TU UB

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



## DISSERTATION

# Analyse der künstlichen Filtermittelalterung bei der Abreinigungsfiltration und Modellierung der damit verbundenen Verstopfungsvorgänge

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

Univ. Prof. Dr. Wilhelm Höflinger

E166 Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften

> eingereicht an der Technischen Universität Wien Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

> > von

Dipl.-Ing. Markus Stecher

Matrikelnummer: 0326877 Lerchenfelderstraße 62-64/9A, 1080 Wien

Wien, 28. Februar 2014

### Danksagung

Besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wilhelm Höflinger, für die Möglichkeit diese Arbeit durchzuführen, für seine fachliche Betreuung, die kritische Diskussion meiner Ergebnisse und die Denkanstöße die zum Fortschreiten der gegenständlichen Arbeit wesentlich beigetragen haben.

Des Weiteren sei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Schmidt als Gutachter dieser Arbeit und Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hermann Hofbauer für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission gedankt.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Studien- und Arbeitskollegen mit denen ich während der letzten Jahre am Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften zusammenarbeiten durfte. Besonders hervorzuheben sind hier Herr Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerd Mauschitz für viele praktische und theoretische Ratschläge sowie meine Kollegen Thomas und Johannes, welche stets mit Rat und Tat zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Nicht zuletzt gilt es der Firma Palas<sup>®</sup> aus Karlsruhe, namentlich Herrn Dipl.-Ing. (FH) Leander Mölter, zu danken, welche in den vergangenen Jahren die in dieser Arbeit wiedergegebene Forschung finanziell und apparativ unterstützt hat.

Besonderer Dank gilt auch meiner Familie, die mich in den Jahren meiner Ausbildung unterstützt hat.

### Kurzfassung

Aufgrund ihres hohen Feinstaubabscheidevermögens sind Abreinigungsfilter in der Industrie zur Entstaubung von staubhaltigen Rohgasströmen mit Beladungen im g/m3-Bereich weit verbreitet. Wegen der mannigfaltigen Einflussfaktoren beruht die Auswahl eines geeigneten Filtermediums für eine Filtrationsaufgabe auch heute noch auf empirischen Erfahrungen. Durch Filtermittelprüfungen an Filterprüfständen wird versucht die damit verbundenen Unwägbarkeiten zu minimieren. Um an Filterprüfständen in einer vertretbaren Versuchszeit eine lange Betriebsdauer zu simulieren, ist in den einschlägigen Normen zur Filtermittelprüfung eine Alterungsphase, in welcher das jeweilige Prüffiltermedium einer großen Anzahl an Filtrationszyklen in kurzer Zeit ausgesetzt wird, vorgesehen. Um aus solchen Filtermittelprüfungen aussagekräftige Informationen zum Langzeitfiltrationsverhalten von abreinigbaren Filtermedien zu erhalten, sollen die grundlegenden Verstopfungs- und Filtrationsmechanismen im Labor möglichst wenig von den industriellen Realbedingungen abweichen. Daher ist eine detaillierte Kenntnis der Verstopfungs- und Filtrationsmechanismen, welche eng mit der Druckverlustentwicklung bei der Alterung verknüpft sind, unabdingbar.

In dieser Arbeit wurde daher ein den Druckverlustverlauf bei zeit- und druckgesteuerter Abreinigungsfiltration beschreibendes Modell entwickelt. Neben dem detaillierten Verständnis betreffend die Verstopfungs- und Filtrationsmechanismen, hilft das Modell auch bei der zeitsparenden Hochrechnung von Druckverlustverläufen.

Um die Filtrations- und Verstopfungsmechanismen im Detail aufzuklären, wurden in der gegenständlichen Arbeit zunächst eine Vielzahl an zeitund druckgesteuerten Filtrationsversuchen in einem eigens für die Alterung konzipierten Filterprüfstand vorgenommen. Bei diesen Versuchen wurden die Betriebsparamter Filtrationsgeschwindigkeit, Tankdruck und Ventilöffnungszeit variiert, sowie Teststäube mit unterschiedlicher Partikelgrößenverteilung und Filtermedien mit unterschiedlicher Oberflächenstruktur verwendet, um eine umfassende Untersuchung hinsichtlich aller bei der zeit- und druckgesteuerten Filtration auftretenden Verstopfungs- und Filtrationsmechanismen zu ermöglichen. Während unterschiedliche Betriebsparameter keinen wesentlichen Einfluss auf die auftretenden Filtrationsmechanismen besitzen, ruft das verwendete Teflon-laminierte, glatte Membranfiltermedium in trivialer Weise einen erhöhten Anteil an Kuchenfiltration hervor, wohingegen bei einem poröseren PI - Nadelfilzfiltermedium ein größerer Anteil Tiefenfiltration zu konstatieren ist. Bei einem grobkörnigen Teststaub mit breiter Partikelgrößenverteilung konnte das raschere Verstopfen des Membranfiltermediums im Vergleich zu einem feinkörnigeren Teststaub mit enger Partikelgrößenverteilung auf die vermehrt durch lokale Störstellen geschwächte Kuchenstruktur, die das unvollständigere Ablösen des Kuchens fördert, zurückgeführt werden. Dass hier vor allem der Feinanteil durch seine erhöhte Haftneigung auch nach der Abreinigung als Sekundärkuchen am Filtermedium haften bleibt und somit zum Restdruckverlust beiträgt, konnte durch Partikelgrößenanalysen untermauert werden.

Die so gewonnenen Erkenntnisse um die detaillierten Verstopfungsund Filtrationsmechanismen bei der zeit- und druckgesteuerten Abreinigungsfiltration wurden mit Hilfe eines modifizierten, auf dem Darcy-Gesetz beruhenden, Kuchengesetzes in mathematische Modellgleichungen übergeführt. Die zentrale Modifikation des ursprünglichen Kuchengesetzes bestand dabei in der Einführung einer veränderlichen, mittleren Partikelabsetzfläche. Um zur mittleren Partikelabsetzfläche zu gelangen, wird die Strömungsgeschwindigkeitsverteilung über die gesamte Partikelabsetzfläche, welche auch die innere Faseroberfläche des Filtermediums umfasst, gedanklich umverteilt, sodass diese in einen nicht durchströmten Bereich und in eine gleichmäßig durchströmte effektive Partikelabsetzfläche unterteilt werden kann. Durch die Staubablagerungen während der Filtration verändern sich die Strömungsgeschwindigkeitsverteilung und damit die effektive Partikelabsetzfläche ständig. Um zur mittleren Partikelabsetzfläche zu gelangen, wird der arithmetische Mittelwert aller effektiven Partikelabsetzflächen im betrachteten Zyklusdauer-Intervall, welches dem zu beschreibenden Druckverlustanstieg entspricht, gebildet. So kann mit ein und demselben modifizierten Kuchengesetz ein Tiefenfiltrationsmechanismus durch eine vergleichsweise hohe mittlere Partikelabsetzfläche und ein Patchy Cleaning Mechanismus durch eine vergleichsweise niedrige mittlere Partikelabsetzfläche modelliert werden. Mit Hilfe des gegenständlichen Modells und der Anpassung der darin enthaltenen prozessspezifischen Parameter konnte eine gute Übereinstimmung zwischen Versuchs- und Modelldruckverlustverläufen für einen großen Betriebsparameterbereich erziehlt werden.

Abschließend konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe des gegenständlichen Modells eine Hochrechnung eines Druckverlustverlaufes bei geringer Filtrationsgeschwindigkeit und langer Versuchszeit auf Basis von kurzzeitigen Versuchen mit höherer Filtrationsgeschwindigkeit möglich ist. Hierfür wurde die Abhängigkeit der prozessspezifischen Parameter bei hohen Filtrationsgeschwindigkeiten mit Hilfe von Potenzfunktionen beschrieben und eine Extrapolation auf eine geringe Filtrationsgeschwindigkeit vorgenommen. Die so erhaltenen prozessspezifischen Parameter für eine geringe Filtrationsgeschwindigkeit wurden in die entsprechenden Modellgleichungen eingesetzt. Der so erhaltene Druckverlustverlauf stimmt qualitativ und quantitativ gut mit dem korrespondierenden, experimentell ermittelten, Druckverlustverlauf bei geringer Filtrationsgeschwindigkeit überein.

#### Abstract

Due to their high fine dust separation efficiency, cleanable dust filter media are commonly used in the industry for dedusting dust-laden gas streams with dust loads of several g/m<sup>3</sup>. As a result of the multitude of influencing factors, even nowadays empiric knowledge is needed when it comes to the selection of a suitable filter medium for a specific filtration task. The involved risk may be minimized by preliminary tests on filter test rigs. To simulate a long operation time in a reasonable amount of test time in the laboratory, an aging procedure, consisting of a high number of filtration cycles, is included in relevant test-standards. To deflect significant information from these filter tests, the basic clogging- and filtration-mechanisms should deviate as little as possible from the industrial reality. Hence, the need for a detailed knowledge of the clogging- and filtration mechanisms which are closely connected to the pressure drop evolution during the aging procedure arises.

Based on the considerations above, a model describing the pressure drop evolution during timeand pressure-controlled cleanable dust filtration was developed within the scope of this work. In addition to a detailed understanding of the clogging- and filtration mechanism, the model enables a timesaving extrapolation of the pressure drop evolution.

To throw light on the detailed clogging- and filtration mechanisms, a multitude of time- and pressure-controlled test runs were performed in a specially designed filtration apparatus as a start of the present work. Within theses test runs the operation parameters filtration velocity, tank pressure and valve opening time were varied, as well as test dusts with different particle size distribution and different structured filter media were used in terms of a widespread analysis of the occurring clogging- and filtration-mechanisms. The different operation parameters showed no significant influence on the basic filtration mechanisms. On the other hand it was trivially shown that a Teflon-coated membrane filter medium increases the amount of cake filtration, whereas a more porous PI - needlefelt filter medium exhibits an increased amount of depth filtration. The quicker clogging of the membrane filter medium in combination with a coarse test dust with a wide particle size distribution compared to a fine test dust with a narrow particle size distribution was traced back to differences in the respective cake structure. The dust cake consisting of the coarse test dust is less homogeneous due to its comparatively wider particle size distribution. Therefore, its cake structure is locally weakened which results in a more incomplete cake detachment during the periodic regeneration process causing a faster rising residual pressure drop. Thereby, primarily the fine-fraction of the respective test dust sticks to the filter medium, forming the so-called secondary cake, due to its increased adhesive affinity which was verified by particle size distribution measurements.

The knowledge gained from these experiments was then transferred into mathematic modelequations based on a modified Darcy's cake law. Thereby, the introduction of a medium particle deposition area was the essential modification. To get to the medium particle deposition area, the flow velocity distribution across the entire particle deposition area of the specific filter medium, which also includes the inner fibre surface, is theoretically re-distributed: the effective particle deposition area features a perfectly even flow distribution, whereas the differential area between entire and effective particle deposition area is not subject to the flow at all. As dust is deposited on the filter medium, the flow velocity distribution and thus the effective particle deposition area alter perpetually during the filtration process. Therefore, the medium particle deposition area is the arithmetic average of the effective particle deposition areas within the considered cycle-time interval, which corresponds to the respective pressure drop increase. Depth filtration can be modelled by increasing the medium particle deposition area, whereas patchy cleaning can be modelled by decreasing the medium particle deposition area, using the modified cake law mentioned above. A good agreement between model and reality for a wide range of operating parameters was achieved by adapting the process-specific parameter of the model to experimental data.

The present work finally shows how the developed model is capable of extrapolating the pressure drop evolution of a long-time test run at a low filtration velocity based on short-time test runs at higher filtration velocities. Therfore, the dependency of the process-specific model parameters on the high filtration velocities was described by power functions. Based on these power functions, the process-specific parameters were then extrapolated to the low filtration velocity. Finally, by implementing the newly obtained process-specific parameters into the model's-equations, the respective pressure drop curve was modelled. This model pressure drop curve shows good accordance both quantitatively and qualitatively to experimental data achieved from an actual conducted long-time test run with low filtration velocity.

| 1          | EINLEITUNG  | 1        |
|------------|---|----------|
| 2          | PROBLEMSTELLUNG   | 5        |
| 3          | GRUNDLAGEN DER ABREINIGUNGSFILTRATION   | 6        |
| 4          | ALTERUNG VON FILTERMEDIEN   | 11       |
| 4.1        | Chemische Alterung  | 11       |
| 4.2        | Mechanische Alterung  | 11       |
| 4.3        | Alterung durch irreversible Verstopfung des Filtermediums   | 12       |
| 4.4<br>4.5 | Künstliche Alterung im Labor und deren Entwicklung am Beispiel VDI-Richtlinie 3926  | 13<br>17 |
| 5          | PRÜFSTÄNDE ZUR FILTERMITTELPRÜFUNG IM LABOR   | 19       |
| 5.1        | Typ 1 Filtermittelprüfstand nach VDI-Richtlinie 3926  | 19       |
| 5.2        | Typ 2 Filtermittelprüfstand nach VDI-Richtlinie 3926  | 20       |
| 5.3        | Filtermittelprüfstand der BTU Cottbus in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3926   | 21       |
| 5.4        | Filtermittelprüfstand nach JIS Z 8909-1   | 22       |
| 6          | ALTERUNGSKAMMER (FA. PALAS®)  | 23       |
| 6.1        | Aufbau der Alterungskammer  | 23       |
| 6.2        | Einstellen des Dosierluftvolumenstromes   | 27       |
| 0.5<br>64  | Verwendete Teststäube   | 20<br>28 |
| 6.5        | Kalibration des Staubdosierers auf die verwendeten Teststäube   | 20       |
| 6.6        | Verwendete Filtermedien   | 33       |
| 6.7        | Versuchsvorbereitung  | 34       |
|            | 6.7.1 Alterungsversuche mit zeitgesteuerter Abreinigung   |          |
|            | 6.7.2 Alterungsversuche mit druckgesteuerter Abreinigung  | 35       |
| 7          | LITERATURERECHERCHE ZUR MODELLIERUNG UND SIMULATION   | DN       |
|            | DES FILTRATIONSPROZESSES  |          |
| 7.1        | Grundlegende Gesetzmäßigkeiten  | 37       |
| 7.2        | Frühe Modellierung Fest/Flüssig-Filtration  | 39       |
| 7.3        | Fruhe Modellierung Fest/Gas-Filtration  | 42       |
| 7.4<br>7.5 | Zusammenfassung zur Modellierung und Simulation des Filtrationsprozesses  | 45<br>55 |
| 8          | DETAILLIERTE ZIELSETZUNG DIESER ARBEIT  | 57       |
| 9          | DURCHGEFÜHRTE VERSUCHE ZUR AUFKLÄRUNG DER   |          |
| -          | MECHANISMEN BEI DER ALTERUNG  | 59       |
| 9.1        | Versuche zur Messung der Partikelgrößenverteilungen an verschiedenen Orten der Alterungskar   | nmer     |
|            | 9.1.1 Partikelgrößenverteilung des Ausgangsmaterials.   | 60       |
|            | 9.1.2 Partikelgrößenverteilung des im Rohgaskanal mit der Strömung nach oben ans Filtermedium transportierten Sta<br>sowie des sedimentierenden Staubes | ubes,    |
|            | 9.1.3 Partikelgrößenverteilung des nach der Abreinigung an der Filtermediumsoberfläche haftenden Staubes  |          |
| 9.2        | Versuche mit zeitlich hochaufgelöster Druckverlustmessung über das Prüffiltermedium   | 62       |
| 9.3        | Versuche mit Bestimmung der Reststaubmasse im und am Filtermedium   | 62       |
| 9.4        | Versuche mit Variation der Betriebsparameter (Filtrationsgeschwindigkeit, Tankdruck und   |          |
| 0.5        | Ventilottnungszeit)   | 63       |
| 9.3        | versuche mit unterschiedlichen Teststauben und Flitermedien   | 03       |

| 10   | VERSUCHSERGEBNISSE UND DEREN INTERPRETATION  | 64    |
|------|--|-------|
| 10.1 | Interpretation der Ergebnisse der Partikelgrößenanalyse im Hinblick auf den Einfluss der   |       |
|      | Filtrationsgeschwindigkeit auf die Sedimentation im Rohgaskanal  | 64    |
| 10.2 | Interpretation der Versuchsergebnisse hinsichtlich der Aufklärung der Filtrationsmechanismen be  |       |
|      | zeitgesteuerter Alterung   | 67    |
|      | 10.2.1 Analyse der zeitlichen intrazyklischen Druckverlustanstiege   | 68    |
|      | 10.2.1.1 Filtrationsmechanismus - Tiefenfiltration   | 68    |
|      | 10.2.1.2 Filtrationsmechanismus - Inneres Patchy Cleaning  | 69    |
|      | 10.2.1.3 Filtrationsmechanismus - Patchy Cleaning  | 70    |
|      | 10.2.1.4 Filtrationsmechanismus - Kuchenfiltration   | 71    |
|      | 10.2.2 Analyse der Druckverlustentwicklung über eine Vielzahl an Filtrationszyklen   | 72    |
|      | 10.2.2.1 Analyse der Entwicklung des Restdruckverlustes $\Delta p_R(N)$ unter Berucksichtigung der Ergebnisse der<br>Verwehe mit Dertimmung des Restdruckverlustes Ap <sub>R</sub> (N) unter Berucksichtigung der Ergebnisse der | 72    |
|      | 10.2.2.2. Anchers der Entwicklung der Resistaubmasse, sowie Parikeigrobenanaissen  | / 3   |
|      | 10.2.2.2 Analyse der Entwicklung des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens $\Delta p_{C}(N)$  | /3    |
|      | $10.2.2.5$ Analyse der Entwicklung des Ablehingungsduckverlustes $\Delta p_A(N)$ unter Beruckstentigung der Ergeon<br>aus der zeitlich hochaufgelösten Druckverlustmessung   | 79    |
| 10.3 | Analyse des Einflusses des Filtermediums auf die Filtrationsmechanismen  | 81    |
| 10.4 | Analyse des Einflusses des Teststaubes auf die Filtrationsmechanismen  | 84    |
| 10.5 | Analyse des Einflusses verschiedener Betriebsparameter auf die Filtrationsmechanismen  |       |
|      | 10.5.1 Variation der Filtrationsgeschwindigkeit  | 91    |
|      | 10.5.2 Variation des Tankdruckes und der Ventilöffnungszeit (zeitgesteuerte Abreinigungsfiltration)  | 93    |
| 10.6 | Interpretation der Versuchsergebnisse hinsichtlich der Aufklärung der Filtrationsmechanismen be  | Ĺ     |
|      | druckgesteuerter Filtration  | 96    |
| 10.7 | Zusammenfassung der Aufklärung der Filtrationsmechanismen  | 99    |
| 11   | MODELLIERUNG DES DRUCKVERLUSTES BEI ZEITGESTEUERTER<br>ALTERUNG  | 102   |
| 11.1 | Modellgegenstand   | . 103 |
| 11.2 | Modellierung   | . 105 |
| 11.3 | Druckverlust des abgereinigten Kuchens $\Delta p_{C}(N)$   | . 106 |
|      | 11.3.1 Abgereinigte Staubmasse m <sub>C</sub> (N)  | 107   |
|      | 11.3.2 Mittlere Partikelabsetzfläche $\bar{A}_{C}(N)$  | 109   |
|      | 11.3.2.1 Definition der mittleren Partikelabsetzfläche   | 109   |
|      | 11.3.2.2 Veränderung der mittleren Partikelabsetzfläche bei verschiedenen Filtrationsmechanismen   | 112   |
|      | 11.3.2.3 Mathematische Beschreibung der mittleren Partikelabsetzfläche $\bar{A}_{C}(N)$  | 115   |
|      | 11.3.3 Modellgleichung für den Druckverlust des abgereinigten Kuchens $\Delta p_{C}(N)$  | 117   |
| 11.4 | Restdruckverlust $\Delta p_R(N)$   | . 118 |
|      | 11.4.1 Haften bleibende Staubmasse m <sub>R</sub> (N)  | 119   |
|      | 11.4.2 Mittlere Partikelabsetzfläche $A_R(N)$  | 120   |
| 12   | ANPASSEN DES MODELLS FÜR DIE DRUCKGESTEUERTE   |       |
|      | ABREINIGUNGSFILTRATION   | 123   |
| 12.1 | Modellgegenstand   | . 123 |
| 12.2 | Modellkonzept  | . 124 |
| 12.3 | Mathematisches Konzept   | . 125 |

