit zu erhöhen.

Versuchsdurchführung:

Das wassergestrahlte Filtermedium wird zeitgesteuert ohne Bestaubung abgereinigt. Um die Faserlockerung zu verstärken wurde eine hohe Ventilöffnungszeit und ein hoher Tankdruck gewählt (Tab. 32).

Tankdruck	6 bar
Ventilöffnungszeit	300 ms
Zykluszeit	5 s

Tab. 32: Gewählte Betriebsparameter

Die rohgasseitige Oberfläche des Filtermediums wurde im Neuzustand und nach 118.212 Abreinigungen mittels Porentiefenanalyse untersucht. Es wurde in jedem Punkt je ein Mittelwert und eine Standardabweichung aus vier Porentiefenbestimmungen berechnet. Das Ergebnis der Porentiefenbestimmungen ist in Abb. 130 aufgeführt.

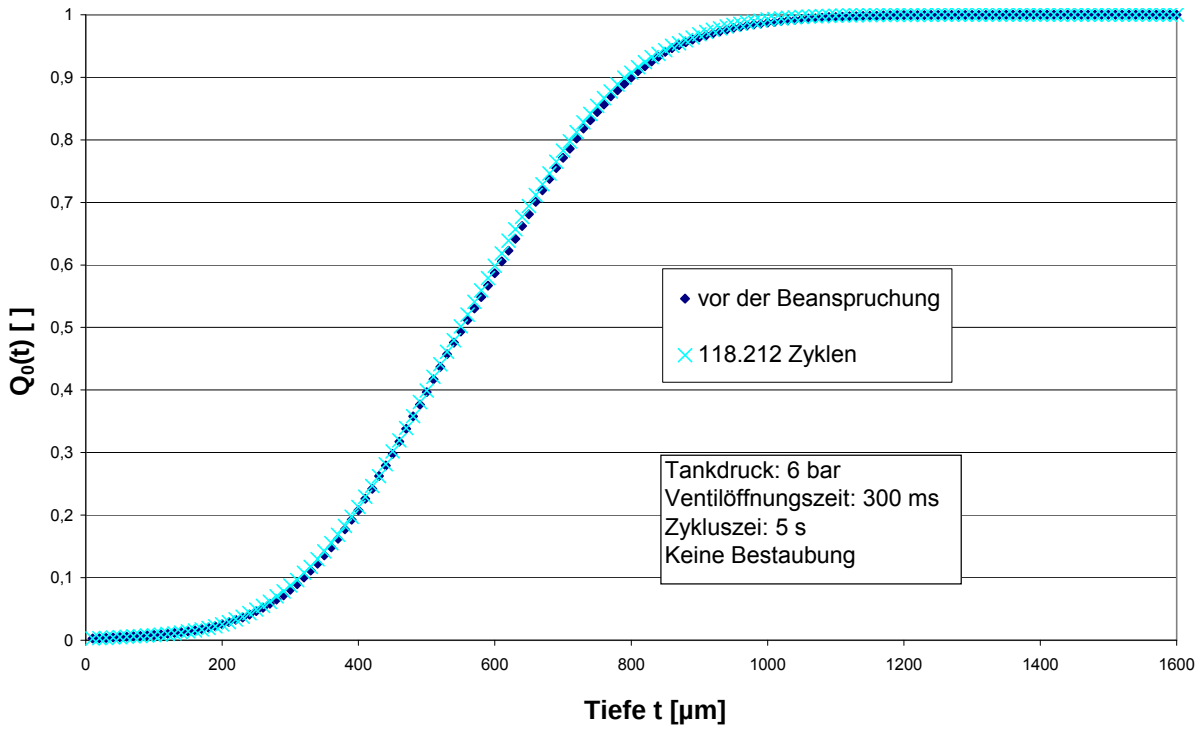


Abb. 130: Ergebnis der Porentiefenbestimmungen (Mittelwert von je vier Einzelmessungen)

In Abb. 130 ist ersichtlich, dass kein eindeutiger Trend zu größeren Porentiefen erkennbar ist. D.h. eine Faserablösung bzw. eine Faserlockerung ist bei dem wassergestrahlten nicht nachbehandelten Filtermedium nach mehr als 100.000 Abreinigen noch nicht feststellbar.

13.2 Untersuchung der Faserlockerung nach längerer Einsatzzeit des Filtermediums im Entstaubungsfilter eines Zementwerks

Da bei den Faserlockerungsuntersuchungen mittels Alterungskammer keine signifikante Faserlockerung nachgewiesen werden konnte, wurden in einer weiteren Testreihe im Zementwerk eingesetzte Filtermedien mit entsprechenden Rückstellproben des originären Filtermediums verglichen.

13.2.1 Durchführung der Untersuchung

Um die Vergleichbarkeit mit den Rückstellproben zu gewährleisten, mußte der anhaftende Staub von den im Zementwerk eingesetzten Filtermittelproben entfernt werden. Der anhaftende Staub wurde durch Abblasen mittels Druckluftpistole von der Filtermedienoberfläche entfernt. Denn durch Abreinigung in der Alterungskammer (50 Abreinigungen, 300 ms Ventilöffnungszeit, 6 bar Tankdruck) konnte der Restdruckverlust nicht merklich reduziert werden und es konnte nahezu kein Staub entfernt werden.
In manchen Filtermedien hatte sich während des Einsatzes im Zementwerk die Form des Stützkorbes eingeprägt, deshalb resultierte eine wellige Form der Prüffilterronde. Um die wellige Form der Prüffilterronde für die bildanalytische Untersuchung zu reduzieren wurde das Filtermedium entlang der Wellenberge in Streifen geschnitten. Die Porentiefenverteilung wurde anhand von 16 Probennahmepunkten ermittelt, welche im Zufallsprinzip auf der Rondenfläche verteilt wurden (Abb. 131).

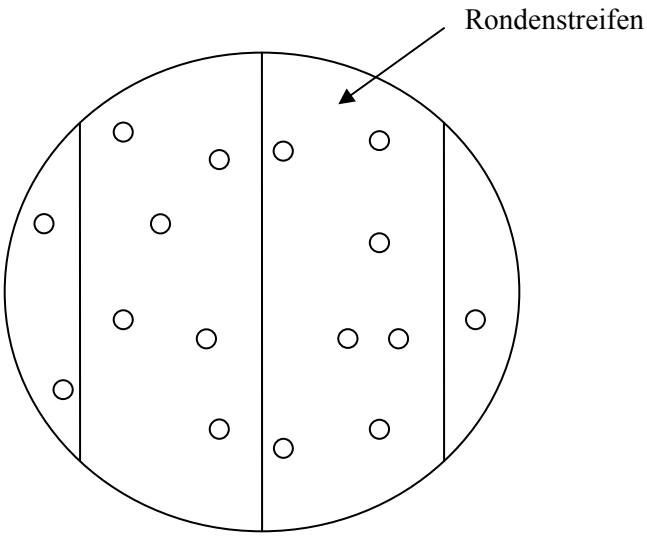


Abb. 131: Schematische Darstellung der zufälligen Verteilung der Probennahmepunkte auf der Rondenfläche

Die Untersuchungen wurden an zwei wassergestrahlten Filzen und zwei Nadelfilzen durchgeführt.

13.2.2 Faserlockerungsuntersuchung an einem wassergestrahlten Filtermedium aus P84 auf Glasgewebe (V877)

Die Porentiefenverteilung des entsprechenden Rückstellmusters wurde mit der Porentiefenverteilung des 29 Monate im Zementwerk eingesetzten Filzes verglichen (Abb. 132).