| 2.2 | 1110401                     | inconzept |  | 121 |  |
|-----|-----------------------------|-----------|--|-----|--|
| 2.3 | Mathematisches Konzept. 125 |           |  |     |  |
|     | 12.3.1                      | Zyklusdau | $\operatorname{tr}_{Z}(N)$                     | 126 |  |
|     | 12.3.2                      | Restdruck | verlust Δp <sub>R</sub> (N)                    | 128 |  |
|     |                             | 12.3.2.1  | Anfiltrierte Staubmasse $m_A(N)$               | 129 |  |
|     |                             | 12.3.2.2  | Mittlere Partikelabsetzfläche $\bar{A}_{K}(N)$ | 130 |  |
|     |                             |           |  |     |  |

| 13   | VERGLEICH MODELL VS. EXPERIMENT                                 | 133 |
|------|---|-----|
| 13.1 | Vergleich Modell vs. Experiment bei zeitgesteuerter Alterung    | 133 |
| 13.2 | Vergleich Modell vs. Experiment bei druckgesteuerter Filtration | 141 |

| 14   | <b>EXTRAPOLATION DER PROZESSSPEZIFISCHEN PARAMETER FÜR</b>                                    |       |
|------|---|-------|
|      | DIE HOCHRECHNUNG DES DRUCKVERLUSTVERLAUFES BEI  |       |
|      | ZEITGESTEUERTER ABREINIGUNG   | 143   |
| 14.1 | Verlauf der prozessspezifischen Paramter bei Variation der Filtrationsgeschwindigkeit         | . 144 |
| 14.2 | Extrapolation der prozessspezifischen Paramter in Abhängigkeit der Filtrationsgeschwindigkeit | . 146 |
| 14.3 | Vergleich der Druckverlustverläufe Hochrechnung vs. Versuch                                   | . 148 |
| 15   | ZUSAMMENFASSUNG   | 149   |
| 16   | ANHANG  | 152   |
|      | Partikelgrößenverteilungen des Sekundärkuchens ("Sekundärkuchen") und des gesamt anfiltrien   | ten   |
|      | Staubes ("Kuchen") für verschiedene Filtermedium/Teststaub - Kombinationen                    | . 152 |
|      | Druckverlustverlauf bei Alterungsversuchen mit Variation der Filtrationsgeschwindigkeit       | . 153 |
|      | Druckverlustverlauf bei Alterungsversuchen mit Variation der Ventilöffnungszeit und des       |       |
|      | Tankdruckes   | . 156 |
|      | Vergleich Modell vs. Versuch bei druckgesteuerter Abreinigung und verschiedenen               |       |
|      | Abreinigungsparametern  | . 160 |
|      | Abbildungsverzeichnis   | . 163 |
|      | Tabellenverzeichnis   | . 169 |
|      | Literaturverzeichnis  | . 170 |
|      | Lebenslauf  | . 175 |
|      | Publikationsliste   | . 177 |

## 1 EINLEITUNG

Ein stetig steigendes Umwelt- und Gesundheitsbewusstsein ist die Grundlage für immer strengere Grenzwerte auch in der Luftreinhaltung [1]. Basierend auf den Erkenntnissen zur Gesundheitsgefährdung durch Staubeinwirkung wird hierbei der Entstaubung, einem Teilgebiet der Luftreinhaltetechnik, große Bedeutung beigemessen. Besonders der Feinstaubanteil (Partikelgrößen < 10  $\mu$ m) rückt dabei in den Fokus des öffentlichen Interesses. Zum einen liegt dies an der relativ langen Aufenthaltszeit des Feinstaubs in der Atmosphäre, zum anderen an seiner adsorptiven Anreicherung an gesundheitsschädlichen Substanzen (Schwermetalle, PAK<sup>1</sup>, etc.). Zusammen mit der in Abbildung 1-1 dargestellten Abhängigkeit des anatomischen Abscheidegrades vom aerodynamischen Partikeldurchmesser, wonach Partikel < 10  $\mu$ m vermehrt im Thorax-Bereich abgeschieden werden, um dort über die Alveolen in den Blutkreislauf zu gelangen, wo sie ihre toxikologische Wirkung entfalten können, erklärt sich das medizinisch- öffentliche Interesse am Feinstaub. Darin liegt auch die ständige Weiterentwicklung der Staubabscheider bis hin zu ihrem heutigen hohen Stand der Technik begründet.



Abbildung 1-1: Partikelabscheidegrade im menschlichen Atemtrakt nach [2]

Als mengenmäßig größte anthropogene Feinstaubquellen in Österreich im Jahr 2011 sei laut dem Österreichischen Umweltbundesamt neben der Industrie, dem Kleinverbrauch und der Landwirtschaft auch der Verkehr genannt (siehe Abbildung 1-2). Mit der wissenschaftlichen Untersuchung von diffusen Emissionen aus der verkehrsbedingten Wiederaufwirbelung von Straßenstaub haben sich beispielsweise Koschutnig et al. beschäftigt [4][5].

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe



Abbildung 1-2: Trend der PM10-Emmissionen nach Sektoren [3]

Neben dem Gesundheitsaspekt stellt ein hoher Feinstaubgehalt in der Umgebung unter Umständen auch ein Sicherheitsrisiko dar. So fürchtet beispielsweise die Regierung Chinas, dass Terroristen gezielt Tage mit besonders hoher Feinstaubkonzentration in der Umgebungsluft nützen könnten, um Anschläge zu verüben. Dies liegt in der mit den hohen Feinstaubkonzentrationen einhergehenden Sichtbehinderung begründet, welche die landesweit installierten Überwachungskameras nicht mehr effektiv arbeiten lässt [6].

Wie Abbildung 1-3 zeigt, besitzen filternde Abscheider ein vergleichsweise hohes Feinstaubabscheidevermögen im Feld der Staubabscheider. Aufgrund der oben erwähnten, vom Feinstaub ausgehenden, Gesundheitsgefährdung in Kombination mit stetig verschärften Feinstaubgrenzwerten, kommen in der Industrie vermehrt filternde Abscheider zum Einsatz. Wenn Abgasströme Partikelkonzentrationen von mehreren g/m<sup>3</sup> aufweisen, werden zu ihrer Reinigung bevorzugt Abreinigungsfilter eingesetzt. Die Filtermedien werden hierbei ausgehend vom unbestaubten Zustand mit einem staubhaltigen Rohgasstrom beaufschlagt; der Druckverlust über das Filtermedium steigt. Bei Erreichen einer vorgegebenen Filtrationszykluszeit (Zeit zwischen zwei Abreinigungen) im Fall der zeitgesteuerten Abreinigung, bzw. eines vorgegebenen maximalen Druckverlustes über das Filtermedium bei druckgesteuerter Abreinigung, erfolgt eine Abreinigung des Filtermediums. Der Druckverlust unmittelbar vor der Abreinigung wird Abreinigungsdruckverlust genannt. Die Abreinigung kann mechanisch durch Rütteln und/oder pneumatisch mittels reingasseitigem Druckluftpulses erfolgen. Durch die Abreinigung des Staubes sinkt der Druckverlust auf den Restdruckverlust (Druckverlust unmittelbar nach der Abreinigung) ab und ein neuer Filtrationszyklus beginnt.



Abbildung 1-3: Abscheidegrade unterschiedlicher Staubabscheider [7]

Im Vergleich zu elektrischen Abscheidern und Zyklonen weisen Abreinigungsfilter hohe Fraktionsabscheidegrade im Feinstaubbereich auf. Gegenüber Nasswäschen (z.B. Venturiwäscher) zeichnet sich die Technologie der Abreinigungsfilter durch ein Fehlen des sonst zu entsorgenden, kontaminierten Waschmittels, sowie eines vergleichsweise niedrigeren spezifischen Energiebedarfes aus. Dies alles verhilft Abreinigungsfiltern in vielen Industriebereichen zur Marktführerschaft. Die Tendenz zu immer niedrigeren Feinstaubgrenzwerten führt auch zur Adaption von Konkurrenztechnologien. So werden beispielsweise Elektroabscheider nachträglich mit einem nachgeschalteten Abreinigungsfilter versehen um einen höheren Fraktionsabscheidegrad im Feinstaubbereich zu erreichen (Hybridfilter).

Obwohl Filtermedien für filternde Abscheider einen hohen technischen Entwicklungsstand erreicht haben, beruht die Auswahl von Filtermedien und die Auslegung von industriellen Abscheideanlagen auch heute noch größtenteils auf empirischen Erfahrungen. Dies liegt vor allem an der großen Anzahl Einflußfaktoren (z.B. Rohgaskonzentration, von Filtrationsgeschwindigkeit, Staubart, etc.) sowie deren komplexes, nur schwer zu durchschauendes, Zusammenspiel. Dies bringt gewisse Unwägbarkeiten bei der Auslegung von filternden Abscheideanlagen mit sich. Durch Vorversuche an Filtermittelprüfständen mit den zugehörigen Prüfvorschriften wird versucht diese Risiken zu minimieren.

Eingedenk einer Betriebsdauer von 2-4 Jahren in der Praxis, ist bei den verschiedenen nationalen Prüfvorschriften für abreinigbare Filtermedien [8]-[12] eine künstliche Alterungsphase vorgesehen, welche die lange Betriebsdauer in kurzer Zeit im Labor nachbilden soll. Die nach der Alterungsphase durchgeführten filtrationstechnischen Untersuchungen und die daraus erhaltenen Ergebnisse sollen so repräsentativ für eine lange Betriebsdauer sein.

Die gegenständliche Arbeit beschäftigt sich vornehmlich mit der künstlichen Alterung von abreinigbaren Filtermedien im Labor. Dabei beeinflussen nicht nur die Betriebsparameter (z.B.: Filtrationsgeschwindigkeit, Rohgaskonzentration, …), sondern auch das jeweilige Filtermedium und der Teststaub und sogar der jeweils verwendete Prüfstand [13] den Druckverlustverlauf über das Prüffiltermedium während der Alterung. Die Druckverlustentwicklung stellt dabei ein wichtiges Vergleichskriterium von verschiedenen Filtermedien dar.

Aktuelle Erkenntnisse um die Filtrationsmechanismen bei der Alterung fließen immer wieder in die Änderung der einschlägigen Prüfvorschriften ein. Die letzten diesbezüglichen Änderungen im europäischen Raum, welche in der DIN-ISO 11057 [9] berücksichtigt wurden, stammen aus dem Jahr 2011. Es kann daher angenommen werden, dass weiterhin ein Aufklärungsbedarf betreffend der detaillierten Filtrationsmechanismen, welche bei der Alterung auftreten, besteht.

Um Untersuchungen im Hinblick auf die Aufklärung der Filtrationsmechanismen bei der Alterung durchführen zu können, wurde im Rahmen vorangegangener Arbeiten [14] bereits ein eigens für die Alterung konzipierter Filterprüfstand (siehe Abschnitt 6) entwickelt und gebaut. Erste Untersuchungen, die mit diesem Prüfstand durchgeführt wurden, zeigen, dass die zeitgesteuerte Alterung in einer vollständigen Verstopfung des Filtermediums mündet. Der Zeitpunkt dieser vollständigen Verstopfung hängt dabei stark von den Betriebsparametern, wie beispielsweise der Dauer der Filtrationszyklen, und damit verbundenen dem Druckverlustverlauf ab [15].

Ein auf physikalischen Grundlagen basierendes mathematisches Modell des Druckverlustverlaufes bei der Alterung würde helfen den Kenntnisstand um die bei der Alterung auftretenden Filtrationsmechanismen zu verbessern. Überdies wäre solch ein Modell die Grundlage für eine zeitsparende Hochrechnung des Druckverlustverlaufes bei verschiedenen Betriebsparametern.

4

## 2 **PROBLEMSTELLUNG**

Die Alterung von abreinigbaren Staubfiltermedien im Labor soll diese in einer kurzen Zeit in einen Zustand überführen, der einer langen Betriebsdauer entspricht. In diesem Zustand können die Staubfiltermedien dann betreffend ihr Langzeitfiltrationsverhalten untersucht und verglichen werden.

In dieser Arbeit soll zunächst der Alterungsprozess detailliert untersucht werden, um die dabei auftretenden Verstopfungs- und Filtrationsprozesse genauer zu verstehen. Die dafür nötigen Alterungsversuche sollen an einer in vorangegangenen Arbeiten am Institut eigens dafür konzipierten Prüfapparatur, der Alterungskammer (siehe Abschnitt 6), durchgeführt werden. Die Alterungskammer ist aufgrund ihrer Spezialisierung auf den Alterungsprozess im Vergleich zu herkömmlichen Filterprüfständen (siehe Abschnitt 5) weniger komplex im Aufbau, daher vergleichsweise kostengünstig und einfach zu bedienen. Für diese Untersuchungen sollen variable Filtrationsgeschwindigkeiten und Abreinigungsbedingungen, unterschiedliche Teststäube, sowie verschiedene typisch in der Industrie eingesetzte Filtermedien berücksichtigt werden. Die detaillierte Auswertung und Interpretation der so gewonnenen Versuchsdaten bei verschiedenen Testparametern soll ein genaueres Verständnis über die Filtrations- und Verstopfungsvorgänge bei der Alterung abreinigbarer Staubfiltermedien im Labor ermöglichen.

Als Schwerpunkt der gegenständlichen Arbeit soll ein mathematisches Modell entwickelt werden, welches den Druckverlustverlauf während der (zeitgesteuerten) Alterung im Labor nachzubilden im Stande ist. Dabei soll das zuvor erarbeitete Verständnis um die Vorgänge bei der Alterung helfen alle als maßgeblich identifizierten Mechanismen in das mathematische Modell zu integrieren. Das so erarbeitete Modell soll überdies auf die, zumeist in der Industrie vorzufindende, druckgesteuerte Abreinigungsfiltration anwendbar sein und im Rahmen dieser Arbeit dafür angepasst werden.

Desweiteren soll der Einfluss oben genannter Betriebs- und Versuchsparameter auf das Modell diskutiert werden. So soll das Modell als Basis für zeitökonomische Hochrechnungen des Langzeitfiltrationsverhaltens, insbesondere des Druckverlustverlaufes, von abreinigbaren Filtermedien, basierend auf kurzzeitigen Laborversuchen, dienen.

## **3** GRUNDLAGEN DER ABREINIGUNGSFILTRATION

Unter Abreinigungsfiltration versteht man eine Filtration bei der das mit Staubpartikeln beladene Filtermedium periodisch regeneriert bzw. abgereinigt wird. Die Regeneration kann dabei pneumatisch mittels Druckstoß und/oder Rückspülen oder mechanisch durch Rütteln bzw. Vibrieren erfolgen.

Bei der Regeneration werden die zuvor anfiltrierten Staubpartikeln weitestgehend vom Filtermedium entfernt und damit der Druckverlust über das Filtermedium verringert, bevor die nächste Filtrationsperiode bzw. der nächste (Filtrations-)Zyklus startet. Die Regeneration kann nach einer vorgegebenen Zyklusdauer, zeitgesteuert, oder bei Erreichen eines vorgegebenen Abreinigungsdruckverlustes  $\Delta p_A$ , druckgesteuert, erfolgen.



Abbildung 3-1: Druckverlustverlauf bei zeitgesteuerter Abreinigungsfiltration. Die Regenerierung des Filtermediums erfolgt nach einer festgelegten Zyklusdauer.