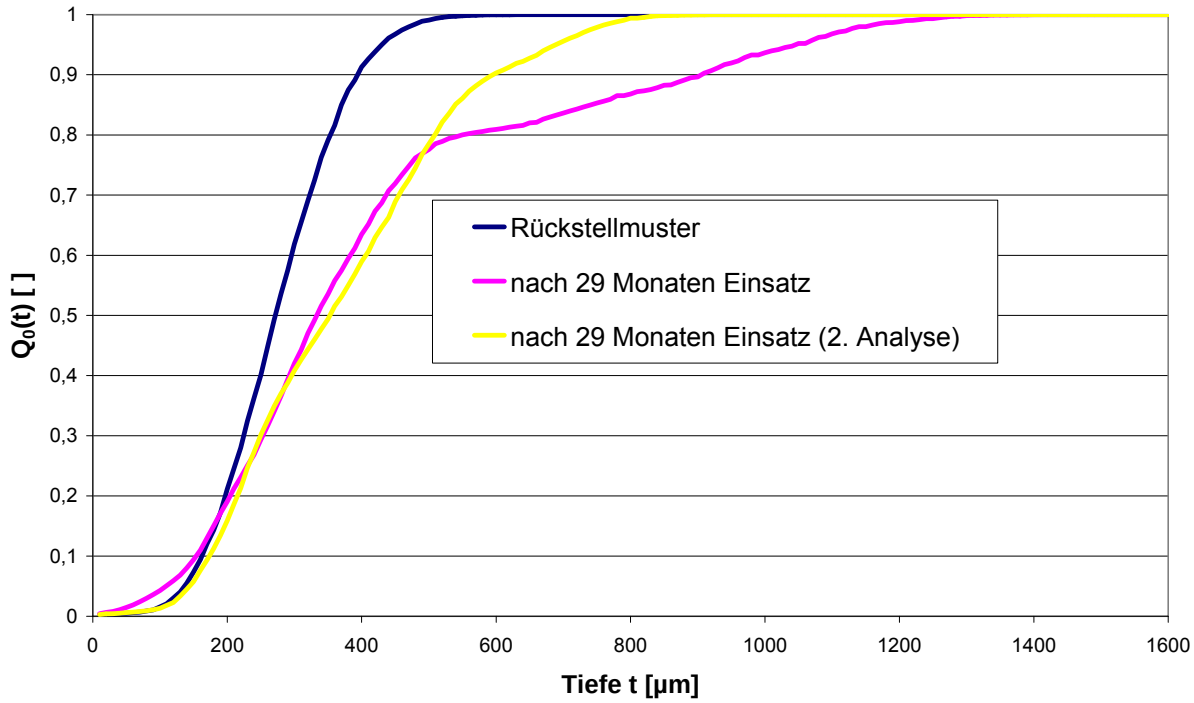


Abb. 132: Veränderung der Porentiefenverteilung nach 29 Monaten Einsatz im Zementwerk. Nach 29 Monaten wurden zwei Analysen durchgeführt, um die Streuung des Ergebnisses abzuschätzen.

In Abb. 132 ist ersichtlich, dass nach 29 Monaten Einsatz eine Lockerung des Faserverbundes eingetreten ist, welche sich in einer Verschiebung der Porentiefensummenverteilung zu größeren Porentiefen manifestiert. Ein möglicher Grund für die Faserlockerung ist eine unzureichend stabile Verhakung der Fasern durch die Wasserstrahlverfestigung. Die Verhakung der Fasern kann somit bei langzeitiger Belastung gelockert werden.

13.2.3 Faserlockerungsuntersuchung an einem wassergestrahlten Filtermedium aus P84 auf P84 Gewebe (V878)

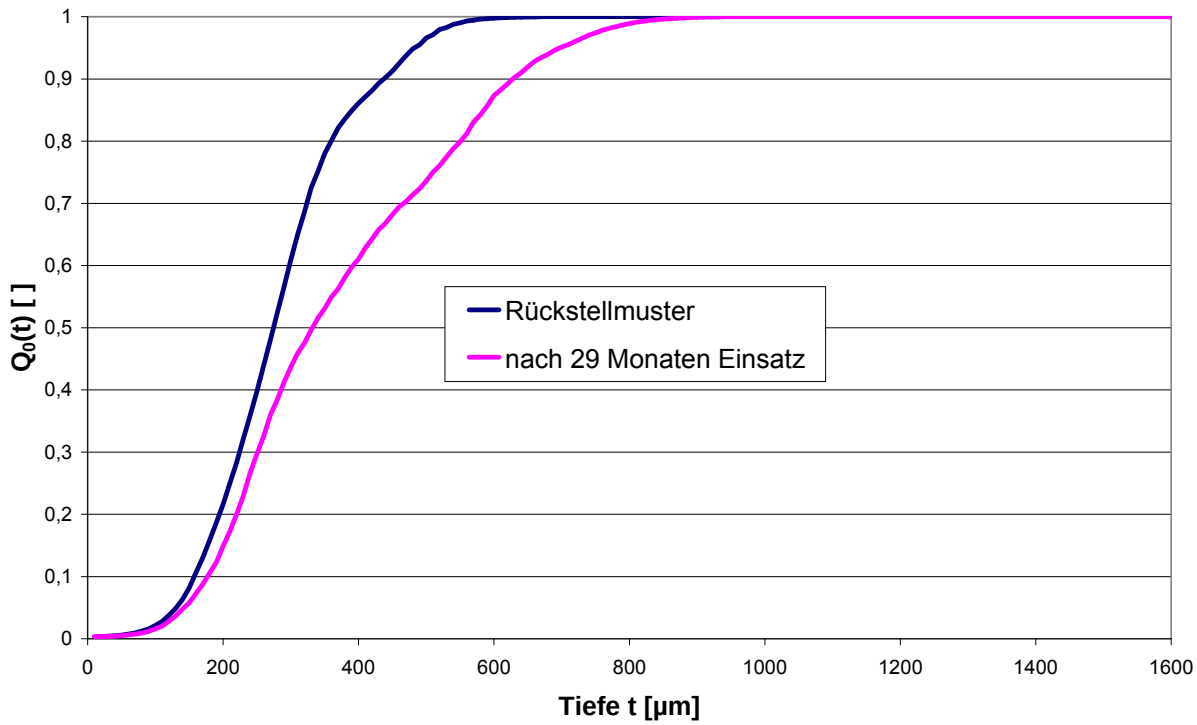


Abb. 133: Veränderung der Porentiefenverteilung eines wassergestrahlten P84 Filtermediums mit P84 Stützgewebe nach 29 Monaten industriellem Einsatz

Das wassergestrahlte P84 Filtermedium auf P84 Gewebe V878 zeigt ebenfalls eine Faserablösung bzw. Faserlockerung nach 29 Monaten Einsatz, welche sich in den größeren Porentiefen in Abb. 133 manifestiert. Mögliche Gründe für die Faserlockerung wurden im Kapitel 13.2.2, Seite 121 diskutiert.

13.2.4 Faserlockerungsuntersuchung an einem Nadelfilz aus P84 auf P84 Gewebe (TAN 1939)

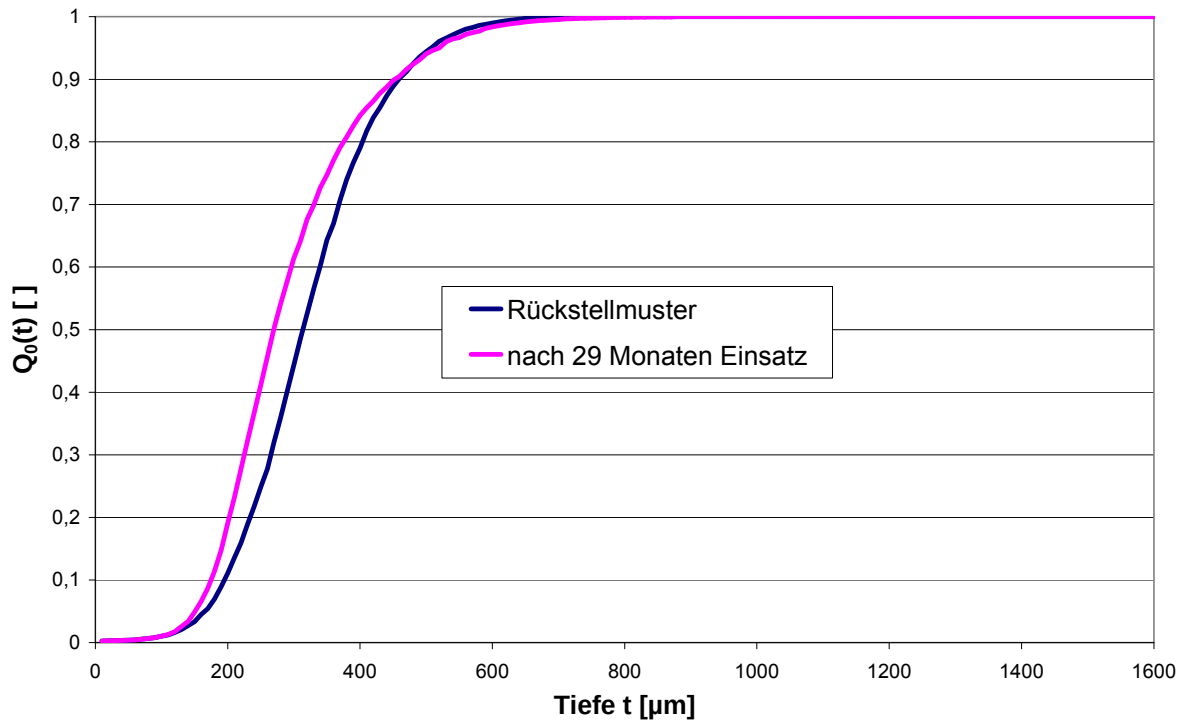


Abb. 134: Veränderung der Porentiefenverteilung eines P84 Nadelfilzes nach 29 Monaten industriellem Einsatz

Bei dem untersuchten Nadelfilz waren nach 29 Monaten Einsatz keine größeren Porentiefen feststellbar (Abb. 134), deshalb kann geschlossen werden, dass es zu keiner Faserlockerung während des Einsatzes gekommen ist. Eine Erklärung für die verstärkte Faserablösung nach 29 Monaten Einsatzzeit bei den wassergestrahlten Filtermedien (Abb. 132 und Abb. 133) im Vergleich zu dem untersuchten Nadelfilz ist die größere mechanische Stabilität des Faserverbundes beim Nadelfilz. Es wird angenommen, dass die Fasern bei der Vernadelung stärker miteinander verhakt werden als bei der Wasserstrahlverfestigung und dass diese Verhakung bei Dauerbelastung kaum gelöst werden kann.

13.2.5 Faserlockerungsuntersuchung an einem P84-PET Mischfilz

Der P84-PET Mischfilz wurde 8 Monate bzw. 6 Jahre im Mühlenfilter eines Zementwerks eingesetzt. Es sollen die Porentiefenverteilungen des Filtermediums nach 8 Monaten bzw. 6 Jahren Einsatzzeit ermittelt werden.

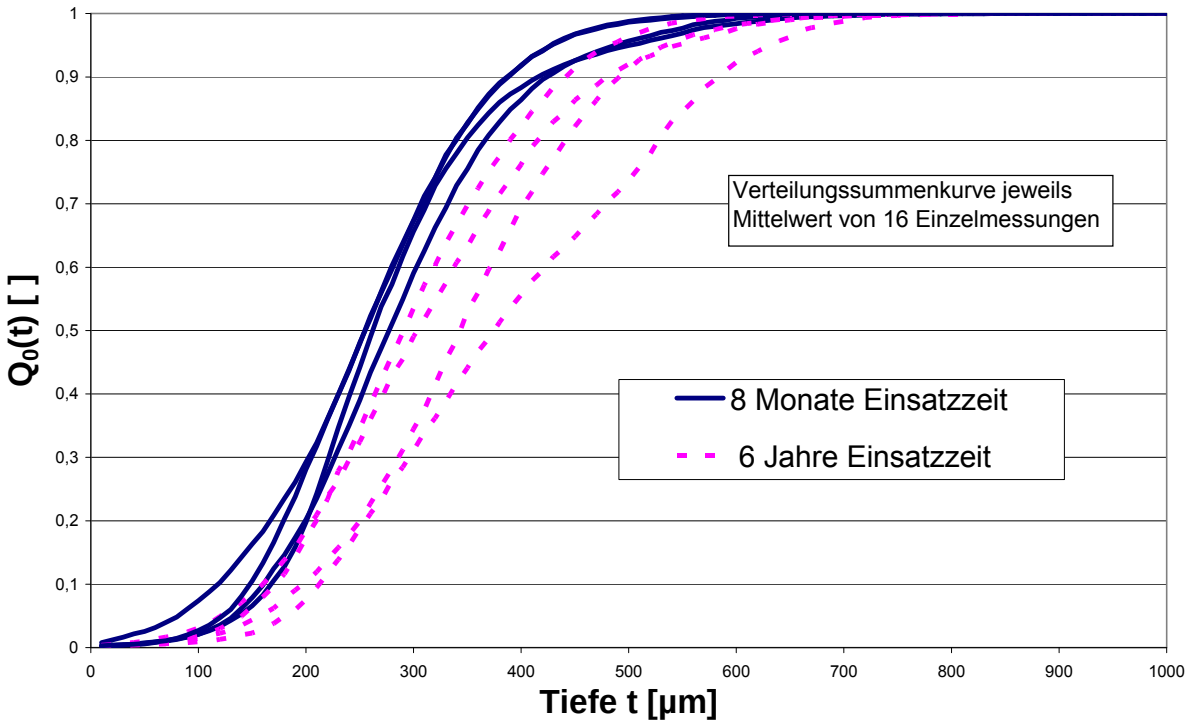


Abb. 135: Porentiefenverteilungen des Mischfaserfilzes nach 8 Monaten und 6 Jahren industrieller Einsatzzeit im Mühlenfilter eines Zementwerkes

In Abb. 135 ist ersichtlich, dass der 6 Jahre eingesetzte Filz eine zu tieferen Poren verschobene Porentiefenverteilung aufweist. D.h. während der Einsatzzeit ist eine Faserlockerung aufgetreten. Weiters kann in Abb. 135 erkannt werden, dass die Streuung der Porentiefenverteilungen nach 8 Monaten kleiner ist als nach 6 Jahren Einsatzzeit. Die größere Streuung nach 6 Jahren Einsatzzeit weist auf eine Verstärkung der Inhomogenität des Filtermediums durch Faserablösung bzw. Faserlockerung hin.