Abbildung 3-1 zeigt einen Druckverlustverlauf bei zeitgesteuerter Regeneration bzw. Abreinigung. Der Druckverlust steigt während der Filtrationsperiode, ausgehend vom Leedruckverlust des unbestaubten Filtermediums  $\Delta p_0$ , durch die Beaufschlagung des Filtermediums mit Staub an. Nach einer vorgegebenen Zyklusdauer erfolgt die Regenerierung des Filter-

mediums, wobei ein Großteil des anfiltrierten Staubes vom Filtermedium entfernt wird. Dadurch fällt der Druckverlust über das Filtermedium vom Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_A$ unmittelbar vor der Abreinigung auf den Restdruckverlust  $\Delta p_R$  unmittelbar nach der Abreinigung ab. Der Leerdruckverlust des unbestaubten Filtermediums  $\Delta p_0$  wird dabei nicht mehr erreicht, da die Regenerierung i.d.R. nicht ganz vollständig erfolgt. Somit steigen bei zeitgesteuerter Regeneration der Restdruckverlust unmittelbar nach der Abreinigung, als auch der Abreinigungsdruckverlust unmittelbar vor der Abreinigung aufgrund irreversibler Verstopfung des Filtermediums stetig an. Abbildung 3-2 zeigt einen Druckverlustverlauf bei druckgesteuerter Regeneration bzw. Abreinigung. Hier steigt der Druckverlust ausgehend vom Leerdruckverlust des unbestaubten Filtermediums  $\Delta p_0$  bis zum Erreichen eines vorgegebenen Abreinigungsdruckverlustes  $\Delta p_A$  an, bevor die Abreinigung erfolgt und der nächste



Abbildung 3-2: Druckverlustverlauf bei druckgesteuerter Abreinigungsfiltration. Die Regenerierung des Filtermediums erfolgt bei Erreichen eines festgelegten Abreinigungsdruckverlustes ∆p<sub>A</sub>.

Filtrationszyklus ausgehend vom Restdruckverlust  $\Delta p_R$  startet. Der Abreinigungsdruckverlust ist konstant, wohingegen der Restdruckverlust aufgrund irreversibler Verstopfung des Filtermediums stetig ansteigt und die Zyklusdauer abnimmt.

Eine typische apparative Ausführung von Abreinigungsfiltern in der Industrie sind Schlauchfilter mit Druckstoßabreinigung, wie beispielhaft in Abbildung 3-3 dargestellt ist. Im unteren linken Bereich tritt das mit Partikeln beladene Rohgas über einen Einlassstutzen (E) in

die Schlauchfilteranlage ein und wird im Saugbetrieb von außen über die vier unten verschlossenen Filterschläuche (A) geleitet, wo sich der Staubkuchen ausbildet. Die im Rohgas enthaltenen Partikeln werden dabei großteils vom Filtermedium, welches die Filterschläuche bildet, zurückgehalten. Kopfplatte (D) Eine in der die Filterschläuche eingelassen sind, verhindert Kurzschlussströmungen vom Roh- ins Reingas. Das so aufbereitete Reingas verlässt die Anlage im oberen linken Bereich. Das Abreinigungssystem beinhaltet neben der Druckluftbereitstellung (nicht eingezeichnet) die elektronisch angesteuerten Ventile (L) und die nachgeschalteten Druckluftdüsen (G), über welche die Druckluft periodisch und entgegen der Durchströmungsrichtung zur Filtermittelregenerierung eingeblasen wird. Dabei wird der auf den



Abbildung 3-3: Schlauchfilter mit Druckstoßabreinigung – schematisch [16]

Filterschläuchen während der Filtrationsperiode aufgebaute Staubkuchen in den Staubtrichter (I) abgeworfen und über ein Zellenrad (K) aus der Filteranlage geschleust. Damit die Filterschläuche während des Saugbetriebes nicht kollabieren, werden diese von einem metallenen Filterkorb gestützt (B).

Das Filtermedium, aus dem die Filterschläuche gefertigt sind soll eine möglichst vollständige Abscheidung der Partikelfracht des Rohgases gewährleisten und überdies einen geringen Anstieg des Restdruckverlustes aufweisen. Ein rascher Anstieg des Restdruckverlustes bedingt einen energetischen und damit monetären Mehraufwand zur Durchströmung des Filtermediums und führt in weiterer Folge zur rascheren Unwirtschaftlichkeit des Filterbetriebes. Um das mit dem Restdruckverlustanstieg verbundene Verblocken des Filtermediums hintanzuhalten, werden bevorzugt Oberflächenfiltermedien eingesetzt, die durch ihre rohgasseitig dichte und glatte Faserstruktur ein Eindringen der Staubpartikel in die Tiefe des Filtermediums weitestgehend verhindern sollen. Gelangen Staubpartikel in die Tiefe des Filtermediums, können diese oft nicht mehr bei der periodisch erfolgenden Regeneration entfernt werden und tragen so wesentlich zum Verblocken und damit zum Restdruckverlustanstieg bei. Die dichte Faserstruktur von Oberflächenfiltermedien fördert dagegen die rasche Brückenbildung durch den anfiltrierten Staub und verringert damit das Eindringen von Partikeln in die Tiefe des Filtermediums. Durch die glatte rohgasseitige Oberfläche haftet der, sich während der Filtrationsperiode ausbildende, Staubkuchen nur lose am Filtermedium und kann bei der Regeneration weitestgehend vollständig abgeworfen werden.

Bei der Regeneration mittels Druckstoßabreinigung helfen mehrere Effekte den zuvor anfiltrierten Staub vom Filtermedium möglichst vollständig zu entfernen. Der Druckluftstoß beschleunigt das Filtermedium, welches bei Erreichen der maximalen Auslenkung abrupt abgebremst wird. Diese plötzliche Verzögerung führt zum möglichst vollständigen Abwerfen des zuvor gebildeten Staubkuchens. Zusätzlich reißt der Druckluftstoß Sekundärluft mit in den Filterschlauch. Dieser Rückspülvolumenstrom sorgt für ein Durchblasen entgegen der Durchströmungsrichtung während der Filtrationsphase und hilft damit zusätzlich bei der Entfernung von Staubpartikeln (Durchblaseeffekt).

Idealerweise wird ein stabiler Betrieb angestrebt, bei dem der anfiltrierte Staub perfekt homogen auf der Oberfläche des Filtermediums abgelagert und bei der nachfolgenden Regeneration vollständig abgereinigt wird.

Abbildung 3-4 zeigt schematisch den ideal stabilen Druckverlustverlauf. Das progressive Ansteigen des Druckverlustes  $\Delta p$  über das Filtermedium im ersten Filtrationszyklus steht für den Übergang von der Tiefen- zur Oberflächenfiltration. In den darauffolgenden Zyklen steigt bei ideal stabilem Verhalten der Druckverlust, typisch für reine Oberflächenfiltration mit perfekt homogener Staubverteilung, streng linear an. Die darauffolgenden idealen Regenerationen vermögen den jeweils zuvor anfiltrierten Staub gänzlich abzureinigen worauf der Restdruckverlust  $\Delta p_R$  konstant bleibt (stabil).



Abbildung 3-4: Druckverlustverlauf bei druckgesteuerter Regeneration - stabiles und instabiles Betriebsverhalten [16]

Bei in Abbildung 3-4 dargestelltem realem Verhalten steigt der Druckverlust im ersten Zyklus aufgrund eines Anteiles an Tiefenfiltration ebenso progressiv an. Durch die inhomogene Verteilung von Staub am und im Filtermedium entstehen in den Folgezyklen bei realem Verhalten bevorzugte Strömungskanäle, welche örtlich erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten zur Folge haben. Der Druckverlust innerhalb eines Zyklus steigt dadurch rasch an. Noch während des Zyklus wird in den bevorzugt durchströmten Bereichen mit erhöhter Strömungsgeschwindigkeit vergleichsweise mehr Staub abgelagert. Dies führt zu einem intrazyklischen Strömungsausgleich über die Oberfläche des Filtermediums. Der anfangs steile Druckverlustanstieg geht innerhalb des Zyklus wieder in den linearen Anstieg, bei nun homogener Oberflächenfiltration über. Zusammen ergibt sich demnach ein degressiv ansteigender Druckverlustverlauf, auch während der Folgezyklen. Auch ist im realen Fall die Regeneration keine Vollständige. Im und am Filtermedium haften bleibender Staub sorgt für einen stetigen Restdruckverlustanstieg (instabil).

Die dichte Faserstruktur, sowie glatte Oberfläche verhindert nicht nur das vorzeitige gänzliche Verblocken des Filtermediums, sondern fördern auch einen raschen Staubkuchenaufbau. Der Staubkuchen an der Oberfläche des Filtermediums stellt eine hochwirksame filternde Schicht dar, welche den Partikeldurchtritt ins Reingas weitestgehend unterbindet.

Abbildung 3-5 zeigt einen typischen Verlauf der Partikel-Konzentration im Reingas über die Filtrationszeit. Die Filtration beginnt mit dem unbestaubten Filtermedium und damit einem gewissen Anteil an Tiefenfiltration. Dabei treten Staubpartikel auch durch das Filtermedium ins Reingas über; die Partikel-Konzentration im Reingas ist dementsprechend hoch. Hat sich ein Staubkuchen am Filtermedium ausgebildet, sinkt die Partikel-Konzentration im Reingas während der Kuchenfiltrationsphase auf ein vergleichsweise niedriges Niveau ab. Die Konzentrationsspitzen an Partikeln im Reingas werden in den Folgezyklen bei den Abreinigungen erreicht. Unter anderem führt das Zurückschlagen des durch den Abreinigungsimpuls beschleunigten Filtermediums auf die Stäbe des Stützkorbes zur Ablösung von Partikeln ins Reingas. Überdies fehlt unmittelbar nach einer Abreinigung die filtrationseffiziente Kuchenschicht, wodurch vermehrt Partikeln ins Reingas übertreten können, bis sich innerhalb des Zyklus abermals eine Kuchenschicht ausgebildet hat.



Abbildung 3-5: Verlauf der Partikel-Konzentration c im Reingas – schematisch [16]

Die Auswahl eines geeigneten Filtermediums bei der Auslegung von Entstaubungsanlagen beruht trotz des hohen Entwicklungsstandes nach wie vor auf empirisch gewonnenen Erkenntnissen. Man versucht die damit verbundenen Unwägbarkeiten durch Vorversuche im Rahmen genormter Filtermittel-Prüfverfahren im Labor zu minimieren.

## 4 ALTERUNG VON FILTERMEDIEN

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

Im Rahmen der Filtermittelprüfung im Labor wird unter (künstlicher) Alterung hingegen der Prozess verstanden, bei dem das gegenständliche Filtermedium in einer vergleichsweise kurzen Zeit einer großen Anzahl an Filtrationszyklen ausgesetzt wird. Dies soll dazu dienen eine lange Betriebsdauer im Labor nachzubilden.

Im Folgenden wird kurz auf die Alterungsmechanismen (chemisch, mechanisch, irreversible Verstopfung des Filtermediums) eingegangen, bevor die Entwicklung der künstlichen Alterung im Labor am Beispiel der VDI-Richtlinie 3926 (1994 [17] - 2004 [8]) und eine von Schuberth et al. [15] vorgeschlagene Art der künstlichen Alterung vorgestellt werden.

### 4.1 Chemische Alterung

Beim chemischen Altern wird das Filtermittel unter anderem durch Wärme, Dampf, Säuren, Alkalien, Lösungsmittel, Licht sowie Prozess- und Rauchgase irreversibel geschädigt. In Datenblättern zu den jeweiligen Filtermedien wird daher oft deren Beständigkeit gegen Säuren und Alkalien angegeben. Auch sind häufig die Langzeit- sowie Spitzentemperaturbeständigkeit vom Filtermittelhersteller für dessen Produkte spezifiziert.

### 4.2 Mechanische Alterung

Die Ursache der mechanischen Alterung liegt in der Art und Weise der Abreinigung der industriell eingesetzten Filtermedien begründet. Bei der Druckstoßabreinigung wird das Filtermedium stark beschleunigt und wieder abgebremst. Das folgende Zurückschlagen auf die Stützstäbe des Filterschlauches ruft eine zusätzliche mechanische Belastung des Filtermediums hervor. In Summe können diese mechanischen Belastungen während des Betriebes den Faserverbund eines Filtermediums lockern oder gar zum Reißen des Filtermediums führen. Um einen möglichst stabilen Faserverbund zu gewährleisten, werden in der Industrie häufig eingesetzte textile Filtermedien vernadelt (siehe Abbildung 4-1). Dabei werden Nadeln mit Widerhaken durch ein, zwischen Abstreif- und Stichplatte eingespanntes, Vlies getrieben. Die Fasern des Vlieses werden durch die mit Widerhaken versehenen Nadeln erfasst, umgelegt und bei folgenden Einstichen verhakt und damit stärker miteinander verbunden. Durch das Vernadeln wird somit ein stabiler Faserverbund erreicht, der meist durch ein Multifilament-Stützgewebe noch in seiner Zugfestigkeit verstärkt wird. Eine weitere Art der Vliesverfestigung gelingt mittels Wasserstrahltechnologie. Hierbei werden die zunächst locker angeordneten Fasern vom Wasserstrahl erfasst, umorientiert, verwirbelt und mit anderen Fasersträngen verknotet und somit ein stabiler Faserverbund erreicht.



Abbildung 4-1: Vernadelung eines Vlies – schematisch [18]

#### 4.3 Alterung durch irreversible Verstopfung des Filtermediums

Wie in Abschnitt 3 bereits erwähnt, ist im industriellen Filterbetrieb meist kein vollständig stationäres Verhalten des Restdruckverlustes zu beobachten. Vielmehr zeigt sich durch die unvollständige Regeneration des zuvor anfiltrierten Staubes ein zunehmendes, irreversibles Verstopfen des Filtermediums. Die irreversible Verstopfung beeinflusst hierbei nicht nur den Anstieg des Restdruckverlustes, sondern auch die Inhomogenität der Staubverteilung in und am Filtermedium. Eine inhomogene Staubverteilung bedeutet einen inhomogenen Staubkuchenaufbau, wodurch der Druckverlust über das Filtermedium während der Filtrationsphase vergleichsweise rascher ansteigt und somit auch die Zyklusdauer negativ beeinflusst wird. Dies führt zu einem erhöhten Energiebedarf zur Regeneration (häufigere Abreinigungen) und zur Durchströmung (höherer Druckverlust) des Filtermediums.

## 4.4 Künstliche Alterung im Labor und deren Entwicklung am Beispiel VDI-Richtlinie 3926

Die künstliche Alterung im Labor dient dazu, das jeweilige Filtermedium innerhalb einer relativ kurzen Zeit in einen Zustand zu versetzen, der einer langen Betriebsdauer entspricht. Hierfür wird das betreffende Filtermedium in einer relativ kurzen Zeit einer großen Anzahl an Filtrationszyklen ausgesetzt.

Im Folgenden wird die Entwicklung der künstlichen Alterung im Labor am Beispiel der VDI-Richtlinie 3926 (1994) [17] bis hin zu der aus ihr hervorgegangenen DIN-ISO 11057 (2011) [9] diskutiert. Auch wird eine davon verschiedene Methode zur Beurteilung der Alterung, welche von Schuberth [15] vorgeschlagen wird, vorgestellt.

Im deutschsprachigen Raum hat sich die VDI-Richtlinie 3926 seit ihrem Erscheinen im Jahr 1994 [17] für die standardisierte Prüfung von abreinigbaren Filtermedien etabliert. Dabei wurden die in ihr enthaltenen Prüfvorschriften auf der Basis von wissenschaftlichen Erkenntnissen immer wieder dem aktuellen Wissenstand angepasst. Im Jahr 2011 ist die zu diesem Zeitpunkt aktuelle VDI-Richtlinie 3926 aus 2004 [8] in die Deutsche Norm DIN-ISO 110557 [9] übergegangen, wobei die Prüfvorschriften wiederum angepasst wurden.

Hier sollen die Änderungen der in den oben genannten Richtlinien enthaltenen Prüfvorschriften aufgezeigt und diskutiert werden. Besonderes Augenmerk soll dabei auf die Veränderung der Prüfvorschriften hinsichtlich der künstlichen Filtermittelalterung gelegt werden.

In der Ursprünglichen Fassung der VDI-Richtlinie 3926 aus dem Jahr 1994 [17] wird bei den Prüfvorschriften zwischen der Verwendung der oben beschriebenen Typ 1 und des Typ 2 Prüfstandes unterschieden. Im Wesentlichen besteht der Unterschied darin, dass bei Verwendung des Typ 1 Prüfstandes 100 druckgesteuerte Zyklen, bei Verwendung des Typ 2 Prüfstandes hingegen nur 10 druckgesteuerte Zyklen zur Filtermittelprüfung vorgeschrieben sind. Die detaillierten Standardbedingungen für die Filtermittelprüfung nach VDI-Richtlinie 3926 (1994) [17] sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Die industrielle Einsatzdauer von abreinigbaren Filtermedien beträgt in etwa zwei bis vier Jahre, wobei ungefähr 200.000 bis 400.000 Filtrationszyklen absolviert werden [13]. Unter diesem Aspekt erscheint eine Filtermittelprüfung welche lediglich 10 bzw. 100 Filtrationszyklen und damit keine nennenswerte Alterungsphase beinhaltet, als wenig aussagekräftig, was die Vorhersage des Langzeitfiltrationsverhaltens von abreinigbaren Filtermedien betrifft.

|  | Typ 1          | Typ 2            |
|--|----------------|------------------|
| Rohgasvolumenstrom [m <sup>3</sup> /h]           | 5,8            | -                |
| Filtrationsgeschwindigkeit [m/h]                 | 180            | 180              |
| Staubkonzentration am Filter [g/m <sup>3</sup> ] | 5              | 5                |
| Druckverlust vor der Abreinigung [Pa]            | 1000           | 1200             |
| Tankdruck [MPa]                                  | 0,5            | 0,25             |
| Ventilöffnungszeit [ms]                          | 50             | 50               |
| Teststaub i.d. Regel                             | Mikro-Calcilin | TiO <sub>2</sub> |
| Anzahl der Filtrationszyklen [-]                 | 100            | 10               |

| Tabelle 1 | l : Standardh | edingungen | für die | Filtermit   | telprüfung  | nach   | VDI-Richtlinie | 3926 (1994)  | [17] |
|-----------|---------------|------------|---------|-------------|-------------|--------|----------------|--------------|------|
| I abene i | . Standar ab  | campangen  | iui uic | 1 meet mite | cerpi arang | , macn | , DI Inchemie  | 0/20 (1// 1) | 1 1  |