13.3 Zusammenfassung der Ergebnisse des Kapitels 13

Bei der Beanspruchung von wassergestrahlten Filtermedien und von Nadelfilzen mit der Alterungskammer konnte keine signifikante Faserlockerung durch Porentiefenbestimmung nachgewiesen werden. Bei industriell eingesetzten wassergestrahlten Filtermedien zeigte sich zumindest nach 29 Monaten Einsatzzeit eine Faserlockerung, welche sich in einer Verschiebung der Porentiefenverteilung zu größeren Porentiefen manifestierte. Bei einem industriell eingesetzten P84 Nadelfilz konnte hingegen nach 29 Monaten Einsatzzeit noch keine Faserlockerung festgestellt werden. Ein P84/PET Mischnadelfilz zeigte nach 6 Jahren Einsatzzeit eine Faserlockerung.

14 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine einfache Alterungskammer entwickelt mit der langzeitige Alterungstests durchgeführt werden können ohne die technisch anspruchsvollere VDI 3926 Testapparatur zu blockieren. Die Anwendbarkeit der Alterungskammer wurde anhand von zahlreichen Alterungsergebnissen in Kapitel 9 - 12 demonstriert. Bei der Untersuchung des zeitlichen Alterungsverlaufes mithilfe der Alterungskammer stellte sich heraus, dass bei zeitgesteuerter Abreinigung nach einer bestimmten Alterungszeit der Druckverlust plötzlich extrem ansteigt und das Filtermedium verstopft bleibt. Dies wird auf den bei zeitgesteuerter Abreinigung stets zunehmenden Unterdruck an der Reingasseite zurückgeführt. Der steigende Unterdruck an der Reingasseite führt zu einer Reduzierung des Druckstoßüberdrucks, welcher die Triebkraft für die Abreinigung des Filterkuchens ist. Wenn der Abreinigungsüberdruck zu gering wird, kommt es zu einem Anhaften des Filterkuchens und zu einem extremen Druckverlustanstieg.
Der extreme Druckanstieg tritt mit kürzer werdender Zykluszeit und mit geringeren Filtrationsgeschwindigkeiten später auf und ist bei den bisher gefahrenen VDI Testbedingungen innerhalb der üblichen Testzeiten meist noch nicht sichtbar. Bei höheren Filtrationsgeschwindigkeiten tritt der extreme Druckverlustanstieg aufgrund der höheren reingasseitigen Unterdrücke früher auf. Die Abreinigungsbedingungen wie z.B. die Ventilöffungszeit des Abreinigungsventils besitzten ebenfalls einen großen Einfluß auf das Druckverlustverhalten des Filtermediums und in weiterer Folge auf den Zeitpunkt des extremen Druckverlustanstiegs. Bei Ventilöffnungszeiten von 80 ms im Vergleich zu 60 ms tritt der extreme Druckverlustanstieg erst bei einem um ca. 5 mbar höheren reingasseitigen Unterdruck auf und dementsprechend resultieren längere Gesamttestzeiten.
Wenn der Druckverlustanstieg über der Zykluszeit analysiert wird, können im Verlauf der Alterung drei verschiedene Filtrationsmechanismen unterschieden werden. Zu Beginn kann ein typischer progressiver „Tiefenfiltrations-“ Druckverlustanstieg beobachtet werden, welcher mit fortschreitender Alterungszeit in einen degressiven „patchy cleaning“ ähnlichen Druckverlustanstieg übergeht. Dieser degressive Druckverlustanstieg kann auf interne Porenstrukturen zurückgeführt werden, welche während der Abreinigung freigelegt werden. Gegen Ende des Alterungsversuchs bei geringen Druckstoßüberdrücken zeigt sich ein weitestgehend linearer Druckverlustanstieg, welcher auf eine homogenere Verteilung des Staubes nach der Abreinigung schließen läßt.
Es wird nun vorgeschlagen den Zeitpunkt der extremen Verstopfung als Alterungskennwert anzusehen und für verschiedene Filtrationsgeschwindigkeiten als Alterungskennlinie für ein Filtermedium darzustellen. Der Alterungskennwert gibt Aufschluß über das Druckverlustverhalten der Filtermedien während der Alterung und besitzt den Vorteil, dass die Information über die Restdruckverlust- und Kuchendruckverlustentwicklung in einem Kennwert vereint ist. Die Darstellung in Form einer Alterungskennlinie bietet weiters den Vorteil, dass der Trend in Richtung niedriger, industriell interessanter Filtrationsgeschwindigkeiten leicht extrapoliert werden kann. In Analogie zu den Kenngrößen der VDI-Tests werden die mittlere Reingaskonzentration und die eingelagerte Reststaubmasse pro durchgesetztem Gasvolumen für die vergleichende Beurteilung der Filtrationseigenschaften von Filtermedien verwendet.

Die am Institut entwickelten Bildanalysemethoden konnten mithilfe des Olympus BX 61 Mikroskops mit motorisiertem Objekttisch automatisiert werden. Um die Streuung der Ergebnisse zu erniedrigen wurde eine systematische Probennahmemethode entwickelt. Das Thresholdproblem konnte mit Hilfe der mathematisch iterativen Methode nach Otsu [61] gelöst werden. Die Otsu - Methode bestimmt den Threshold anhand Helligkeitsverteilung der Bildpunkte mit Hilfe eines mathemathisch iterativen Algorithmus. Diese Methode ist in das

verwendetet Bildanalyseprogram Image J implementiert und kann dadurch leicht automatisiert angewendet werden. Die damit ermittelten Porenflächenverteilungen stimmen sehr gut mit den ermittelten visuellen Porenflächenverteilungen überein (siehe Abb. 65).

Bei den Vergleichsversuchen verschiedener Filtermedien in Kapitel 10 - 13 konnte gezeigt werden, dass durch die automatisierte Bildanalysemethode und die Alterungskammer wesentliche Informationen für die vergleichende Beurteilung von Filtermedien gewonnen werden können. Durch die Ergebnisse der Bildanalyse konnten die Alterungs- bzw. Filtrationsergebnisse erklärt bzw. interpretiert werden. Die Anwendbarkeit der automatisierten Segmentiermethode nach Otsu konnte wie in Kapitel 10 beschrieben anhand von verschiedenen Filtermedien und den zugehörigen Alterungsversuchen bewiesen werden.
Bei der Interpretation der Vergleichsversuche in Kapitel 11 - 13 zeigte sich, dass Filtermedien mit einer kleinen Modellpore und einer zu geringen Porentiefen verschobenen Porentiefenverteilung kleinere Reststaubmassen einlagern und bessere Alterungskennwerte besitzen. Eine Möglichkeit zur Verkleinerung der Modellpore von P84-Nadelfilzen ist die Beimischung von thermoplastischen PPS- Fasern, da die Mischfaserfilze beim Kalanderprozess gut verdichtet werden können. Weiters zeigte sich, dass die Vliesverfestigung bzw. die Vernadelung einen wichtigen Einfluß auf die resultierenden Porenflächenverteilungen besitzt.

15 Ausblick

Bei der vorliegenden Arbeit wurden die Alterungskenngrößen bei bestimmten Betriebsparametern unter Verwendung von Pural NF Teststaub ermittelt. Hierbei wurde der Einfluss der Filtrationsgeschwindigkeit und der Ventilöffnungszeit auf die Alterungskenngrößen hinlänglich untersucht. Bei zukünftigen Untersuchungen kann der Einfluss des Abreinigungstankdrucks und der Rohgaskonzentration auf die Alterungskenngrößen und in weiterer Folge auf die vergleichende Beurteilung der Filtermedien untersucht werden. Es kann dann eine für die vergleichende Beurteilung optimale Kombination dieser Betriebsparameter vorgeschlagen werden.
In weiteren Versuchsreihen kann der Einfluss des Teststaubes auf das Ergebnis der vergleichenden Filtermedienbeurteilung untersucht werden. Es können Teststäube mit unterschiedlichen Eigenschaften verwendet werden. Die Ergebnisse dieser Testserien können mit den Ergebnissen des Pural NF Staubes verglichen werden. Von besonderem Interesse ist ob sich die Reihung der Filtermedien verändert bzw. ob sich die relativen Unterschiede in den Alterungskenngrößen verändern.
Die ermittelten Alterungskennwerte können für eine Klassifizierung der Filtermedien herangezogen werden. In Analogie zum „Qualityfactor“ der Tiefenfiltration kann auch ein Quotient der mittleren Reingaskonzentration und des Alterungskennwertes für eine Klassifizierung benutzt werden. In weiterer Folge kann darauf basierend eine Einteilung der Filtermedien in verschiedene Qualitätsklassen analog zur Tiefenfiltrationseinteilung in G1 bis F9 für Grob- und Feinstaubfilter nach DIN EN 779 bzw. der Einteilung in die Klassen H10 bis U17 nach EN 1822 durchgeführt werden. Eine Klasseneinteilung der Abreinigungsfiltermedien kann die Auswahl von Abreinigungsfiltermedien entscheidend vereinfachen.
Die Alterungskennlinie kann mithilfe eines mathematischen Modells beschrieben werden. Durch Variation der Modellkonstanten können die Alterungskennlinien von verschiedenen Filtermedienqualitäten approximiert werden. Dies bietet den Vorteil, dass der Verlauf der Alterungskennlinien dadurch leichter in Richtung kleinerer Filtrationsgeschwindigkeiten extrapoliert werden kann. Dadurch können die Alterungskennwerte bei niedrigeren

Geschwindigkeiten welche in den industriellen Anwendungen auftretenden interpretiert werden. Die Parameter des mathematischen Modells können weiters Aufschluss über die Kinetik der auftretenden Verstopfungsmechanismen geben.

16 Veröffentlichungs- und Präsentationsliste

J. Schuberth, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Bildanalytische Charakterisierung von Nadelfilzen in der Abreinigungsstaubfiltration*";
Vortrag: Processnet FA- Sitzung "Gasreinigung", Würzburg, Deutschland; 18.02.2008 - 20.02.2008.

J. Schuberth, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Characterisation of needle felts by image analysis for cleanable dust filtration*";
Vortrag: 9th International Conference on High Temperature Filtration, Saalfelden, Austria (eingeladen); 24.09.2008 - 26.09.2008; in: "*Preprints Presentation at the 9th International Conference on High Temperature Filtration*", (2008).

J. Schuberth, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Characterisation of needle felts for cleanable dust filtration*";
Vortrag: Edana Filtrex 2008 - Conference and Exhibition, Köln, Deutschland; 07.10.2008 - 08.10.2008; in: "*Preprints Edana Filtrex*", (2008), S. 1 - 18.

W. Höflinger, J. Schuberth, G. Mauschitz:
"*Untersuchung des Alterungsvorgangs von abreinigbaren Staubfiltermedien bei zeitgesteuerter Abreinigung*";
Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft (eingeladen), **69** (2009), 5; S. 180 - 188.

W. Höflinger, G. Mauschitz, H. Rud, J. Schuberth:
"*Assessment of the cleanable dust filtration behaviour of surface treated needle felts by characterisation parameter determined by image analysis*";
Vortrag: 10th World Filtration Congress, Leipzig; 14.04.2008 - 18.04.2008; in: "*Proceedings Vol III*", (2008), S. III-37 - III-41.

G. Mauschitz, J. Schuberth, W. Höflinger:
"*Effects of PPS fibre intermixture on the surface structure and the filtration behaviour of PI needle felts for cleanable dust filters*";
Vortrag: 10th World Filtration Congress, Leipzig; 14.04.2008 - 18.04.2008; in: "*Proceedings Vol III*", (2008), S. III-67 - III-71.

J. Schuberth, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Characterization of needle felts for cleanable dust filtration*";
ZKG International, **62** (2009), 2; S. 52 - 62.

W. Höflinger, J. Schuberth, G. Mauschitz:
"*Untersuchung des Alterungsvorgangs von abreinigbaren Staubfiltermedien bei zeitgesteuerter Abreinigung*";
Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft (eingeladen), **69** (2009), 5; S. 180 - 188.

J. Schuberth, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Clogging mechanisms involved in the aging of cleanable filter media*";
Vortrag: FILTECH 2009, Wiesbaden Deutschland; 13.10.2009 - 15.10.2009; in: "*Proceedings*", (2009), S. 341 - 348.

J. Schuberth, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Der Verstopfungsvorgang von abreinigbaren Staubfiltermedien in einer neukonzipierten Alterungskammer*";
Vortrag: 23. Palas Aeriosol Technologie Seminar 2009, Karlsruhe, Deutschland; 13.09.2009 - 15.09.2009; in: "*Seminarunterlagen*", (2009), S. 1 - 26.

J. Schuberth, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Neue Möglichkeiten zur Charakterisierung des Filtrationsverhaltens von abreinigbaren Filtermedien*";
Vortrag: Jahrestreffen der ProcessNet-Fachausschüsse Energieverfahrenstechnik und Gasreinigung, Dortmund; 17.03.2010 - 18.03.2010.

J. Schuberth, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Verstopfungsmechanismen bei der Alterung von abreinigbaren Oberflächenfiltern*";
Vortrag: Processnet Jahrestreffen des Fachausschusses "Gasreinigung", Frankfurt; 30.03.2009 - 31.03.2009.

J. Schuberth, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Characterisation of the clogging behaviour of cleanable filter media*";
Vortrag: World Congress on Particle Technology (WCPT6 2010), Nürnberg, Deutschland; 26.04.2010 - 29.04.2010; in: "*WCPT6 2010 - Abstracts and Proceedings*", (2010), ISBN: 978-3-00-030570-2; 4 S.

J. Schuberth, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*New possibilities for the filtration behaviour characterisation of cleanable filter media*";
Vortrag: 6th European Meeting on Chemical Industry and Environment (EMChIE 2010), Mechelen, Belgien; 17.05.2010 - 19.05.2010; in: "*EMChIE 2010 Conference Proceedings (Vol.2)*", (2010), ISBN: 9789081548601; S. 997 - 1006.

J. Schuberth, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Verstopfungsmechanismen bei der Alterung von abreinigbaren Oberflächenfiltern*";
Poster: 5.Minisymposium Verfahrenstechnik, Wien; 24.06.2009 - 25.06.2009; in: "*5.Minisymposium Verfahrenstechnik - Tagungsband*", (2009), ISBN: 978-3-9502731-0-6; S. 151 - 153.