In der Neuauflage der VDI-Richtlinie 3926 aus dem Jahr 2004 [8], sind daher im Vergleich zur VDI-Richtlinie 3926 aus dem Jahr 1994 [17] neben geänderten Versuchsparametern auch ein neuer Prüfablauf zur Filtermittelprüfung vorgesehen worden. Auch wird nun, wie in Tabelle 2 ersichtlich wird, bei den Versuchsparametern nicht mehr zwischen Prüfstand Typ 1 und Typ 2 unterschieden. Vergleichende Messungen sollen dabei im jeweils selben Prüfstandtyp vorgenommen werden. Die Reduktion der in der ursprünglichen Version der VDI-Richtlinie 3926 von 1994 vorgesehenen Filterflächenbelastung von 180 m/h (entspricht m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h) auf 120 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h in der Version der VDI-Richtlinie von 2004 kann unter anderem mit der von Gäng gemachten Beobachtung, dass der Restdruckverlust eines abreinigbaren Filtermediums selbst nach dessen Alterung mit 10.000 Zyklen à 5 s relativ stark ansteigt, begründet werden [19][20]. Durch die Reduktion der Filterflächenbelastung auf 120 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h kann ein für die Filtermittelprüfung angestrebter quasistationärer Restdruckverlust nach der Alterung eher gewährleistet werden.

| <b>Tabelle 2: Versuchsparameter und Toleran</b> | zen für die Filtermittelprüfung nach | VDI-Richtlinie 3926 (2004) [8] |
|---|--------------------------------------|--------------------------------|
|---|--------------------------------------|--------------------------------|

|   | Sollwert | Toleranz |
|---|----------|----------|
| Filterflächenbelastung [m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> h)] | 120      | ±3%      |
| Staubkonzentration am Filter [g/m³]                         | 5        | ±10%     |
| Druckverlust vor der Abreinigung [Pa]                       | 1.000    | ±1%      |
| Tanküberdruck [MPa]   | 0,5      | ±3%      |
| Ventilöffnungszeit (elektrisch) [ms]                        | 60       |          |
| Teststaub   | Pura     | 1 NF     |

Die Beurteilung des Langzeitfiltrationsverhaltens von abreinigbaren Filtermedien betreffend, ist der ebenfalls geänderte Ablauf der Filtermittelprüfung von Bedeutung. Anstelle von nur 10 (Typ 2) bzw. 100 (Typ 1) Zyklen in der VDI-Richtlinie 3926 aus dem Jahr 1994 [17] sind in der VDI-Richtlinie 3926 aus dem Jahr 2004 [8] über 10.000 Filtrationszyklen vorgesehen, bevor eine endgültige Bewertung des jeweiligen Filtermediums anhand dessen Staubrückhaltevermögens bzw. Druckverlustverlaufes erfolgt. Im Detail sind dabei vier Phasen in der Standardprüfung festgelegt, die sowohl druckgesteuerte als auch zeitgesteuerte Zyklen beinhalten, wie in Tabelle 3 ersichtlich wird.

|   | Bedingungen  | Bestimmung der<br>Reingaskonzentration |
|---|--|--|
| 1. Phase: Filterbetrieb im<br>Neuzustand      | 30 Beladungszyklen mit<br>differenzdruckgesteuerter Abreinigung                                      | ja                                     |
| 2. Phase: künstliche Alterung                 | 10.000 Beladungszyklen zeitgetaktet alle<br>5 s  | nicht erforderlich                     |
| 3. Phase: Stabilisierung                      | 10 Beladungszyklen mit<br>differenzdruckgesteuerter Abreinigung                                      | nicht erforderlich                     |
| 4. Phase: Filterbetrieb im gealterten Zustand | 30 Beladungszyklen mindestens mit<br>differenzdruckgesteuerter Abreinigung,<br>mindestens jedoch 2 h | ja                                     |

Tabelle 3: Ablauf der Standardprüfung in vier Phasen nach VDI-Richtlinie 3926 (2004) [8]

Neben der Beurteilung des Filtermediums im Neuzustand in der 1. Phase wird durch die in der 2. Phase vorgesehene künstliche Alterung, zusammen mit der in der 3. Phase folgenden Stabilisierung des Filtermediums versucht, in der 4. Phase einen gealterten Zustand zu erreichen, der eine bessere Beurteilung des Langzeitfiltrationsverhaltens abreinigbarer Filtermedien möglich macht.

Wissenschaftliche Untersuchungen von Binnig et. al. [21] zur in der 2. Phase der Standardprüfung stattfindenden künstlichen Alterung haben jedoch gezeigt, dass die kurze Zyklusdauer von 5 s ungeeignet ist, reale Betriebsbedingungen nachzubilden. Die sich über die Höhe des Filtermediums einstellende Staubverteilung nach einer aus 10.000 Zyklen à 5 s bestehenden Alterung ist laut den Autoren eher mit jener eines relativ neuen Filtermediums vergleichbar, und lässt somit wenig aussagekräftige Rückschlüsse auf das reale Alterungsverhalten abreinigbarer Filtermedien zu. Als Grund für diese Abweichungen vom realen Betriebsverhalten sei der wenig ausgeprägte Staubkuchenaufbau während eines Filtrationszyklus von nur 5 s im Vergleich zu längeren Zyklusdauern angegeben. Von dieser

unrealistischen Staubverteilung über die Höhe des Filtermediums und der damit verbundenen gesamt im Filtermedium dauerhaft abgelagerten Reststaubmasse werden, laut Binnig et. al. [21] auch das Emissions- und Zykluszeitverhalten nach der Alterung hinsichtlich der Aussagekraft das Langzeitfiltrationsverhalten von Filtermedien betreffend, negativ beeinflusst. Die Autoren weisen zudem darauf hin, dass bei der Verwendung von Zykluszeiten in der Größenordnung von 30-60 s Resultate mit den bestehenden Filterprüfständen Ergebnisse erzielt werden können, die bessere Rückschlüsse auf das Langzeitfiltrationsverhalten von Filtermedien von Filtermedien im industriellen Einsatz erlauben.

Die künstliche Filtermittelalterung hat demnach einen wesentlichen Einfluss auf die Beurteilung des Langzeitfiltrationsverhaltens von abreinigbaren Filtermedien basierend auf den Ergebnissen der standardisierten Filtermittelprüfung. Es ist daher wenig verwunderlich, dass beim Übergang der VDI-Richtlinie 3926 (2004) [8] in die DIN-ISO 11057 aus dem Jahr 2011 [9] wiederum die Alterung ein zentraler Bestandteil der, eine verbesserte Aussagekraft das Langzeitfiltrationsverhalten betreffenden, vorgenommenen Änderungen war.

In Tabelle 4 sind die Versuchsparameter für die Filtermittelprüfung nach DIN-ISO 11057 zusammengefasst.

|  | Sollwert | Toleranz |
|--|----------|----------|
| Filtrationsgeschwindigkeit [m/min]                         | 2        | ±3%      |
| Staubkonzentration am Prüffiltermedium [g/m <sup>3</sup> ] | 5        | ±7%      |
| Druckverlust vor der Abreinigung [Pa]                      | 1.000    | ±1%      |
| Tankdruck [MPa]  | 0,5      | ±3%      |
| Ventilöffnungszeit (elektrisch) [ms]                       | 60       |          |
| Prüfstaub  | Pura     | l NF     |

Tabelle 4: Versuchsparameter und Toleranzen für die Filtermittelprüfung nach DIN-ISO 11057 (2011) [9]

Der Ablauf der Filtermittelprüfung ist in nunmehr fünf Standardprüfphasen unterteilt. Die 5. Phase wurde als Option eingeführt, falls in der 4. Phase eine Zyklusdauer von unter 30 s erreicht wird. Durch das Anheben des Abreinigungsdruckes auf 1.800 Pa in der 5. Phase sollen demnach längere Zyklusdauern im Sinne von aussagekräftigeren Ergebnissen aus der Filtermittelprüfung realisiert werden. Die hinsichtlich der Bewertung des Langzeitfiltrationsverhaltens abreinigbarer Filtermedien wichtigste Änderung ist jedoch das Anheben der Zyklusdauer während der 2. Phase der künstlichen Filtermittelalterung von 5 s (VDI-Richtlinie 3926, 2004) auf 20 s in der aktuellen DIN-ISO 11057. Damit können nach den Erkenntnissen von Binnig et. al. [21] die realen Betriebsbedingungen abreinigbarer Staubfiltermedien wesentlich besser nachgebildet

werden. Im Sinne einer moderaten Gesamtprüfdauer wurde dabei die Anzahl der Beladungszyklen von 10.000 auf 2.500 herabgesetzt.

|   | Bedingungen  | Bestimmung der<br>Reingaskonzentration |
|---|--|--|
| 1. Phase: Filterbetrieb im<br>Neuzustand      | 30 Beladungszyklen mit<br>differenzdruckgesteuerter Abreinigung<br>und einem festgelegten<br>Abreinigungsdruckpunkt von 1.000 Pa           | ja                                     |
| 2. Phase: künstliche Alterung                 | 2.500 Beladungszyklen zeitgetaktet<br>jeweils alle 20 s  | nicht erforderlich                     |
| 3. Phase: Stabilisierung                      | 10 Beladungszyklen mit<br>differenzdruckgesteuerter Abreinigung  | nicht erforderlich                     |
| 4. Phase: Filterbetrieb im gealterten Zustand | 2 h Beladungszyklus mit<br>differenzdruckgesteuerter Abreinigung<br>und einem festgelegten<br>Abreinigungsdruckpunkt von 1.000 Pa          | ja                                     |
| 5. Phase: optionale Messung                   | 2 h Beladungszyklus mit<br>differenzdruckgesteuerter Abreinigung<br>und einem festgelegten erhöhten<br>Abreinigungsdruckpunkt von 1.800 Pa | ja                                     |

Tabelle 5: Ablauf der Standardprüfung in fünf Phasen nach DIN-ISO 11057 (2011) [9]

Obige Ausführungen verdeutlichen, dass die künstliche Filtermittelalterung einen entscheidenden Einfluss auf die Aussagekraft der standardisierten Filtermittelprüfung hinsichtlich des Langzeitfiltrationsverhaltens von abreinigbaren Filtermedien besitzt. Die künstliche Filtermittelalterung im Labor soll dabei eine lange Betriebsdauer von industriell eingesetzten Filtermedien in relativ kurzer Zeit nachbilden.

### 4.5 Alterung nach Schuberth

Mit einer eigens für die Alterung konzipierten Prüfapparatur (Alterungskammer – siehe Abschnitt 6) konnte Schuberth in [14] mit den in der DIN-ISO 11057 (2011) [9] Vorschrift zur Prüfung von abreinigbaren Filtermedien angegebenen Alterungsparamtern kein ausreichend stationäres Druckverlustniveau erreichen, wie es für die Bestimmung der Bewertungsparameter notwendig wäre. Bei Fortführung der Alterung stellte Schuberth vielmehr einen progressiven Druckverlustverlauf fest, der in einer vollständigen Verstopfung des Filtermediums mündet.

Die Dauer bis zum Erreichen der vollständigen Verstopfung des Filtermediums hängt dabei von den Betriebsparametern (beispielsweise der Zyklusdauer – siehe [14]), aber auch von der verwendeten Filtermittelprüfapparatur ab. Der im Vergleich zum Typ 1 Prüfstand (siehe Abschnitt 5.1) oder Typ 2 Prüfstand (siehe Abschnitt 5.2) größeren Reingasraum, der von Schuberth verwendeten Alterungskammer (siehe Abschnitt 6), führt zu einer konstruktiv bedingten schwächeren Abreinigungsintensität bei sonst identen Betriebsparametern. Somit war für Schuberth der progressive Anstieg des Restdruckverlustes, der in einer vollständigen Verstopfung des Filtermediums endet, schon bei einem Versuchsparametersatz sichtbar, bei dem in anderen Filterprüfständen noch ein vergleichsweise stationäres Druckverlustverhalten festzustellen ist. Da der Zeitpunkt der vollständigen Verstopfung des Filtermedium [22] und Teststaub [23] abhängt, kann davon ausgegangen werden, dass bei bestimmten Prüfbedingungen solch eine vollständige Verstopfung des Filtermediums auch im Typ 1 oder Typ 2 Filtermittelprüfstand zu beobachten sind.

Schuberth schlägt daher in [14] eine von der DIN-ISO 11057 festgelegten Vorgehensweise verschiedene Alterungsprozedur vor. Anstatt die Alterung auf eine gewisse Zyklenzahl zu beschränken, soll die zeitgesteuerte Alterung fortgeführt werden, bis der durch den steigenden Rest- und damit Abreinigungsdruckverlust anwachsende reingasseitige Unterdruck den Abreinigungsimpuls soweit dämpft, dass durch den nunmehr vermehrt am Filtermedium haften bleibenden Staubkuchen ein relativ leicht feststellbarer extremer Druckverlustanstieg erfolgt.

In weiterer Folge soll nach Schuberth der Zeitpunkt dieses extremen Druckverlustanstieges als alleiniger Beurteilungswert (Alterungskennwert) herangezogen werden. um das Verstopfungsverhalten verschiedener Filtermedium vergleichen zu können. Der Vorteil dieser Methode liegt in dem leicht zu bestimmenden und eindeutigen Beurteilungskriterium, der Zeit bis zur vollständigen Verstopfung des Filtermediums, dem Alterungskennwert. Die bei verschiedenen Filtrationsgeschwindigkeiten bestimmten Alterungskennwerte ergeben eine sogenannte Alterungskennlinie. Mit Hilfe einer mathematischen Beschreibung der Alterungskennlinie ist auch eine Extrapolation der Alterungskennwerte für niedrige Filtrationsgeschwindigkeiten, welche mit vergleichsweise langen Versuchsdauern verknüpft sind, auf Basis von kurzzeitigen Versuchen mit höheren Filtrationsgeschwindigkeiten, möglich. Die Idee der Fortsetzung der zeitgesteuerten Alterung bis zur vollständigen Verstopfung des Filtermediums basiert dabei auf der Beobachtung, dass nach den in der DIN-ISO 11057 (2011) [9] vorgegebenen Anzahl an Filtrationszyklen in der Alterungs-Phase kein stationäres Druckverlustniveau garantiert werden kann. Dieses wäre jedoch erforderlich um die in der DIN-ISO 11057 festgelegten Beurteilungswerte messtechnisch zu bestimmen.

## 5 PRÜFSTÄNDE ZUR FILTERMITTELPRÜFUNG IM Labor

Die Filtermittelprüfung im Labor dient dazu, geeignete Filtermedien für den großtechnischen Einsatz auszuwählen, sowie möglichst stabile Betriebszustände festzulegen. Die Übertragung von im Labor an Filtermittelprüfständen gewonnener Ergebnisse auf reale Betriebszustände in großtechnische Entstaubungsanlagen ist allerdings nur eingeschränkt möglich. Dies liegt in den mannigfaltigen Einflussfaktoren im Realbetrieb, die im Labor nur unzureichend nachgebildet werden können. Als Beispiele seien unterschiedlichste Abgaszusammensetzungen oder die Schwankungen in den Betriebsbedingungen erwähnt. Dennoch kann durch die Filtermittelprüfung im Labor die Anzahl ungleich aufwändigerer Versuche an Pilotanlagen zur Auswahl eines Filtermediums verringert werden.

Die bei der Filtermittelprüfung im Labor verwendeten Prüfstände und die dazugehörigen Prüfbedingungen sind beispielsweise in nationalen Richtlinien festgelegt: VDI-Richtlinie 3926 (1994, 2004) (GER) [17][8] bzw. dessen Nachfolger DIN-ISO 11057 (GER) [9], ASTM D6830-2 (USA) [10], JIS Z 8909-1 (JPN) [11] und GB 12625 (CHN) [12].

Ausgehend von der VDI-Richtlinie 3926 (1994) sowie ihrer Nachfolgeregelwerke, der VDI-Richtlinie 3926 (2004) und der DIN-ISO 11057 (2011), sollen im Folgenden verschiedene Filterprüfstände vorgestellt werden.

In den VDI-Richtlinien 3926 aus den Jahren 1994 und 2004 sind zwei Prüfapparaturen spezifiziert, die hier, neben weiteren Ausführungsbeispielen, kurz vorgestellt werden sollen.

## 5.1 Typ 1 Filtermittelprüfstand nach VDI-Richtlinie 3926

Der Typ 1 Filterprüfstand besitzt einen vertikal angeordneten, rechteckigen Rohgaskanal an dem ein horizontaler Prüfkanal mit kreisförmigem Querschnitt (Ø 140 mm) angeflanscht ist. Ein Teilstrom des Rohgases wird im Querstromprinzip über das bündig mit der Rohgaskanalwand eingespannte Prüffilter(medium) in den Prüfkanal gesaugt (siehe Abbildung 5-1). Das Abreinigungssystem bringt einen Druckluftstoß über ein Blasrohr, entgegen der Durchströmungsrichtung, zur periodischen Regeneration des Filtermediums ein. Ein Absolutfilter schützt die nachgeschalteten Vakuumpumpen und ermöglicht eine gravimetrische Bestimmung der Reingaskonzentration. Massendurchflussregler sorgen für die Einhaltung des in den Prüfbedingungen spezifizierten Volumenstromes über das Prüffiltermedium.



Abbildung 5-1: Typ 1 Filterprüfstand nach VDI-Richtlinie 3926 – schematisch [17].

Aufgrund des Querstromprinzipes verlangt der Typ 1 Filterprüfstand einen vergleichsweise hohen Raumbedarf.

## 5.2 Typ 2 Filtermittelprüfstand nach VDI-Richtlinie 3926

Der Typ 2 Filterprüfstand besitzt einen horizontalen, kreisrunden Rohgaskanal, der durch das Prüffiltermedium vom horizontal in Durchströmungsrichtung anschließenden, kreisrunden Reingaskanal getrennt ist (Abbildung 5-2).



Abbildung 5-2: Typ 2 Filterprüfstand nach VDI-Richtlinie 3926 – schematisch [17]

Ein Bürstendosierer dispergiert einen konstanten Staubmassenstrom in den gänzlich über das Prüffiltermedium geleiteten Rohgasstrom. Eine Vakuumpumpe, zusammen mit Massenflussreglern, sorgt für einen konstanten Volumenstrom über das Prüffiltermedium. Die periodische Regenerierung des Prüffiltermediums erfolgt über einen Druckluftstoß analog zum Typ 1 Filterprüfstand. Der Absolutfilter ermöglicht wiederum eine gravimetrische Bestimmung der Reingaskonzentration und schützt überdies die nachgeschaltete Vakuumpumpe. Die horizontale Anordnung des Rohgaskanales führt bei längeren Filterprüfungen zu Anhäufungen von abgereinigtem Staub vor dem Filtermedium und behindert damit unter Umständen die Filtration.