J. Schuberth, G. Mauschitz, W. Höflinger: „*Clogging mechanisms involved in the aging process of cleanable filter media*“, eingereicht bei der Zeitschrift „*Separation and Purification Technology*“, Elsevier Verlag

17 Literatur

[1] MAK – Werte Liste, Österreich, (2002)

[2] Fritz, W., Kern, H.: Reinigung von Abgasen, Vogel Verlag Würzburg, 3. Auflage, (1992)

[3] VDI-Richtlinie 3926: Prüfung von Filtermedien für Abreinigungsfilter, Blatt 1, Standardprüfung zur vergleichenden Bewertung von abreinigbaren Filtermedien, VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 6, Oktober (2004)

[4] ASTM D6830-2: Standard test method for characterizing the pressure drop and filtration performance of cleanable filter media, ASTM International, 100 Barr Habor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA

[5] JIS Z 8909-1, Testing methods of filter media for dust collection, Japanese Industrial Standard

[6] GB 12625, Draft 2005, Technical requirements of fabric and bag for bag filter, National Standard of the People's Republic of China, (2005)

[7] ISO/CD 11057: Air quality-standard test method for filtration characterisation of cleanable filter media, (2008)

[8] Koschutnig, W.: Untersuchung zur Emissionsbindung durch Wiederaufwirbelung von Straßenstaub und Charakterisierung der Oberflächenbehandlung textiler Filtermittel für die industrielle Feinstaubabscheidung, Dissertation, TU Wien, (2007)

[9] Rud, H.: Einfluss der Ladung und Faserquerschnittsform auf das Filtrationsverhalten abreinigbarer Polyimid- Nadelfilze, Dissertation, TU Wien, (2008)

[10] Löffler, F.: Staubabscheiden, Georg Thieme Verlag Stuttgart, (1988)

[11] Gäng, P.: Testing and selection of filter media for dedusting, Part 2: Field measurements with a mobile filter probe derived from VDI/DIN 3926, *F & S International Edition*, No. 9, (2009), p.17-23

[12] VDI-Richtlinie 3926: Prüfung von Filtermedien für Abreinigungsfilter, Blatt 1, Teil 2: Prüfung von abreinigbaren Filtermedien unter anwendungstechnischen Bedingungen, *VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft*, Band 6, Dezember (1994)

[13] Sievert, J.: Physikalische Vorgänge bei der Regenerierung des Filtermediums in Schlauchfiltern mit Druckstoßabreinigung: *Fortschritts – Berichte*, VDI Reihe 3, Nr. 161, VDI Verlag Düsseldorf, (1988)

[14] Mao, N., Yao, Y., Kanaoka, C.: Comparison of filtration performances of cleanable fabric filters measured by VDI and JIS testing rigs, *Advanced Powder Technol.*, Vol. 17, No. 1, (2006), p. 85-97

[15] Albrecht, W., Fuchs, H., Kittelmann, W.: Vliesstoffe, Wiley-VCH Verlag, (2000)

[16] Wadsworth, L., C.: Course for NONWOVENS SCIENCE AND TECHNOLOGY II by the university of Tennessee, http://web.utk.edu/~mse/Textiles/index.html

[17] Jaussaud, J., P.: Rotary hydraulic entanglement technology, nonwovens in medical and healthcare applications conference, Brighton, England, Nov. 10^{th}-12^{th}, (1987)

[18] Allen, C., H.: New development for spunlacing cotton, paper presented at fiber society conference, University of Tennessee, Knoxville, (1997)

[19] Gäng, P.: Prüfung und Auswahl von Filtermedien für Abreinigungsfilter zur Entstaubung Teil 1: Standardtest im Labor nach VDI/DIN 3926, *F & S Filtrieren und Separieren*, 22 (2008) Nr.2, p. 58-65

[20] Prüfung von Filtermedien – Erfahrungsberichte aus der Anwendung der Richtlinie VDI 3926 Blatt 1, Kolloquium „Prüfung von Filtermedien“, 7./8. Juni 1999, Karlsruhe, Schriftenreihe d. VDI/KRdL Band 29, (1999), ISSN 1435-1633

[21] Binnig, J., Meyer, J., Kasper, G.: Influence of operating conditions and aging procedure on the emissions and operating performance of surface filters, proceedings Filtech 2005, Wiesbaden, 11.-13 Oktober (2005), p. II 131-138

[22] Binnig, J.: ISO-Normierung der Prüfung von abreinigbaren Filtermedien, *Technische Textilien* 5, (2009), p. 239,240

[23] Bedienungsanleitung Feststoffdispergierer RGB 1000, Palas GmbH.

[24] DIN EN ISO 9237: Textilien –Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von textilen Flächengebilden, Dezember (1995)

[25] Lünenschloß, J., Gupta, V. P., Berns, K.: Untersuchung der Zusammenhänge zwischen den Merkmalen neuartiger Nadelfilzkonstruktionen und ihren Filtereigenschaften bei der Entstaubung, Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 2970, Westdeutscher Verlag GmbH Opladen, (1980)

[26] Rud, H., Mauschitz, G., Höflinger, W.: Verringerung der Staubemissionen bei der Zementherstellung, *ZKG International*, 59, November (2006), p. 58-65

[27] Mauschitz, G., Höflinger, W.: The Influence of Internal Particle Rearrangement on the Clogging Behaviour of Nonwoven Dust Filter Media, *Partec 2001*, Nürnberg, August (2001)

[28] Koschutnig, W., Mauschitz, G., Höflinger, W.: Analyse der Restverstopfung an verschiedenen oberflächenbeladenen textilen Staubfiltermedien, *Gefahrenstoffe – Reinhaltung d. Luft*, 66, April (2006), p. 158-164

[29] Mauschitz, G., Koschutnig, W., Rud, H., Höflinger, W.: Analysis of the clogging behaviour of thermally finished nonwoven dust filter media by optically detected porosity parameters, *FILTECH 2005*, Wiesbaden, Deutschland, FILTECH 2005 – Proceedings, Volume II, (2005), p. 20-28

[30] Höflinger, W., Rud, H., Mauschitz, G.: Characterisation of particle penetration and dust holding capacity of surface treated needle felts used for cleanable dust filters, *10th Nordic Filtration Symposium*, Trondheim Norway Proceedings 10th Nordic Filtration Symposium, (2006)

[31] Mauschitz, G., Rud, H., Höflinger, W.: Particle Deposition in the Depth of Nonwoven Dust Filter Media and its Effect on Filter Clogging, *FILTECH 2007*, Proceedings Vol II, Wiesbaden, Deutschland, Februar (2007), S. II-34 - II-41.

[32] Koschutnig, W., Mauschitz, G., Höflinger, W.: Charakterisierung der Oberflächenbehandlung und des Verstopfungsverhaltens von abreinigbaren Staubfiltermedien mittels Bildanalyse, *Chemie Ingenieur Technik*, 76, Oktober (2004), p. 1504 - 1508.

[33] Mauschitz, G., Koschutnig, W., Höflinger, W.: Cleaning Behaviour of Textile Filter Media, *Transaction of the Filtration Society*, (2002)

[34] Rud, H., Mauschitz, G., Höflinger, W.: Untersuchungen des Einflusses der Faserquerschnittsform auf das Filtrationsverhalten von Nadelfilzen für die Abreinigungsstaubfiltration, *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft*, 5, (2006), p. 226 - 231

[35] Höflinger, W., Mauschitz, G., Koschutnig, W.: Cleaning Behaviour of Textile Filter Media, Proc. *European Conference on Filtration and Separation*, Goethenburg, Schweden, (2002), p. 114 - 123

[36] Höflinger, W., Mauschitz, G., Koschutnig, W.: Investigation Of The Surface Treatment And The Dust Clogging Behaviour of Cleanable Needle Felts by Image Analysis, Proceedings of the 9^{th} *World Filtrations Congress*, Louisiana USA, (2004)

[37] Höflinger, W., Rud, H., Mauschitz, G.: Characterisation of the Treatment of Filter Media, Proceedings of the 2^{nd} *European Conference on Filtration and Separation*, Compiegne, Frankreich, Oktober (2006), p. 462 - 467

[38] Koschutnig, W., Mauschitz, G., Höflinger, W.: Analyse of the Porosity Situation Near the Outer Surface of Thermally Finished Clean and Regenerated Needle Felts, *Kolloquium Filtertechnik 2003*, Universität Karlsruhe (TH) Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, (2003), p. 36 - 46

[39] Mauschitz, G., Höflinger, W.: Internal Particle Rearrangement - A Concept to Describe the Clogging Behaviour of Nonwoven Dust Filter Media, Book of Papers *11th Annual International TANDEC Conference*, The University of Tenessee, Knoxville, USA, November (2001)

[40] Mauschitz, G., Koschutnig, W., Höflinger, W.: Beeinflussung des Filtrationsverhaltens abgereinigter Staubfiltermedien durch thermische Ausrüstung, Fortschritte und Entwicklungstendenzen bei der Gasreinigung Filtertechnik 2004, Universität Karlsruhe, März 2004, p. 1 - 7

[41] Mauschitz, G., Koschutnig, W., Höflinger, W.: Characterization of the clogging behaviour of nonwoven dust filter media, Proceedings of the *International Conference of Emerging Solid/Liquid Separation Technologies*, ICEST, Compiegne, France, Oktober (2002), p. 159 - 166

[42] Mauschitz, G., Koschutnig, W., Höflinger, W.: Cleanable Textile Filter Media for the Combustion Technology - A Structural Surface Analysis of Nonwovens, Proceedings of The *4th Asia-Pacific Conference on Combustion*, Southeast University Press, Nanjing, P.R. China, 7-81089-376-9, (2003), p. 195 - 198

[43] Mauschitz, G., Koschutnig, W., Höflinger, W.: Description of the clogging behaviour of nonwovens for cleanable dust filters by internal particle rearrangement, Preprints *CHISA* 2002, Czech Republic, August (2002),80-86059-22-2

[44] Mauschitz, G., Koschutnig, W., Höflinger, W.: Modification of the Surface Structure of Nonoven Dust Filter Media by Thermal Finishing - A Method to Reduce Filter Clogging, Proc. zur *PARTEC 2004*, Nürnberg, Germany, März (2004)

[45] Mauschitz, G.; Koschutnig, W.; Höflinger, W.: The Effect of Thermal Finishing on Surface Structure and Cleaning Behaviour of Textile Dust Filter Media, *FILTECH EUROPA 2003* Proceedings G-sessions M-Sessions, Düsseldorf, Oktober (2003), p. 26 - 33.

[46] Mauschitz, G., Koschutnig, W., Höflinger, W.: The effect of thermal surface treatment on the cleaning behaviour of textile dust filter media, *4th European Congress of Chemical Engineering*, Granada, Spain, September (2003), 84-88233-35-3

[47] Mauschitz, G., Koschutnig, W., Höflinger, W.: The Influence of Filter Regeneration on the Internal Particle Rearrangement of Nonwovens for Cleanable Dust Filters, Proc.of the16th International Conference of Chemical and Process Engineering, Prague, Czech Republic, August (2004), 80-86059-40-5

[48] Mauschitz, G., Koschutnig, W., Höflinger, W.: The Influence Of Thermal Finishing On The Structural Integrity Of The Surface Fibre Layer And The Filtration Behaviour Of Cleanable Textile Dust Filter Media, Proceedings of the *7th International Conference on High Temperature Filtration*, Wien, Mai (2004), p. 1 - 12

[49] Mauschitz, G., Koschutnig, W., Rud, H., Höflinger, W.: Analysis of the clogging behaviour of thermally finished nonwoven dust filter media by optically detected porosity parameters, *FILTECH 2005* - Proceedings, Volume II, Wiesbaden, Deutschland, Oktober (2005), p. II - 20 - II - 28.

[50] Rud, H., Höflinger, W., Mauschitz, G.: Untersuchung des Einflusses der Faserform auf das Filtrationsverhalten von Oberflächenfiltermedien, Proc. des 7. unabhängigen Symposium *"Stand der Technik Rauchgasreinigung in Verbrennungsanlagen und thermischen Prozessen"*, Stuttgart, Deutschland, März (2006)

[51] Rud, H., Mauschitz, G.; Höflinger, W.: Differences in the Filtration Behaviour of Textile Filter Media made of P84-Fibres, Konferenzunterlagen, Pichlarn, April (2006)

[52] Rud, H., Mauschitz, G., Höflinger, W.: The Influence of the Fibre Cross-Sectional Form on the Fractional Particle Penetration for Cleanable Dust Filter Media, *FILTECH 2007* Proceedings, Wiesbaden Deutschland, Februar (2007), p. II-19 - II-26.

[53] Rud, H., Mauschitz, G., Höflinger, W.: Transmitted light microscopy - a new method for surface structure analysis of cleanable non - woven dust filter media, *Proceedings 5th European Meeting on Chemical Industry and Environment EMChIE2006*, Wien, (Mai) 2006, p. 1177 - 1184.

[54] ASTM E 128/61: Bubble Point Test, ASTM International, 100 Barr Habor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA

[55] Stange, K.: Angewandte Statistik 1, Eindimensionale Probleme, Springer Verlag Berlin, (1970), ISBN 3-540-05256-9

[56] Schneeweiss, P. M., Diplomarbeit TU Wien, (2009)

[57] Sezgin, M., Sankur, B.: Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation, *Journal of electronic imaging*, Vol. 13(1), Jan. (2004), p. 146 - 165

[58] Kapur, J. N., Sahoo, P. K., Wong, A. K. C.: A new method for grey-level picture thresholding using the entropy of the histogram, *Graph. Models Image Process.* 29, (1985), p. 273-285

[59] Yen, J. C., Chang, F. J., Chang, S.: A new criterion for automatic multilevel thresholding, *IEEE Trans. Image Process.*, IP-4, (1995), p. 370-378

[60] ImageJ, Image Processing and Analysis in Java, http://rsbweb.nih.gov/ij/

[61] Otsu, N.: A threshold selection method from gray-level histograms, *IEEE Trans. Sys., Man. Cyber.,* (1979) 9, p. 62–66

[62] Ridler, T. W., Calvard, S.: Picture thresholding using an iterative selection method, *IEEE Trans. Sys. Man. Cyber.,* (1978) 8, p. 630-632

[63] Humphries, W.: An investigation of the distribution of fluid velocities in fibrous filters, *Powder technology* 25,(1980), p. 31-36

[64] Lajos,T.: The effect of inhomogeneity on flow in fibrous filters, *Staub- Reinhalt. Luft* 45, (1985), p. 19-22

[65] Stenhouse, J.I.T., Harrop, J.A.: Particle capture mechanisms in fibrous filters, *Filtration and Separation*, (1971), p. 169-172

[66] Latrache, R.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Luftfiltration mittels Faserfilter, *Luft und Kältetechnik* 2, (1980), p. 93-98

[67] Davies, C.N.: Air filtration, Academic Press, London, (1973)

[68] Humphries, W.: An investigation of the distribution of fluid velocities in fibrous filters, *Powder Technology* 25, (1980), p. 31 -36

[69] Dhaniyala, S., Liu, B.Y.H.: Experimental investigation of filter inhomogeneity by local efficiency measurements, *Journal of aerosol science* 29 (1), (1998), p. 993-934

[70] Shapiro, M.: An analytical model for aerosol filtration by nonuniform filter media, *Journal of aerosol science* 27 (2), (1996), p. 263-280