Die unter anderem aus der VDI-Richtlinie 3926 (1994) [17] hervorgegangene DIN-ISO 11057 (2011) [9] nennt den oben beschriebenen Typ 1 Prüfstand als Referenzapparatur, erlaubt jedoch auch andere Filterprüfapparaturen, wenn diese gleichwertige Messergebnisse zu denen der Referenzprüfapparatur liefern [9].

## 5.3 Filtermittelprüfstand der BTU Cottbus in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3926

In Abbildung 5-3 ist ein in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3926 von der BTU Cottbus entworfener und gebauter Filterprüfstand schematisch dargestellt. Filterprüfstand Der besitzt einen vertikalen, rechteckigen Rohgaskanal. Das kreisrunde Prüffiltermedium (Ø 200 mm) ist analog zum Typ 1 Prüfstand Wand in einer des Rohgaskanales eingelassen, wodurch der abgeworfene Staubkuchen nach unten in einen Staubsammelbehälter abgereinigt wird ohne die nachfolgende Filtration zu behindern. Analog zum Typ 2 Prüfstand wird der gesamte



Abbildung 5-3: Filterprüfstand in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3926 der BTU Cottbus [24]

Rohgasvolumenstrom über das Prüffiltermedium geleitet, wodurch eine Entstaubung der Querströmung wie beim Typ 1 nicht benötigt wird.

### 5.4 Filtermittelprüfstand nach JIS Z 8909-1

Der Standard-Filterprüfstand nach der Japanischen Prüfvorschrift JIS Z 8909-1 [11] besitzt einen vertikalen, rechteckigen Rohgaskanal und einen ebenfalls rechteckigen, horizontal angeordneten Reingaskanal. Der Rohgasstrom wird gänzlich über das, in einer Wand des Rohgaskanales, angeflanschte Prüffiltermedium geleitet. Ein zweistufiger Schneckendosierer sorgt für einen konstanten Staubmassenstrom im Rohgas. Die Regenerierung des quadratischen Prüffiltermediums (300x300 mm) erfolgt mittels Druckluftstoß. Das Blasrohr bzw. dessen Öffnung ist dabei nicht wie bei den oben vorgestellten Filterprüfständen entgegen der Strömungsrichtung und normal zum Prüffiltermedium ausgerichtet, sondern sendet einen Druckluftpuls normal zur Strömungsrichtung, in Richtung der Wand des rechteckigen Reingasraumes. Durch Reflexion des Druckluftpulses an den Wänden des Reingasraumes wird eine abreinigende Wirkung auf das Prüffiltermedium erzielt.



Abbildung 5-4: Filterprüfstand nach JIS Z 8909-1 – schematisch [11]

## 6 ALTERUNGSKAMMER (FA. PALAS®)

Die im Rahmen dieser Arbeit zur Durchführung der Versuchsserien, die für eine detaillierte Untersuchung des Alterungsprozesses benötigt werden, verwendete Prüfapparatur wurde in einem vorangegangenen Projekt in Zusammenarbeit mit der Firma Palas® entworfen und gebaut. Die spezielle Ausrichtung auf den Alterungsprozess erlaubt eine vergleichsweise kompakte Bauweise (Abbildung 6-1). Die bewährte Meß- und Steuerungstechnik des Typ 2 Filtermittelprüfstandes nach VDI-Richtlinie 3926 (1994) [17] (Abschnitt 5.2) gruppiert sich um einen zentralen, kreisrunden Strömungskanal von ca. 2 m Länge, der von einem Aluminium-Profilrahmen gehalten wird. In der Mitte des Strömungskanales befindet sich eine Halterung für das horizontal eingebaute, kreisförmige Prüffiltermedium.



Abbildung 6-1: Alterungskammer; links Photographie, rechts schematische Darstellung

### 6.1 Aufbau der Alterungskammer

Die wichtigsten Bestandteile der Alterungskammer (siehe auch Abbildung 6-1) sind im Folgenden näher beschrieben.

#### (1) Staubbunker

Der Staubbunker dient zur Aufnahme des abgereinigten Staubes. Er besitzt eine Kapazität von ca. 21 womit auch längere Filterprüfungen mit entsprechend hohen Mengen abgereinigten Staubes ohne Unterbrechungen (Entleeren des Staubbunkers) möglich sind.

#### (2) Druckmessdosen

Die am Prüffiltermedium sowie am Absolutfilter anliegenden Differenzdrücke werden kontinuierlich von piezoelektrischen Druckmessdosen (jeweils: Fa. Semsym: Messbereich 0 bis 15 psi) als Spannungssignal erfasst und vom Messdatenerfassungssystem aufgezeichnet. Für die Dichtigkeitsprüfung der Prüffilterapparatur ist ein zusätzlicher Druckaufnehmer, der geeignet ist Unterdrücke zu erfassen, installiert (Fa. Sensor Technic: Messbereich 0 bis 100 psig). Die zeitliche Auflösung beträgt dabei jeweils 3 s.

Zusätzlich kann der am Prüffiltermedium anliegende Differenzdruck mittels einer zeitlich hochauflösenden piezoelektrischen Druckmessdose (Fa. Keller: Messbereich -300 bis 300 mbar; Abtastrate bis zu 2 ms) erfasst, mit zugehöriger Software aufgezeichnet und ausgegeben werden. Aufgrund der dabei großen anfallenden Datenmengen wird diese zeitlich hochauflösende Differenzdruckmessung im Rahmen dieser Arbeit nur für die Überwachung des am Prüffiltermediums anliegenden Differenzdruckes während der Abreinigung mittels Pulse-Jet Druckluftstoß eingesetzt. Die Datenaufzeichnung wird hierbei gestartet, wenn der Tankdruck beim Öffnen des Magnetventiles absinkt, wobei der Tankdruck ebenfalls mittels einer zeitlich hochauflösenden Druckmessdose (Fa. Keller: Messbereich 0 bis 8 bar; Abtastrate bis zu 2 ms) überwacht wird. Die Aufzeichnungszeit beträgt dabei je Abreinigung ca. 2 s ab dem Starten der Datenaufzeichnung.

#### (3) Vakuumpumpe

Für die Durchströmung des Prüfkanales ist eine luftgekühlte, trockenlaufende Drehschiebervakuumpumpe (Fa. Becker) im Prüfstand integriert. Der maximal erreichbare Unterduck beträgt 150 mbar, bei einem maximalen Luftstrom von 8,7 m<sup>3</sup>/h.

#### (4) Massenflussregler

Der Massenflussregler (Fa. CMOSens Technology: Messbereich 0-100l<sub>n</sub>/min) erfasst und regelt den Massenstrom der Abluft und stellt so die Einhaltung des vorgegebenen Massen- bzw. Volumenstromes über das Prüffiltermedium sicher. Dabei wird das elektronische Signal vom Massenflussregler von der Steuereinheit erfasst und entsprechend der Signalhöhe die Drehzahl der Vakuumpumpe verändert, um den gewünschten Luftdurchsatz einzuhalten. Es sind dabei Filtrationsgeschwindigkeiten von 1 bis 4m/min einstellbar. Die über die Temperatur in Volumenströme umgerechneten Massenströme, werden vom Messdatenerfassungssystem aufgezeichnet und am Bildschirm ausgegeben.

#### (5) Absolutfilter

Der Absolutfilter (Whatman GF/A) schützt die nachgeschaltete Vakuumpumpe vor der Verschmutzung mit Staub, der während der Filtrationsversuche durch das Prüffiltermedium penetriert. Gleichzeitig ermöglicht die praktisch vollständige Abscheidung des durch das Prüffiltermedium penetrierten Staubes am Absolutfilter die gravimetrische Bestimmung der mittleren Reingaskonzentration (siehe Gleichung 6-1) eines Versuches.

$$c_{rein} = \frac{\Delta m_{Absolutfilter}}{\dot{V} * \Delta t_{Versuch}}$$
6-1

| c <sub>rein</sub>           | mittlere Reingaskonzentration             | $[g/m^3]$ |
|-----------------------------|---|-----------|
| $\Delta m_{Absolut filter}$ | abgeschiedene Staubmasse am Absolutfilter | [g]       |
| Ý                           | Abluftvolumenstrom                        | [m³/s]    |
| $\Delta t_{Versuch}$        | Versuchszeit                              | [s]       |

#### (6) Pulse-Jet Abreinigungssystem

Das Pulse-Jet Abreinigungssystem ermöglicht die Regeneration des Filtermediums von der Reingasseite. Die apparative Ausführung ist in Abbildung 6-2 dargestellt. Die Stärke des Druckstoßes kann über die Adjustierung des Tankdruckes und der Öffnungszeit des Magnetventiles variiert werden. Das Pulse-Jet Abreinigungssystem ist äquivalent zum VDI-Richtlinie 3926 Typ 2 (siehe Abschnitt 5.2) Prüfstand ausgeführt. Auch der Abstand des Blasrohres zum Prüffiltermedium ist gleich gewählt, jedoch ist der Reingasraum der Alterungskammer im Vergleich zum VDI-Richtlinie 3926 Typ 2 Prüfstand um den Faktor 1,85 vergrößert ausgeführt. Schuberth weist in seiner Dissertation darauf hin, dass dieser vergleichsweise größere Reingasraum bei gleichem Tankdruck und gleicher Ventilöffnungszeit eine Abschwächung des Abreinigungsimpulses im Vergleich zum VDI-Richtlinie 3926 Typ 2 Prüfstand mit sich bringt [14].



Abbildung 6-2: Schematische Darstellung der apparativen Ausführung des Pulse-Jet Abreinigungssystems

#### (7) Staubdosierer

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Alterungsversuche wurde ein Schneckendosierer der Firma FilTEq GmbH Karlsruhe verwendet (NDF 100), der in Abbildung 6-3 schematisch dargestellt ist.



Abbildung 6-3: Schematische Darstellung des Schneckendosieres NDF 100 [25]

Der Staubbunker (1) bzw. (6), der von einer Kunststoffmembran (3) begrenzt wird, besitzt ein Fassungsvermögen von ca. 1 kg Teststaub Pural NF. Durch die Walkmodule (4) wird eine Schacht- oder Brückenbildung hintangehalten. Eine Austragsschnecke (5) befördert den Staub aus dem Bunker in den Dispergierkopf (2) zu einer rotierenden Drahtbürste (7), die zusammen mit der zugegebenen Dosierdruckluft für eine Dispergierung des Staubes über die Düse (8) in den Rohgaskanal der Alterungskammer sorgt. Über die Einstellung der Steuerspannung der Austragsschnecke und damit ihrer Drehzahlveränderung, können verschiedenen Austragsraten vom jeweiligen Teststaub realisiert werden.

#### (8) Prüffilterhalter

Der Prüffilterhalter (Abbildung 6-4) dient dazu das Prüffiltermedium (Ø 165mm) in der Alterungskammer einzuspannen. In den Prüffilterhalter integrierte Stützstäbe sollen den Stützkorb bei Schlauchfiltern (siehe auch Abbildung 3-3) nachbilden. Damit die Dichtung eine Kurzschlussströmung von Rohgas auf die Reingasseite wirksam verhindern kann, muss bei dünnen Prüffiltermedien (z.B. Membranen) ein Distanzring beigelegt werden. Dieser verhindert, dass das Prüffiltermedium durch die Belastungen bei der Druckstoßabreinigung aus der Prüffilterhalterung gezogen wird. Eine Dichtigkeitsprüfung überwach





gezogen wird. Eine Dichtigkeitsprüfung überwacht die Einhaltung der Dichtheit der Prüffilterhalterung.
Für einen korrekten Betrieb der Alterungskammer ist es notwendig den Staubdosierer auf den jeweils eingesetzten Teststaub zu kalibrieren. Weiters ist der Dosierluftvolumenstrom, der über dessen Vordruck am Staubdosierer eingestellt wird, auf den jeweiligen Absaugvolumenstrom abzustimmen.

#### 6.2 Einstellen des Dosierluftvolumenstromes

Der Dosierluftvolumenstrom des verwendeten Staubdosierers, in Abhängigkeit verschiedener Vordrücke, wurde mittels eines Gaszählers aufgenommen und ist in Abbildung 6-5 dargestellt.



Abbildung 6-5: Dosierluftvolumenstrom des Staubdosierers (NDF 100 – FilTEq GmbH) in Abhängigkeit des Vordruckes

Der Dosierluftvolumenstrom wird anhand dieses ermittelten Zusammenhanges stets unter dem gewählten Absaugvolumenstrom über die Variation des Vordruckes eingestellt. Die soll einen leichten Unterdruck in der Anlage sicherstellen, der gewährleisten soll, dass keine staubhaltige Luft in die Umgebung entweicht.

#### 6.3 Einstellen der Rohgaskonzentration

Um eine gewisse Rohgaskonzentration einstellen zu können, ist es notwendig, die von der Austragsschnecke des Staubdosierers über die rotierende Dispergierbürste in den Rohgaskanal geförderte Masse an Staub auf den über das Prüffiltermedium geleiteten Gasvolumenstrom abzustimmen. Dabei hängt der von der Austragsschnecke geförderte Massestrom an Staub von der Art des Staubes und der Schneckendrehzahl ab, welche am Staubdosierer über die Steuerspannung des Schneckenantriebs variiert werden kann.

Die Kalibration des Staubdosierers muss dabei für jeden verwendeten Teststaub durchgeführt werden, da der geförderte Massenstrom an Staub nicht zuletzt vom jeweiligen Teststaub abhängig ist – siehe dazu Abschnitt 6.4.

#### 6.4 Verwendete Teststäube

Da die Art des Teststaubes einen nicht unwesentlichen Einfluss auf das Filtrationsverhalten abreinigbarer Filtermedien besitzt, wurden für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Laborversuche verschiedene Teststäube ausgewählt. Bewusst wurde Wert auf unterschiedliche Korngrößenverteilungen und Agglomerationsverhalten der Teststäube gelegt. Dies soll gewährleisten, dass mit den durchgeführten Alterungsversuchen alle relevanten Filtrationsmechanismen, welche nicht zuletzt von den Eigenschaften des Teststaubes abhängen, abgebildet werden können.

Ausgehend vom Teststaub mit Markennamen Pural NF, welcher ein häufig eingesetzter Normteststaub ist [8][9], wurde ein vergleichsweise grobkörniger Teststaub mit Markennamen Pural SB und ein vergleichsweise feinkörniger Teststaub mit Markennamen OMYACARB 2 -GU (im Folgenden auch als CaCO<sub>3</sub> - Teststaub bezeichnet) für die Versuchsserien ausgewählt.

Bei Pural NF und Pural SB handelt es sich um Stäube, welche zum Großteil aus Aluminiumoxid bestehen, und eine mittlere (Pural NF) bzw. geringe (Pural SB) Agglomerationsneigung aufweisen. OMYACARB 2 - GU besteht im Wesentlichen aus Kalziumcarbonat und weist eine hohe Agglomerationsneigung auf. Die chemische Zusammensetzung sowie die Werte für  $d_{10,3}$ ,  $d_{50,3}$  und  $d_{90,3}$  der untersuchten Teststäube Pural NF, Pural SB und CaCO<sub>3</sub> sind in Tabelle 6 aufgelistet. Die volumenbezogenen, relativen Partikelgrößenverteilungen der drei Teststäube sind in Abbildung 6-6 wiedergegeben.

| Teststaub<br>Eigenschaft          | CaCO <sub>3</sub>  | Pural NF   | Pural SB   |
|-----------------------------------|--|--|--|
| $d_{10,3} [\mu m]^2$              | 0,9  | 1,6  | 11,5   |
| $d_{50,3} \left[ \mu m \right]^2$ | 3,1  | 8,6  | 51,1   |
| $d_{90,3}  [\mu m]^2$             | 7,6  | 32,0   | 121,0  |
| Stopfdichte [g/l]                 | 1100   | 600-800  | 800-1100   |
| Agglomerationsneigung             | hoch   | mittel   | gering   |
| Chemische Zusammensetzung         | CaCO <sub>3</sub> 98%<br>(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2%) | $Al_2O_3$<br>(in Spuren: Na <sub>2</sub> O,<br>Fe <sub>2</sub> O3,SiO <sub>2</sub> ) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>(in Spuren: Na <sub>2</sub> O,<br>Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,SiO <sub>2</sub> ) |

Tabelle 6: Eigenschaften der verwendeten Teststäube

Man erkennt in Abbildung 6-6, dass bei allen Teststäuben eine monomodale Partikelgrößenverteilung vorliegt. Weiters fallen die unterschiedlichen Breiten der Partikelgrößenverteilungen auf. Pural SB besitzt die breiteste Partikelgrößenverteilung,  $(d_{10,3} = 11,5 \ \mu\text{m}, d_{90,3} = 121,0 \ \mu\text{m})$ , der CaCO<sub>3</sub> - Teststaub die engste Partikelgrößenverteilung,  $(d_{10,3} = 0,9 \ \mu\text{m}, d_{90,3} = 7,6 \ \mu\text{m})$  und Pural NF liegt bei der Breite der Partikelgrößenverteilung in der Mitte  $(d_{10,3} = 1,6 \ \mu\text{m}, d_{90,3} = 32 \ \mu\text{m})$ .



Abbildung 6-6: Partikelgrößenverteilungen der verwendeten Teststäube<sup>2</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Bestimmt mit Laserbeugungsanalysator "Mastersizer 2000" (ID-Nr.: MAL 1034369) mit der Nassdispergiereinheit Hydro 2000 S (ID-Nr.: MAL 1009117) der Firma Malvern Instruments

#### 6.5 Kalibration des Staubdosierers auf die verwendeten Teststäube

Die Staubdosierung in das Rohgas erfolgt mittels Austragsschnecke aus dem Staubbunker des Staubdosierers und über eine rotierende Bürste (siehe Abbildung 6-3). Da bei sonst gleichen Einstellungen der Dosiereinheit Teststäube mit verschiedenen Stopfdichten zu unterschiedlichen Austragsraten in den Rohgasstrom führen würden, muss der Staubdosierer auf den jeweiligen Teststaub kalibriert werden.

Für die Kalibration des Staubdosierers wurde für jeden verwendeten Teststaub durch Differenzwägung jene Staubmasse bestimmt, welche sich, in Abhängigkeit von der Steuerspannung der Austragsschnecke, nach 10 min Filtrationsdauer bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2,5 m/min in der Alterungskammer auf dem Filtermedium befindet, dessen Filterfläche 0,0177 m<sup>2</sup> beträgt und dessen Partikelpenetration vernachlässigbar ist. Die so ermittelten Zusammenhänge zwischen Staubmasse am Filtermedium und Steuerspannung sind in Abbildung 6-7 (für Pural NF), Abbildung 6-8 (für Pural SB) und Abbildung 6-9 (für CaCO<sub>3</sub>) dargestellt.



Abbildung 6-7: Abhängigkeit der sich nach 10 min am Filtermedium befindenden Masse Pural NF - Teststaub von der eingestellten Steuerspannung der Austragsschnecke



Abbildung 6-8: Abhängigkeit der sich nach 10 min am Filtermedium befindenden Masse Pural SB - Teststaub von der eingestellten Steuerspannung der Austragsschnecke



Abbildung 6-9: Abhängigkeit der sich nach 10 min am Filtermedium befindenden Masse CaCO<sub>3</sub> - Teststaub von der eingestellten Steuerspannung der Austragsschnecke

Die in obigen Diagrammen dargestellten Zusammenhänge zwischen Staubmasse am Filtermedium und Steuerspannung gelten nur im jeweilig gezeigten, für die Versuche in gegenständlicher Arbeit relevanten, Steuerspannungsbereich. Mit Hilfe der so ermittelten Regressionsgeraden Bereich lässt sich im betrachteten zu einer gegebenen Filtrationsgeschwindigkeit und einzuhaltender Rohgaskonzentration die zugehörige Steuerspannung ermitteln. Gleichung 6-2 zeigt den aus der jeweiligen Regressionsgeradengleichung durch Umformen erhaltenen Zusammenhang zwischen Steuerspannung, Filtrationsgeschwindigkeit und Rohgaskonzentration.

$$U = \frac{v * A * c * 10min - d}{k}$$
 6-2

| U | Steuerspannung                                       | [V]               |
|---|--|-------------------|
| v | Filtrationsgeschwindigkeit                           | [m/min]           |
| A | Filterfläche   | [m <sup>2</sup> ] |
| c | Rohgaskonzentration                                  | [g/m³]            |
| d | Ordinatenabschnitt der jeweiligen Regressionsgeraden | [g]               |
| k | Steigung der jeweiligen Regressionsgeraden           | [g/V]             |

Um bei gegebener Filtrationsgeschwindigkeit und Rohgaskonzentration die notwendige Steuerspannung der Austragsschnecke zu bestimmen, werden diese Parameter mit zugehörigem d und k der Regressionsgeraden für den jeweiligen Teststaub in Gleichung 6-2 eingesetzt.

Die Werte d und k wurden nach oben vorgestelltem Ablauf bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2,5 m/min ermittelt. Da diese Werte auch für das Einstellen der Rohgaskonzentration bei von 2,5 m/min verschiedenen Filtrationsgeschwindigkeiten dienen sollen, wurde im Rahmen dieser Arbeit der Einfluss der Filtrationsgeschwindigkeit auf die Sedimentation des Teststaubes im von unten nach oben durchströmten vertikalen Rohgaskanal der Alterungskammer diskutiert (siehe Abschnitt 10.1).

#### 6.6 Verwendete Filtermedien

Für die Versuche zur Aufklärung der Filtrationsmechanismen wurden zwei typisch industriell eingesetzte Filtermedien, ein Polyimid - Nadelfilzfiltermedium (kurz: PI-Nadelfilzfiltermedium) mit relativ poröser Oberflächenstruktur und ein Teflon-laminiertes Glasfasergewebe (Membranfiltermedium) mit vergleichsweise glatter, wenig poröser Oberflächenstruktur gewählt. Dies soll wiederum das Erfassen möglichst aller relevanten Filtrationsmechanismen, bei den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen, ermöglichen. Für detailliertere wissenschaftliche Untersuchungen, den Einfluss der Oberflächenstruktur von Filtermedien auf das Filtrationsverhalten betreffend, sei auf Arbeiten von Koschutnig und Schuberth verwiesen [26]-[28].

| Tabelle 7: Eigenschaften der | verwendeten | Filtermedien |
|------------------------------|-------------|--------------|
|------------------------------|-------------|--------------|

| Filtermedium<br>Eigenschaft                    | PI - Nadelfilzfiltermedium  | Membranfiltermedium               |
|--|---|-----------------------------------|
| Flächengewicht [g/m <sup>2</sup> ]             | 520   | 570                               |
| Luftdurchlässigkeit<br>[l/(dm²min)] bei 200 Pa | 150   | 90                                |
| Ausrüstung                                     | Nadelfilz auf Stützgewebe;<br>thermofixiert, kalandrierte<br>Anströmseite | Glasfasergewebe, Teflon-laminiert |

#### 6.7 Versuchsvorbereitung

Es wird von einer gereinigten, betriebsbereiten Alterungskammer ausgegangen (siehe Abbildung 6-1). Der Staubdosierer wird mit bis zur Gewichtskonstanz getrocknetem Teststaub beschickt. Prüffilter und Absolutfilter werden gewogen und in die vorgesehenen Filtermittelhalterungen der Alterungskammer eingespannt. Es folgt eine Dichtigkeitsprüfung der Anlage. Hierfür wird unterhalb des Prüffilterhalters ein Dichtdeckel angebracht. Die Dichtheit der Anlage gilt als gewährleistet, wenn mit Hilfe der Vakuumpumpe der Alterungskammer a.) ein Unterdruck von 100 mbar innerhalb von 15 s angelegt werden kann und b.) der Unterdruck von 100 mbar nach Abschalten der Vakuumpumpe innerhalb von 30 s um nicht mehr als 30 mbar abnimmt. Nach erfolgreicher Dichtigkeitsprüfung wird der Dichtdeckel abgenommen und der Rohgaskanal der Alterungskammer am Prüffilterhalter angeflanscht. Anschließend wird die Steuersoftware (MMTC-2000 Software) der Alterungskammer am PC gestartet und in der Registrierkarte "Datei" der Unterpunkt "neue Messung" gewählt. Im nun angezeigten Fenster können die gewünschten Prüfparameter spezifiziert werden. Der Tankdruck muss nach Eintragen in dieses Fenster manuell an dem Manometer des Drucktanks eingestellt werden. Sind die Daten eingegeben, gilt es den Prüfablauf festzulegen, wobei zwischen differenzdruckgesteuert (im Folgenden druckgesteuert genannt) und zeitgetaktet (im Folgenden zeitgesteuert genannt) unterschieden werden muss.

#### 6.7.1 Alterungsversuche mit zeitgesteuerter Abreinigung

Bei zeitgesteuerter Alterung muss eine Zyklusdauer festgelegt werden, nach der die periodischen Abreinigungen erfolgen. Die Anzahl der Zyklen wird im Rahmen dieser Arbeit so hoch gewählt, dass ein vollständiges Verstopfen des Filtermediums erreicht wird, womit es nur eine "Phase 1" im Prüfablauf gibt. Häkchen bei "Datensatz auswerten" und "Gravimetrie" ermöglichen ein automatisiertes Auswerten des Restdruckverlust- und Zykluszeitverlaufes sowie der mittleren Reingaskonzentration. Der Restdruckverlustverlauf kann überdies aus den im 3 s Takt aufgenommenen Werten für den Prüffilterdifferenzdruck mit Hilfe von Tabellenkalkulationsprogrammen ermittelt werden. Der Versuch wird über "Messung starten" gestartet, worauf noch die Leergewichte des Prüffiltermediums und des Absolutfilters abgefragt werden. Die Durchströmung des Prüffiltermediums erfolgt nach den eingegebenen Prüfparametern, die Staubdosierung muss hingegen manuell an der Steuereinheit des Staubdosierers initiiert werden. Dabei werden nacheinander die Dosierdruckluft ("Luft") die Bürste ("Bürste") und die Walkmodule ("Wabbel") gestartet. Der Vordruck der Dosierdruckluft wird dabei nach dem in Abbildung 6-5 gezeigten Zusammenhang auf die in den Prüfparametern spezifizierte Filterflächenbelastung abgestimmt, um einen leichten Unterdruck in der Anlage zu

gewährleisten. Das Walkmodul wird auf "Wabbel"-Stufe 6 eingestellt, wodurch eine Brückenoder Schachtbildung bei den verwendeten Teststäuben verhindert werden konnte.



Abbildung 6-10 Typischer Druckverlustverlauf über das Prüffiltermedium bei zeitgesteuerter Alterung bis zum Erreichen eines anlagenseitig vorgegebenen maximalen Druckverlustes von 35 mbar (35 hPa)

Der Versuchsablauf aus Filtrationszyklen und Abreinigungen im Abstand der vorgegebenen Zykluszeit wird nun so lange fortgeführt, bis ein maximaler, anlagenseitig vorgegebener, Druckverlust über das Prüffiltermedium von 35 mbar erreicht wird. Bei diesem Differenzdruck werden sowohl die, von der Vakuumpumpe gewährleistete, Durchströmung der Alterungskammer als auch die Staubdosierung unterbrochen, um nicht für die Anlagenstabilität gefährlich hohe Differenzdrücke zu erreichen. In Abbildung 6-10 ist ein dabei typisch feststellbarer Druckverlustverlauf bei zeitgesteuerter Alterung dargestellt. Deutlich erkennbar ist der extreme Druckverlustanstieg am Ende des Versuches (siehe dazu Abschnitt 10.2).

#### 6.7.2 Alterungsversuche mit druckgesteuerter Abreinigung

Bei Versuchen mit druckgesteuerter Abreinigung wird beim Reiter "Prüfablauf" ein maximaler Druckverlust vor der Abreinigung festgelegt. Die sonstigen Eingaben erfolgen analog zur zeitgesteuerten Abreinigung (Abschnitt 6.7.1). Der aus den Filtrationszyklen und Abreinigungen bei Erreichen eines vorgegebenen maximalen Druckverlustes bestehende Versuchsablauf wird manuell bei Unterschreiten einer minimalen, nicht mehr zweckmäßigen, Zykluszeit abgebrochen. Als nicht mehr zweckmäßig werden Zykluszeiten kleiner 10 s erachtet, da hierbei aufgrund der vielen Abreinigungen in kurzer Zeit kein Filtrationsbetrieb mehr aufrecht erhalten werden kann. Das in Abbildung 6-11 gezeigte zeitweilige Überschreiten des maximalen vorgegebenen Druckverlustes von 10 hPa vor der Abreinigung ist auf das Datenerfassungssystem der Alterungskammer zurückzuführen, welches zu diskreten Zeitpunkten im 3-Sekunden-Intervall Druckverlustwerte aufzeichnet. Beträgt beispielsweise der Druckverlust über das Prüffiltermedium zu einem Messzeitpunkt 9,98 hPa läuft die Filtration weiter bis erst nach weiteren 3 s der Druckverlust über das Prüffiltermedium neuerlich ermittelt wird. Abhängig von der Druckverlustanstiegsgeschwindigkeit kann nun der vorgegebene maximale Druckverlust vor der Abreinigung von 10 hPa bereits überschritten sein, bevor die Abreinigung durch die Steuerungssoftware der Alterungskammer ausgelöst wird.



Abbildung 6-11: Typischer Druckverlustverlauf über das Prüffiltermedium bei druckgesteuerter Alterung bei einem maximalen Druckverlust vor der Abreinigung von 10 hPa

## 7 LITERATURERECHERCHE ZUR MODELLIERUNG UND SIMULATION DES FILTRATIONSPROZESSES

Im Folgenden soll die Entwicklung der Modellierung und der Simulation des Filtrationsprozesses vorgestellt und diskutiert werden. Dabei werden grundlegende Modelle ebenso berücksichtigt, wie moderne Ansätze, die sich der Problematik der Modellierung und Simulation dieses hochkomplexen Vorganges verschrieben haben.

#### 7.1 Grundlegende Gesetzmäßigkeiten

Seit langem wird versucht den Filtrationsprozess, sei es bei der Fest/Flüssig-Filtration oder der Fest/Gas-Filtration, theoretisch zu erfassen und mit Hilfe von Modellgleichungen zu beschreiben. Eine wichtige empirische Durchströmungsgleichung stellt dabei die Darcy-Gleichung (Gleichung 7-1) dar:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\eta * \overline{w}}{B}$$
 7-1

| $\Delta p$ | Druckverlust            | [Pa]              |
|------------|-------------------------|-------------------|
| L          | Höhe der Schüttung      | [m]               |
| η          | Dynamische Viskosität   | [Pa·s]            |
| <u>w</u>   | Leerrohrgeschwindigkeit | [m/s]             |
| В          | Durchlässigkeit         | [m <sup>2</sup> ] |

Sie beschreibt die Abhängigkeit des Druckverlustes von der Höhe einer Schüttung, der Viskosität des fluiden Mediums, dessen Leerrohrgeschwindigkeit sowie der Durchlässigkeit der Schüttung. Die Darcy-Gleichung ist dabei gültig für kleine Reynoldszahlen ( $\text{Re} \leq \text{ca. 3}$ ), sprich laminare Durchströmung.

Geht man von der Vorstellung aus, dass die Filterschicht von geradlinigen, parallelen und kreisrunden Poren gleichen Durchmessers durchzogen ist, welche vom Filtrat laminar durchströmt werden, so kann dieser Vorgang durch das Hagen-Poiseuille Gesetz (Gleichung 7-2) beschrieben werden:

$$\dot{V} = -\frac{\pi * r^4}{8 * \eta} * \frac{\Delta p}{L}$$
 7-2

| <i>V</i>   | . Volumenstrom          | .[m³/s] |
|------------|-------------------------|---------|
| Δ <i>p</i> | . Druckverlust          | .[Pa]   |
| L          | . Länge der Kapillaren  | .[m]    |
| η          | . Dynamische Viskosität | [Pa·s]  |
| r          | . Radius der Kapillaren | .[m]    |

Weitere grundlegende Arbeiten auf dem Bereich der Fest/Flüssig-Filtration stammen beispielsweise von Kozeny [29] und Carman [30], welche in der Formulierung der Carman-Kozeny-Gleichung mündeten (Gleichung 7-3), die den Einfluss der Porosität  $\epsilon$  detaillierter beschreibt als dies beim Gesetz von Darcy der Fall ist.

$$\frac{\Delta p}{L} = k(\epsilon) * \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} * S_V^2 * \eta * \overline{w}$$
7-3

| $\Delta p$           | Druckverlust            | [Pa]                              |
|----------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| L                    | Höhe der Schüttung      | [m]                               |
| $k(\epsilon)$        | Kozeny-Konstante        | [-]                               |
| ε                    | Porosität               | [-]                               |
| <i>S<sub>V</sub></i> | Spezifische Oberfläche  | [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ] |
| η                    | Dynamische Viskosität   | [Pa·s]                            |
| <u>w</u>             | Leerrohrgeschwindigkeit | [m/s]                             |

Die Carman-Kozeny-Gleichung beschreibt den Druckverlust eines Fluides bei der laminaren Durchströmung einer Schüttung von Festkörpern und dient somit der modellhaften Beschreibung der sogenannten Schlamm- bzw. Kuchenfiltration, bei der eine relativ feststoffreiche Suspension mit einem Trockenanteil  $x_{TR} > 1$  Vol% einen mehr oder weniger porösen Filterkuchen am Filtermittel ausbildet, der seinerseits durchströmt wird und damit als sekundäres Filtermittel wirkt.

#### 7.2 Frühe Modellierung Fest/Flüssig-Filtration

Bereits Hermans und Bredée [31] erkannten die Notwendigkeit Filtrationstypen, die von der Kuchenfiltration verschieden sind, mit eigenen Filtrationsgesetzen modellhaft zu erfassen. Als Ausgangspunkt für ihre Arbeit dient das Gesetz von Hagen-Poiseuille. Im Zuge ihrer Arbeit [31] wird ausgehend von der Kuchenfiltration ein Gesetz für die reine Verstopfungsfiltration für stark verdünnte Suspensionen  $x_{TR} < 0.1$  Vol% abgeleitet. Auch Filtrationstypen, die zwischen Kuchen- und Verstopfungsfiltration angesiedelt sind, werden von Hermans und Bredée mit einem Standard- und Zwischengesetz modellhaft beschrieben. Die dabei abgeleiteten Gesetze beruhen auf einfachen Mechanismen, wie dem Dickenwachstum des Kuchens (Kuchenfiltration), der vollständigen Verstopfung der Poren (Verstopfungsfiltration), oder der Abnahme des Porendurchmessers (Standardgesetz, Zwischengesetz) mit fortschreitender Filtrationsdauer. Hinzugefügt werden muss, dass sich die Arbeit von Hermans und Bredée [31] nur mit der Filtration bei konstantem Druck befasst.

Einen ähnlichen Ansatz wie Hermans und Bredée wählt Heertjes in seinen Arbeiten zur Verstopfungsfiltration [32] und zur Kuchenfiltration [33]. Auch findet Heertjes, in Analogie zum Zwischengesetz von Hermans und Bredée, dass es einen Filtrationstypus gibt, der zwischen der Verstopfungs- und der Kuchenfiltration angesiedelt ist.

Kritisch mit der Arbeit von Hermans und Bredée setzt sich Gonsalves [34] auseinander. Durch Laborexperimente untermauert, merkt Gonsalves an, dass verschiedene physikalische Vorgänge zu ein und demselben Filtrationsgesetz führen können.

Von Meskat [35] wurden die Modelle von Hermans und Bredée aufgegriffen und auch für Filtrationsvorgänge bei konstanter Filtrationsgeschwindigkeit adaptiert. Basierend auf dem Hagen-Poiseuille Gesetz bezieht Meskat die Filtration zu einem bestimmten Zeitpunkt auf den jeweiligen Anfangszustand (Index 0 in Gleichung 7-4) und erhält somit eine Grundgleichung für mehrere Filtrationstypen bei konstanter Filtrationsgeschwindigkeit:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{N_0 * f_0^2 * L}{N * f^2 * L_0}$$
7-4

| p | Druck                 | [Pa]              |
|---|-----------------------|-------------------|
| f | Querschnitt der Poren | [m <sup>2</sup> ] |
| N | Anzahl der Poren      | [-]               |
| L | Länge der Poren       | [m]               |

Um die Verstopfungsfiltration zu modellieren wird in Gleichung 7-4 die Anzahl der Poren N in Abhängigkeit vom durchgesetzten Volumen V reduziert:

$$N = N_0 * (1 - k * V)$$
 7-5

Der Verstopfungsfaktor k beschreibt hier und in den folgenden Gleichungen die Geschwindigkeit mit der die Verstopfung erfolgt.