[71] Ehrenberg, C., Höflinger, W.: The influence of the inhomogeneity of thick filter media for aerosol filtration, Poster: Proceedings *EMChIE 2006*, Wien, 03.05.2006 - 05.05.2006, (2006) p. 564 – 572

[72] Dhaniyala, S., Liu, B.Y.H.: Numerical estimation of filter fiber drag considering structural inhomogeinity, *Journal of aerosol science* 29 (1), (1996), p. 1167-1168

[73] Chernyakov, A.L.: The influence of fluctuations on the efficiency of aerosol particle collection with fibrous filters, *Colloid Journal* 66 (3), (2004), p. 355-366

[74] Schweers, E.: Einfluss der Filterstruktur auf das Filtrationsverhalten von Tiefenfiltern, Fortschrittsbericht VDI Reihe 3 Nr. 340, VDI Verlag Düsseldorf, (1993)

[75] Tittel, R., Adam, R., Lücke, T.: Modellierung der Partikelabscheidung in inhomogenen Glasfaserpapieren, *F&S Filtrieren und Separieren* 6 (1), (1992)

[76] Schweers, E., Löffler, F.: Analyse der Struktur technischer Tiefenfilter- Verteilung der lokalen Packungsdichte und Orientierung der Fasern, *Staub- Reinh. Luft* 53, (1993), p. 101-107

[77] Tittel, R., Lücke, T., Adam, R.: The effect of layer structure on performance of glass fiber media, Proc. *PARTEC* Conference Nürnberg, Bd. 3, (1992), p. 55-67

[78] Adam, R., Heidenreich, E., Tittel, R. Lücke, T.: Model of inhomogenous high efficient air filters, *FILTECH* Conference, Karlsruhe, (1991), p. 561- 567

[79] Tittel, R., Lücke, T., Adam, R.: Aerosolabscheidung in inhomogenen Glasfaserpapieren, *Wissensch. Zeitschrift der Univ. Dresden* 41, Heft 6, (1992), p. 50-53

[80] Schnitzer, Ch., Rippberger, S.: Modellierung der Durchströmung von Multifilamentgeweben, *F&S Filtrieren und Separieren* 21, Nr. 4, (2007), p. 226-231

[81] Häusle, T., Sauter, H., Rieger, H.: Thermographie als Methode zur Darstellung lokaler Durchströmung in Luftfiltern, *F&S Filtrieren und Separieren* 19, (2005), p. 274-278

[82] J. Sievert: Physikalische Vorgänge bei der Regenerierung des Filtermediums in Schlauchfiltern mit Druckstoßabreinigung, *Fortschr.-Ber. VDI* Reihe 3, Nr. 161, VDI Verlag Düsseldorf, (1988)

[83] Unterberger, E.: Diplomarbeit in Vorbereitung, FH Campus Wien

[84] Musits, E.: Diplomarbeit, FH Campus Wien, (2009)

Josef Schuberth

1) Persönliche Daten

Geboren am 4. März 1982
Österreichischer Staatsbürger
Wehrdienst abgeleistet
Obere Straße 35, 3553 Schiltern

2) Ausbildung

Mai 2007 - Mai 2010 **Projektassistent an der TU Wien, Institut für Verfahrenstechnik**
Doktorarbeit zum Thema: Einfluss der inhomogenen Porenverteilung an der Filtermitteloberfläche von Nadelfilzen auf das Langzeitverhalten von Abreinigungsfiltermedien
Industriepartner: Evonik Fibers/Lenzing OÖ

Okt. 2004 - Juni 2007 **Studium Technische Chemie an der Technischen Universität Wien**
Schwerpunkt: Chemische Prozess- und Umwelttechnik
Diplomarbeit: Auswirkungen von PPS- Faserzumischungen auf die Oberflächenstruktur und das Staubfiltrationsverhalten von abreinigbaren PI-Nadelfilzen

Okt. 2002 - Juni 2004 **Diplomstudium Chemie an der Universität Innsbruck**

Sept. 1996 - Juni 2001 **HBLVA für chem. Industrie Rosensteingasse Wien**
Schwerpunkt Biochemie und Gentechnik

3) Berufserfahrung

- **Vollzeitarbeit**

Seit August 2010 **Agrana Stärke GmbH/ Gmünd**
Technischer Assistent der Geschäftsführung

Mai 2002 – Sept. 2002 **Institut für Botanik der Universität Wien, Department Plant Systematics**
Meine Arbeit bestand aus DNA -Anreicherung, -Reinigung, -Klonierung, -Markierung und Durchführung der Sequenzierung.

- **Arbeit am Samstagvormittag während der Saison**

Okt. 2004 - Okt. 2008 **Pro Vino GmbH/Krems**
Mitarbeit im Verkauf und Durchführung von Weinanalysen

Sept. 1997 - Jänner 2000 **Pro Vino GmbH/Krems**
Durchführung von Weinanalysen

- **Ferialpraktika**

Juli 2006 - August 2006	**Dynea Austria GmbH/Krems, Entwicklungsabteilung** Verbesserung von Melaminharzen
September 2005	**Pro Vino GmbH/Krems** Mitarbeit im Verkauf und im Lager
Juli 2004 – 15. August 2004	**Sandoz GmbH/Werk Schaftenau, Prozessanalytiklabor Biopharmaceuticals** Validierung von Laborgeräten
August 2003 – 15. Sept. 2003	**Sandoz GmbH/Kundl, Labor der Cephalosporinproduktion** Untersuchung der Mutterlaugenaufarbeitung
Juli 1999 und August 1998	**Krems Chemie AG/Krems, Forschungslabor** Synthese von Melaminharzen
August 1997	**Krems Chemie AG/Krems, Zentrallabor** Qualitätskontrolle der Phosphatproduktion

- **Auslandspraktikum der HBLVA Rosensteingasse**

Februar 2000 - Juli 2000	**TNO voeding/Zeist Holland, Biosensordepartment** Entwicklung einer Detektionsmethode für Carboxylgruppen von Polymeren, basierend auf Surface Plasmon Resonance. Meine Resultate wurden gemeinsam mit anderen Forschungsarbeiten von der Firma patentiert.

4) Wissenschaftliche Laufbahn

- **VDI Preis für hervorragende Diplomarbeiten,** 13. November 2008, München

- **Zahlreiche Präsentationen bei fachspezifischen Konferenzen wie z.B. FILTECH, Filtrex, WCPT6, Processnet (VDI / DECHEMA) Fachausschusssitzungen und Firmenkonferenzen**

- **Veröffentlichungen in Fachzeitschriften:**
  - Schuberth, J., Mauschitz, G., Höflinger, W.: Characterisation of needle felts for cleanable dust filtration, ZKG International, 2 (2009), S. 52-62
  - Höflinger, W., Schuberth, J., Mauschitz, G.: Untersuchung des Alterungsvorganges von abreinigbaren Staubfiltermedien bei zeitgesteuerter Abreinigung, Gefahrenstoffe - Reinhaltung der Luft, 69 (2009) Nr. 5 - Mai, S. 180-188
  - Voraussichtliche Veröffentlichung: Schuberth, J., Mauschitz, G., Höflinger, W.: Clogging mechanisms involved in the aging of cleanable filter media, Zeitschrift: Separation and Purification Technology

5) Sonstige Kenntnisse

- EDV: MS Office Anwendungen, Visual Basic einfache Programme, Origin, Image J
- Sprachen: Muttersprache Deutsch, ausgezeichnetes Englisch, sehr gutes mündliches Französisch
- Führerschein: B+C

6) Interessen

Laufen, Eishockey und Reisen