Um die Standardfiltration zu beschreiben, wird in Gleichung 7-4 der Porenquerschnitt f in Abhängigkeit vom durchgesetzten Volumen V reduziert:

$$f = f_0 * (1 - k * V)$$
7-6

Analog wird für die Darstellung der Schlamm- bzw. Kuchenfiltration die Länge der Poren L in Gleichung 7-4 mit zunehmenden durchgesetzten Volumen V vergrößert:

$$L = L_0 * (1 + k * V)$$
 7-7

Mit diesen einfachen Modellgleichungen gelingt die Darstellung der verschiedenen Filtrationskurven, wie sie für die verschiedenen Filtrationsarten typisch sind (Abbildung 7-1).



Abbildung 7-1: Filtrationskurven bei konstanter Filtrationsgeschwindigkeit nach [35]

Werden die Poren mit zunehmendem Filtratvolumen verengt (Standardfiltration), oder gänzlich verstopft (Verstopfungsfiltration), steigt der Druckverlust vergleichsweise rascher, als bei der Kuchenfiltration, wo durch das Kuchenwachstum lediglich die Porenlänge vergrößert wird und sich ein lineares Druckverlustprofil einstellt. Je größer die Verstopfungskonstante k ist, desto rascher werden die Poren verstopft (Verstopfungsfiltration) bzw. verengt sich ihr Querschnitt (Standardfiltration), oder wächst ihre Länge (Kuchenfiltration) wodurch jeweils ein rascherer Druckverlustanstieg im Modell festzustellen ist (siehe Abbildung 7-1).

Die oben vorgestellten Modelle sind zur Beschreibung der Fest/Flüssig-Filtration erdacht worden. Jedoch basieren sie auf Gesetzmäßigkeiten (Gesetze von Hagen-Poiseuille, Darcy und Carman-Kozeny), die auch auf die, in dieser Arbeit vornehmlich behandelte Gasfiltration anwendbar sein könnten. Auch können die Überlegungen von Meskat [35], welche die modellhafte Beschreibung mehrere Filtrationsmechanismen mit einer Grundgleichung 7-4 beinhalten, als beispielgebend für das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Modell zur Beschreibung des Druckverlustverlaufes bei der Abreinigungsfiltration angesehen werden.

#### 7.3 Frühe Modellierung Fest/Gas-Filtration

Eine rein empirische Herangehensweise den Druckverlust von Abreinigungsfiltern zur Staubabscheidung modellhaft zu beschreiben, stammt beispielsweise von Billings [36]. Mit Hilfe von Gleichung 7-8 wird dabei der experimentell bestimmte mittlere Druckverlust einer Filteranlage durch Regressionsrechungen dargestellt.

$$\Delta p = a_1 + a_2 * c^{a_3} * p^{-a_4} * N^{-a_5}$$
7-8

| Δp             | mittlerer Druckverlust der Filteranlage | [Pa]    |
|----------------|---|---------|
| a <sub>i</sub> | Regressionskoeffizienten                | [-]     |
| c              | Staubkonzentration                      | [mg/m³] |
| p              | Druck im Druckluftspeicher              | [Pa]    |
| N              | Anzahl der Druckluftstöße               | [-]     |

Das rein empirische Wesen dieser Näherungsgleichung zur Beschreibung der Druckverlustverhältnisse eines Abreinigungsfilters beschränkt deren Gültigkeit auf das jeweilige untersuchte Filtersystem. Das Fehlen der Filtrationsgeschwindigkeit in Gleichung 7-8 lässt es auch fraglich erscheinen, ob darin alle maßgeblichen Einflussgrößen berücksichtigt werden. Die Anwendung dieser rein empirischen Gleichung auf andere Filteranlagen, Staubarten oder Parameterbereiche ist jedenfalls nicht ohne weiteres möglich.

Ein ähnlicher, rein empirischer, Ansatz stammt von Leith und First [37]. Anstatt der Staubkonzentration und der Anzahl der Druckluftstöße werden in Gleichung 7-9 die Flächenmasse des anfiltrierten Staubes und die Filtrationsgeschwindigkeit neben dem Druck im Druckluftspeicher zusammen mit Regressionskoeffizienten verwendet, um den mittleren Druckverlust einer Filteranlage zu beschreiben.

$$\Delta p = b_1 * \Delta W^{b_2} * p^{-b_3} * v^{b_4}$$
 7-9

| Δр.            | mittlerer Druckverlust der Filteranlage | [Pa]    |
|----------------|---|---------|
| b <sub>i</sub> | Regressionskoeffizienten                | [-]     |
| W              |   | [kg/m²] |
| р              | Druck im Druckluftspeicher              | [Pa]    |
| v              | Filtrationsgeschwindigkeit              | [m/s]   |

Analog zur oben diskutierten Gleichung von Billings, ist auch hier eine Übertragbarkeit auf andere Filtersysteme aufgrund der rein empirischen Form der Druckverlustmodellierung nicht ohne weiteres möglich. Als weiterer Kritikpunkt solch rein empirischer Ansätze zur Beschreibung des Druckverlustes bei der Abreinigungsfiltration kann angeführt werden, dass diese nichts über die jeweils vorherrschenden Filtrationsmechanismen aussagen und aus ihnen demnach keine physikalische Bedeutung abzuleiten ist.

Einen tieferen Einblick, die grundlegenden Mechanismen bei der Filtration betreffend, gewährt eine Reihe von Modellansätzen welche den zeitlichen Verlauf des Gesamtdruckverlustes ( $\Delta p$ ) durch die additive Überlagerung des Druckverlustes des mit Staubpartikeln versetzten Filtermediums ( $\Delta p_1$ ) sowie des Staubkuchens ( $\Delta p_2$ ) beschreiben (Gleichung 7-10):

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 \tag{7-10}$$

| Δp                         | Gesamtdruckverlust   | . [Pa] |
|----------------------------|--|--------|
| $\Delta p_1 \ldots \ldots$ | Druckverlust des mit Staubpartikeln versetzten Filtermediums | [Pa]   |
| $\Delta p_2$               | Druckverlust des Staubkuchens                                | [Pa]   |

Nach Löffler [38] kann für die Berechnung der Druckverlustanteile  $\Delta p_1$  und  $\Delta p_2$  aufgrund der vorherrschenden kleinen Reynoldszahlen <1 jeweils das Durchströmungsgesetz von Darcy (Gleichung 7-1) verwendet werden. Eine auf Gleichung 7-10 aufbauende, von vielen Autoren verwendete Ausgangsgleichung für die Auslegung von Filteranlagen ist Gleichung 7-11:

$$\Delta p = K_1' * v + K_2' * W * v$$
7-11

| Δp  | Gesamtdruckverlust                  | [Pa]       |
|-----|-------------------------------------|------------|
| K'1 | Restwiderstand                      | [kg/(m²s)] |
| v   | Filtrationsgeschwindigkeit          | [m/s]      |
| K'2 | Spezifischer Filterkuchenwiderstand | [1/s]      |
| W   | Flächenmasse des Staubkuchens       | $[kg/m^2]$ |

In Gleichung 7-11 wird der Term für den Druckverlust des mit Staubpartikeln versetzten Filtermediums mit Hilfe des Restwiderstandes ( $K'_1$ ) und der Filtrationsgeschwindigkeit beschrieben. Der Restwiderstand ist dabei keine Konstante, sondern (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) eine Funktion der Struktur und Dicke des Filtermediums, des eingelagerten

Staubes, der Filtrationsgeschwindigkeit und der Abreinigungsintensität. Der spezifische Filterkuchenwiderstand  $(K'_2)$  zur Modellierung des Druckverlustes des Staubkuchens hängt unter anderem von der Partikelgrößenverteilung des Staubes, den Eigenschaften des Staubkuchens und damit auch von den Filtrationsbedingungen ab.

Die Filterwiderstände  $K'_1$  und  $K'_2$  müssen demnach nach modellhaften Vorstellungen wie beispielsweise der Carman-Kozeny-Gleichung (Gleichung 7-3) oder empirischen Näherungsgleichungen berechnet werden. Nachstehende Tabelle 8 stellt eine Übersicht der Berechnungsansätze dieser Widerstandswerte dar.

| $K_1 = K_1'/\mu$   | $K_2 = K_2'/\mu$   | Randbedingungen   | Autor |
|--|--|---|-------|
| -  | $k_{CK}S_V^2 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3}$                          | $k_{CK} = f(\epsilon)$<br>$S_V = volumenbezogene$<br>Oberfläche               | [40]  |
| -  | $5,6k\epsilon^{-5,5}x_2^{-2}$  | $0,35 < \varepsilon < 0,7$ $k \cong 1$  | [41]  |
| -  | $kS_V^2 \frac{1{-}\epsilon}{\epsilon^3} \frac{1}{\rho_p} \frac{1}{\rho}$ | k = f(Form, Oberfläche)   | [42]  |
| $K_{1}^{'} \approx (p_{3}-p_{1})^{-0.8}$                 | $1,25\frac{1}{x_{50,3}}$   | v = 90-162  m/h<br>$x_{50,3} = 0,3-50 \mu\text{m}$                            | [43]  |
| -  | 116,75 x <sub>50,3</sub> - 0,878   | v = 72  m/h<br>$c = 11.4 \text{ g/m}^3$<br>$x_{50,3} = 3.9 - 15.3$            | [44]  |
| -  | $(K_2)_2 = (K_2)_1 \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^n$                       | Flugasche 0,2≤n≤1,5   | [45]  |
| 18500p <sup>-0,66</sup>                                  | -  | p(Speicherdruck in kPa)   | [46]  |
| $16000 \left(\frac{d\Delta p}{dt}\right)^{-1,13} v^{-1}$ | -  | $rac{d\Delta p}{dt} [k^{Pa}/s]$ , v $[m/_{min}]$<br>Druckanstieg im Schlauch | [47]  |
| -  | $a_1 v^{a_2} w^{-a_3}$   | a <sub>1-3</sub> Regressionskonstante   | [48]  |

Tabelle 8: Ansätze zur Berechnung von Widerstandswerten nach [39]

Löffler merkt dazu in [39] kritisch an, dass für die Anwendung obiger Berechnungsansätze einerseits unbekannte Paramter, wie die Porosität des Staubkuchens, benötigt werden, oder aber andererseits bestimmte Randbedingungen zu erfüllen sind. Die beiden Widerstandswerte  $K_1$  und  $K_2$  müssen demnach meist experimentell bestimmt werden.

#### 7.4 Aktuelle Modell- und Simulationsbeiträge

Auch aktuelle Modelle, die das Druckverlust- und damit Filtrationsverhalten bei der Gasfiltration beschreiben, basieren auf oben genannten grundlegenden Gesetzmäßigkeiten.

In der Arbeit von Lupion et al. [49], welche die Modellierung des Druckverlustverlaufes bei der Heißgasfiltration zum Inhalt hat, wird auf einen semi-empirischen Ansatz, der die Darcy-Gleichung beinhaltet, zurückgegriffen. Dabei werden der Druckverlust des Filtermediums, sowie des Staubkuchens getrennt voneinander modelliert und später additiv zusammengefasst, um so den Gesamtdruckverlust zu erhalten.



Abbildung 7-2: Vergleich des Gesamtdruckverlustes Modell (MODELLED) vs. Experiment (EXPERIMENTAL) einer CS1150 Filterkerze nach [49]

Der in Abbildung 7-2 beispielhaft aus der Arbeit von Lupion et al. [49] herausgegriffene Vergleich der Druckverlustverläufe zeigt eine gute Übereinstimmung von Experiment und Modell. Der streng lineare Verlauf des Druckverlustes deutet darauf hin, dass im zugehörigen Modell vornehmlich der Kuchenfiltrationsmechanismus berücksichtigt wurde. Die Fokussierung auf den Mechanismus der Kuchenfiltration erscheint bei der Modellierung des Druckverlustverlaufes bei wenig porösen Filtermedien mit relativ glatter Oberfläche, wie sie bei der Heißgasfiltration zum Einsatz kommen, gerechtfertigt. Denkt man an Nadelfilze mit einer vergleichsweise poröseren Oberfläche, wird ein reines Kuchenfiltrationsmodell nicht ausreichen, um den Druckverlustverlauf, der hierbei unter anderem zu einem gewissen Maße vom Tiefenfiltrationsmechanismus geprägt ist, hinreichend genau zu beschreiben.

Etwas weiter, im Sinne der Berücksichtigung mehrerer Filtrationsmechanismen, gehen die Arbeiten von Thomas D. et al [50][51], welche sich mit dem Abscheidegrad und dem Druckverlustverlauf von HEPA-Filtern bei zunehmender Filtermediumsverstopfung beschäftigt.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Modell berücksichtigt die durch Diffusions- und Sperreffekt hervorgerufene Partikelabscheidung an den Fasern des HEPA Filtermediums. Auf den Fasern abgeschiedene Partikeln bilden dendritische Strukturen aus, die ihrerseits als Partikelabscheidende Fasern im Modell berücksichtigt werden. Der Trägheitseffekt wird in gegenständlichem Modell vernachlässigt, da die abgeschiedenen Partikeln Größen < 1µm aufweisen. Die Modellierung und Berechnung des Abscheidegrades der Fasern und Staubdendriten sowie des Druckverlustes erfolgt Schichtweise, für den Staubkuchen am Filtermedium, die Übergangszone vom Staubkuchen zum Filtermedium und der Tiefe des Filtermediums. Trotz der Problematik, dass die Kompression des Staubkuchens nur abgeschätzt werden kann, zeigt Abbildung 7-3 eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und experimentellen Daten.



Abbildung 7-3: Vergleich des Druckverlustverlaufes Modell (durchgezogene Linien) vs. Experiment bei verschiedenen Partikelgrößen (Symbole siehe Legende) eines D309 HEPA Filtermediums nach [50]

Auch erkennt man in Abbildung 7-3, dass die anfängliche Tiefenfiltration und deren Übergang in die Kuchenfiltration in guter Übereinstimmung mit dem Experiment modellhaft erfasst worden ist. In den bisher diskutierten Modellen ist die (unvollständige) Regenerierung des Filtermediums und deren Auswirkung auf den Filtrationsbetrieb noch nicht thematisiert worden. Die Filtrationsanwendungen in deren Umfeld oben genannte Modelle erdacht wurden, beinhalten typischerweise keine Abreinigung (Regenerierung) des Filtermediums, oder es wird von einer praktisch vollständigen Regenerierung mit einhergehender reiner Kuchenfiltration ausgegangen.

Will man die Abreinigungsfiltration, wie sie in der industriellen Anwendung typisch ist, modellieren, kommt man jedoch nicht umhin, erstens die Regenerierung und zweitens deren im Allgemeinen als Patchy Cleaning bezeichnete [52][53] unvollständige Ausprägung mit in die Modellgedanken aufzunehmen. Hierbei wird unter Patchy Cleaning der Vorgang verstanden, bei dem ein Teil des anfiltrierten Staubkuchens abgereinigt wird, und andere Teile, Patches, vollständig am Filtermedium haften bleiben. Es sei hier angemerkt, dass, im Zusammenhang mit dem Begriff Patchy Cleaning, Stellen am Filtermedium auf denen eine, im Vergleich zum haften bleibenden Staubkuchen, sehr dünne Staubschicht zurück bleibt, im Allgemeinen als abgereinigt angesehen werden [54].

Ein Beitrag zur Modellierung des Druckverlustverhaltens bei der Abreinigungsfiltration unter Berücksichtigung der unvollständigen Regenerierung des Filtermittels (Patchy Cleaning) stellen die Arbeiten von Duo et al. [55][54] dar. In den gegenständlichen Arbeiten wird der Mechanismus des Patchy Cleaning mit einem Ansatz der Wahrscheinlichkeitstheorie modelliert. Dabei wird einer (unvollständigen) Abreinigung ein gewisser Regenerierungsgrad, der durch das Verhältnis von abgereinigter zu gesamter Filterfläche definiert ist, zugeordnet. Das bedeutet, dass der Staubkuchen mit einer gewissen, vorgegebenen Wahrscheinlichkeit, die auch davon abhängt wie lange sich der, in Patches anhaftende Staub schon am Filtermedium befindet, entfernt wird. Die unvollständige Regenerierung ruft eine unregelmäßige Staubverteilung am Filtermedium hervor, beeinflusst so die Strömungsverhältnisse und Strömungswiderstände im folgenden Filtrationszyklus und damit auch dessen Druckverlustanstieg.

Abbildung 7-4 zeigt den so modellierten Druckverlustverlauf einer Filterkerze bei Vorhandensein von Patchy Cleaning und vergleicht das Ergebnis mit experimentell erhaltenen Daten. Tiefenfiltration spielt in diesen Überlegungen keine entscheidende Rolle.



Abbildung 7-4: Vergleich des Druckverlustverlaufes Modell (durchgezogene Linien) vs. Experiment (Dreiecke) einer Filterkerze nach [54]

Dittler et al. [56][57] haben sich ebenfalls mit der Modellierung des Staubkuchenaufbaus auf einem unvollständig regenerierten, starren Filtermedium zur Heißgasfiltration befasst. Dabei griffen die Autoren auf ein zwei-dimensionales Modell von Schmidt [58] zurück, welches das komplett oder unvollständig regenerierte Filtermedium in ein Raster von 200 horizontalen mal 40 vertikalen Zellen unterteilt. Ausgehend von einem vorgegebenen Regenerierungsgrad, der die abgereinigten Kuchenmasse zur gesamt anfiltrierten Kuchenmasse in Relation setzt, wird das zugehörige Strömungsfeld und der Druckverlust bei stationärer Durchströmung berechnet. Nach Dittler et al. [56] folgen die Partikeln den Stromfäden des berechneten Strömungsfeldes, lagern sich als Kuchen ab und erhöhen den Strömungswiderstand. Nachdem sich der Strömungswiderstand um ein kleines Delta erhöht hat, wird das Strömungsfeld neu berechnet. Durch Wiederholen dieser Vorgehensweise werden der Staubkuchenaufbau und der zugehörige Druckverlustverlauf modelliert bzw. berechnet. Abbildung 7-5 zeigt die nach Dittler et al. [56] berechneten Druckverlustverläufe innerhalb verschiedener Filtrationszyklen bei unterschiedlichen Regenerierungsgraden. dass niedrigeren Man erkennt, bei Druckverlustanstieg Regenerierungsgraden der rascher und von höheren Restdruckverlustwerten aus erfolgt. Auch wird in gegenständlicher Arbeit der Einfluss des Regenerierungsmusters auf den Druckverlustanstieg innerhalb eines Zyklus thematisiert. Nicht diskutiert wird hingegen die Druckverlustentwicklung für eine Vielzahl von Zyklen, wie sie beispielsweise bei der Alterung von Filtermedien von entscheidender Bedeutung ist.



Abbildung 7-5: Druckverlust über relativer Zykluszeit für verschiedene Regenerierungsgrade nach [56]

Mao et al. [59] beschreiben ein Modell, welches den Filtrationsprozess eines textilen Filtermediums in drei Phasen unterteilt. Bei der anfänglichen Phase der Tiefenfiltration wird die zunehmende Beladung des Filtermediums mit abgeschiedenen Staubpartikeln mit einer Modellgleichung erfasst, welche die Vergrößerung des Einzelfaserabscheidegrades sowie der Packungsdichte der Fasern bei Staubbeladung berücksichtigt. Die Tiefenfiltration ist beendet, wenn in einer gedachten Zwischenschicht an der Oberfläche des Filtermediums eine gewisse vorgegebene maximale Staubbeladung erreicht ist. In der Übergangsphase bildet sich aufgrund struktureller Unregelmäßigkeiten des Filtermediums oder unregelmäßiger Staubablagerungen eine unregelmäßige Strömungsgeschwindigkeitsverteilung über die Filteroberfläche aus. Das Verhältnis von abgereinigter zur gesamten Filterfläche und die Reststaubbeladung auf der nicht abgereinigten Fläche charakterisieren dabei die Strömungsgeschwindigkeitsverteilung. Die Phase der Oberflächenfiltration ist hingegen gekennzeichnet von einer gleichmäßigen Strömungsgeschwindigkeitsverteilung und damit einem gleichmäßigen Kuchenaufbau über die Filterfläche. Die so modellierten Staubbeladungen in der Tiefe des Filtermediums, der Zwischenschicht und an der Oberfläche des Filtermediums werden mit Hilfe von empirischen Gleichungen verwendet, um den zugehörigen Druckverlustverlauf zu berechnen. Für die Berechnung des Restdruckverlustes (Abbildung 7-6) wird nur die Reststaubmasse, die sich im Filtermedium befindet berücksichtigt, da - so die Autoren - der Großteil der Luftströmung die abgereinigten Stellen des Filtermediums passiert. Abbildung 7-6 zeigt, dass mit dem gegenständlichen Modell die Restdruckverlustentwicklung einer Abreinigungsfiltration unter der Berücksichtigung eines gewissen Anteiles an Tiefenfiltration tendenziell gut nachgebildet werden kann.



Abbildung 7-6: Vergleich des Druckverlustverlaufes Modell (gestrichelte Linie) vs. Experiment (Rauten) eines PPS Filtermediums nach [59]

Weitere Arbeiten, die den Druckverlustverlauf und den zugehörigen Staubkuchenaufbau bei der Abreinigungsfiltration über den mittleren Strömungswiderstand beschreiben stammen beispielsweise von Smith et al. [60]-[62]. Bei diesem Modell wird von einem vollständig abgereinigten Filtermedium ausgegangen. Patchy Cleaning wird dabei nicht berücksichtigt, wohl weil es bei den dazugehörigen Laborexperimenten nicht in Erscheinung getreten ist.

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten makroskopischen Ansätzen kann die Modellierung des Staubkuchenaufbaus und des zugehörigen Druckverlustverlaufes auch auf mikroskopischer Ebene durch Berechnung der Partikelbahnen von Einzelpartikeln erfolgen. Dies hat den Vorteil, dass genauere Aussagen über die Kuchenstruktur und die Partikelablagermechanismen getroffen werden können, wofür allerdings ein erhöhter Rechenaufwand aufgewandt werden muss. Auch ist die laterale Ausdehnung des betrachteten Staubkuchenabschnittes meist gering, was wiederum mit der sonst ausufernden Rechendauer zusammenhängt. Die oben vorgestellte Arbeit von Dittler et al. [56] stellt eine Mischung aus mikroskopischer Betrachtungsweise, betreffend die Berechnung des Strömungsfeldes, und makroskopischer Betrachtungsweise, was deren Auswirkungen auf den Staubkuchenaufbau betrifft, dar.

Schmidt hat sich in seinen Arbeiten [58][63]-[66] unter anderem intensiv mit der Kompression von auf Filtermedien abgeschiedenen Staubschichten (Staubkuchen) beschäftigt und dabei auch die zugehörige Druckverlustentwicklung modelliert. Abbildung 7-7 zeigt eine schematische Modellvorstellung zu den Kompressionsvorgängen bei verschiedenen Kuchendicken ( $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ ). Die übertragbare Druckspannung zum Zeitpunkt  $t_1$  ist eine von der Partikelanordnung des Staubkuchens abhängige Konstante. Die dabei wirkende Druckspannung nimmt linear von Null an der rohgasseitigen Kuchenoberfläche bis auf den Maximalwert am Filtermedium zu.



Abbildung 7-7: Qualitative Darstellung von Beanspruchung und Festigkeit innerhalb dreier unterschiedlich dicker Staubkuchen [63]

Die Festigkeit des Staubkuchens wird zum Zeitpunkt t<sub>1</sub> in der Nähe des Filtermediums gerade überschritten, wodurch es zu lokalen Kompressionen kommt und damit sowohl die wirkende Druckspannung (verringerte Porosität) als auch die übertragbare (Erhöhung der Kontaktstellen) Druckspannung größer werden. Der gleiche Mechanismus führt zu einer fortschreitenden Kompression zu den Zeitpunkten t<sub>2</sub> und t<sub>3</sub>. Das Ergebnis dieser Partikelumlagerungen, eine kontinuierliche Abnahme der Porosität und der Breite der Porengrößenverteilung von der Kuchenoberfläche zum Filtermedium hin, konnte von Schmidt mittels einer eigens dafür entwickelten Kuchenstrukturanalyse [67][68] verifiziert werden.

Auf diesen Modellvorstellungen beruht die von Schmidt [63] vorgenommene Simulation des zeitlichen Druckverlustverlaufes bei reiner Oberflächenfiltration. Dabei wird der Druckverlust schichtenweise unter Berücksichtigung der jeweiligen übertragbaren und wirkenden Druckspannung berechnet. Überschreitet die wirkende die übertragbare Druckspannung in einer Schicht wird die Porosität um einen bestimmten Betrag verringert, bevor eine weitere Staubschicht "aufgesetzt" wird und eine erneute Berechnung des Druckverlustes erfolgt. Für die detaillierte Berechnung der spezifischen Kuchenwiderstände wird ein Modell von Rudnick und First [69] verwendet. Daraus ergibt sich ein zeitlicher Druckverlustverlauf wie er in Abbildung 7-8 dargestellt ist.



Abbildung 7-8: Simulierte Druckverlustkurven nach [63]

Stöcklmayer und Höflinger [70]-[74] haben ein zwei-dimensionales Computermodell entwickelt. welches den Aufbau eines kompressiblen Staubkuchens bei der Abreinigungsfiltration beschreibt und auf dessen Basis es möglich ist, den zugehörigen Druckverlust zu berechnen. Ähnlich wie bei Dittler et al. [56] berechneten Stöcklmayer und Höflinger zunächst das Strömungsfeld dessen Bahnen die Partikeln folgen. Jedoch bleiben Stöcklmayer und Höflinger auch beim Kuchenaufbau bei der mikroskopischen Betrachtungsweise, nehmen dafür jedoch eine relativ geringe Anzahl an simulierten Partikeln (ca. 30.000) in Kauf, um die Simulationszeiten in vertretbarem Rahmen zu halten. Durch die Berücksichtigung von Haftreibungswinkeln gelingt es den Autoren auch die Kuchenkompressibilität zu modellieren und deren Einfluss auf das Restdruckverlustverhalten nachzuvollziehen. Vergleichsweise inkompressible Staubkuchen führen demnach zu einem günstigeren Restdruckverlustverlauf. Die periodische Abreinigung wird in gegenständlichem Modell nur durch die Beschleunigung des Filtermediums hervorgerufen. Als prinzipiell abreinigbar gelten alle Staubpartikel, die in direktem Kontakt zu Partikeln oberhalb des Filtermediums stehen und dabei nicht von Fasern des Filtermediums mechanisch blockiert werden. Deren Masse, zusammen mit der eingebrachten Beschleunigung, ergibt eine Beschleunigungskraft, die mit den interpartikulären Haftkräften verglichen wird, um so den Teil des Staubkuchens zu bestimmen der tatsächlich abgereinigt wird. Abbildung 7-9 zeigt den so modellierten Druckverlustverlauf bei einer Abreinigungsfiltration.



Abbildung 7-9: Mittels Einzelpartikeln modellierte Druckverlustentwicklung nach [72]

Mit dem Modell untersuchen die Autoren den Einfluss verschiedener Betriebsparameter (Filtrationsgeschwindigkeit, Abreinigungsdruck) auf das Druckverlustverhalten. Die mikroskopische Betrachtungsweise erlaubt überdies den Kuchenaufbau detailliert zu studieren, ist aber wenig geeignet um beispielsweise den Mechanismus des Patchy Cleanings zu erfassen, da schon die Größe eines Staubpatches die laterale Ausdehnung des Modells übertreffen kann.

Hettkamp et al. haben in [75] und [76] die Staubverteilung plissierter Filtermedien und den zugehörigen Druckverlustverlauf mittels einer numerischen CFD<sup>3</sup>-Methode simuliert. Für einen Vergleich Simulationsmit experimentell bestimmten Versuchsdaten, von siehe Abbildung 7-10. Hettkamp et al. verwenden dabei ein iteratives Verfahren, bei dem zunächst ein Strömungsfeld eines festgelegten Simulationsgebietes, welches die Struktur des Filtermediums abbildet, berechnet wird. So werden die Bahnen der Einzelpartikel bestimmt welche entsprechende Partikelakkumulationen auf dem Filtermedium hervorrufen. Nach einer gewissen Anzahl abgelagerter Partikel wird ein neues Strömungsfeld berechnet, das die nunmehr abgelagerten Partikel berücksichtigt usw. In der gegenständlichen Arbeit wird von reiner Oberflächenfiltration ausgegangen. Die für die Simulation benötigten prozessspezifischen Parameter, wie beispielsweise die Durchlässigkeit, wurden dabei experimentell bestimmt.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Computational Fluid Dynamics



Abbildung 7-10: Druckverlust als Funktion der anfiltrierten Staubmasse; Experiment schwarze Rauten, Simulation weiße Kreise [75]

Kopf [77] und Deuschle [78][79] haben die Filtrations-, Regenerationsund Umlagerungseffekte bei der Beladung bzw. der Regeneration eines Dieselruß-Partikelfilters simuliert und den zugehörigen Druckverlustverlauf berechnet (siehe Abbildung 7-11). Die Bahnen der Staubpartikeln berechnen Kopf und Deuschle dabei mit einem Euler-Langrange Ansatz. Das Auftreffen der Partikeln auf der Oberfläche des Filtermediums führt zur lokalen Erhöhung des Filtrationswiderstandes. Der daraus resultierende Druckverlustanstieg wird nach einem von den Autoren modifizierten Carman-Kozeny Ansatz berechnet, wobei auch der Einzelfaser-Abscheidegrad nach Löffler [39] eingeht. Für die Regenerierung, die hier thermisch erfolgt, wird ebenfalls ein eigens von den Autoren erarbeitetes Sub-Modell verwendet.



Abbildung 7-11: Druckverlust eines Dieselruß-Partikelfilters - Beladung und Abreinigungszyklen; Vergleich Experiment vs. Simulation nach [77]

#### 7.5 Zusammenfassung zur Modellierung und Simulation des Filtrationsprozesses

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich der Vorgang der Filtration und damit auch deren Modellierung und Simulation in einem Größenbereich einiger Zehnerpotenzen abspielt: von den nanoskaligen Staubpartikeln und Faserstrukturen, über mikroskalige Faserverbünde bis hin zu Filterelementen im Zentimetermaßstab und ganzen Filteranlagen im Meter-Bereich. So werden in einer mikroskopischen Betrachtungsweise beispielsweise die Bahnen einzelner Partikeln und damit der exakte Staubkuchenaufbau sowie der damit verbundene Druckverlust simuliert [58][63]-[66][69]-[79]. Die dabei auftretenden Schwierigkeiten sind mannigfaltig. Von der detaillierten Simulation der komplex aufgebauten Filtermedien ausgehend, muss ein ebenso komplexes Strömungsfeld virtuell beschrieben werden. Die Simulation des Verhaltens der einzelnen Partikeln, eventuell noch unter Berücksichtigung von Partikel-Partikel Kollisionen in diesem Strömungsfeld, stellt eine weitere Herausforderung dar. Unbekannte Größen, wie beispielsweise die Partikelform oder die Haftung von Partikeln aneinander bzw. am Filtermedium, können nur abgeschätzt werden. Überdies spielt die elektrostatische Aufladung von Partikeln und/oder dem Filtermedium oft eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Nicht zuletzt gilt es im Falle der Abreinigungsfiltration die Umkehrung von Strömungsverhältnissen durch die Pulse-Jet Abreinigung und damit verbunden auch das Abfallen von größeren Staubagglomeraten in einer solchen Simulation zu berücksichtigen. Selbst bei der Beachtung aller Mechanismen und bei Kenntnis aller zur Beschreibung selbiger nötigen Parametern, bleibt bei so einer mikroskopischen Simulation bzw. Modellierung des Filtrationsprozesses auch heute noch das Problem der hohen dazu benötigten Rechenkapazitäten aufrecht. Bei all ihren Stärken, welche die mikroskopische Betrachtungsweise der Filtration, beispielsweise im Hinblick auf ein genaueres Verständnis des Staubkuchenaufbaus und der Abscheidemechanismen besitzt. scheint für die Modellierung des globalen Druckverlustverlaufes einer aus einer Vielzahl an Filtrations- und Abreinigungszyklen bestehenden Filtermittel-Alterung dennoch eine makroskopische Betrachtungsweise als zweckdienlicher.

Bei den makroskopischen Ansätzen zur Simulation und Modellierung werden anstatt einzelner Partikeln beispielsweise mittlere Durchströmungswiderstände zur Beschreibung der Filtration herangezogen. Es hat sich gezeigt, dass die in der Literatur gefundenen gegenständlichen Beiträge meist auf eine spezielle Filtrationsaufgabe zugeschnitten sind. So wird in vielen wissenschaftlichen Aufsätzen die Regeneration des Filtermittels, welche für die Beschreibung der in dieser Arbeit behandelten Abreinigungsfiltration notwendig ist, nicht berücksichtigt [49]-[51][56][57][59]. In manchen Arbeiten werden nur einzelne Filtrationsmechanismen behandelt - beispielsweise nur die reine Kuchenfiltration [49] oder nur der Übergang von Tiefen- zu Kuchenfiltration [50][51]. Auch wird oft von einer vollständigen Abreinigung des Staubkuchens ausgegangen, wodurch der Mechanismus des Patchy Cleaning nicht weiter in die Modellbetrachtungen aufgenommen wird [60]-[62].

Auf Basis dieser Überlegungen erscheint für eine Beschreibung des Druckverlustverlaufes über der aus vielen Filtrations- und Abreinigungszyklen bestehenden Alterung ein auf makroskopischer Betrachtungsweise der Widerstands- und Strömungsverteilung fußendes Modell zweckmäßig. Als beispielgebend für die gegenständliche Modellbildung einer Fest/Gas-Filtration können auch die Arbeiten zur Fest/Flüssig-Filtration [29]-[35] herangezogen werden, da die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten als analog anzusehen sind. Hermans und Bredée [31] beschreiben beispielsweise die Druckverlustentwicklung bei der Fest/Flüssig-Filtration mit Modellgleichungen, welche auf physikalischen Vorstellungen beruhen. Die detaillierte Anpassung der Modellgleichungen an Versuchsdaten erfolgt dann mit prozessspezifischen Konstanten. Die mathematische Beschreibung des im Rahmen dieser Arbeit ersonnenen Modelles, soll dabei so gestaltet werden, dass alle bei der Alterung auftretenden Filtrationsmechanismen berücksichtigt werden können. Dies steht in gewisser Analogie zu der Modellierung der Fest/Flüssigfiltration bei Meskat [35], wo von einer Grundgleichung ausgehend, mehrere Filtrationsmechanismen beschrieben werden.

### 8 DETAILLIERTE ZIELSETZUNG DIESER ARBEIT

Wie in Abschnitt 4.4 gezeigt wurde, ist die künstliche Alterung von entscheidender Bedeutung hinsichtlich der Beurteilung des Langzeitfiltrationsverhaltens abreinigbarer Filtermedien auf der Basis von Laborversuchen. Die Änderungen der Alterungsprozedur in der VDI-Richtlinie 3926 aus dem Jahr 1994 [17] bis hin zur neuen DIN-ISO 11057 aus dem Jahr 2011 [9] (siehe Abschnitt 4.4) zielen auf eine bessere Abschätzung des Langzeitfiltrationsverhaltens ab und basieren jeweils auf einem verbesserten Kenntnisstand der Filtrationsmechanismen bei der Alterung. Ein wichtiger Parameter um das Langzeitfiltrationsverhalten abzuschätzen ist dabei der Druckverlustverlauf, der sich bei den Alterungsversuchen einstellt.

Ein den Druckverlustverlauf beschreibendes Modell ist demnach aus zweierlei Gründen nützlich: zum einen würde es den Kenntnisstand um die bei der Alterung auftretenden Filtrationsmechanismen verbessern und zum anderen wäre das Modell die Basis für zeitsparende Hochrechnungen des Druckverlustverlaufes, der sonst nur experimentell, in teils langwierigen Laborversuchen, bestimmt werden kann.

Für die Erarbeitung eines den Druckverlustverlauf bei der zeitgesteuerten Alterung abbildenden Modells wurden bereits apparative Grundlagen geschaffen: Ein eigens für die Alterung von abreinigbaren Filtermedien konzipierter Prüfstand wurde entworfen und gebaut (siehe Abschnitt 6). Mit dieser Apparatur sollen zunächst Alterungsversuche zur Aufklärung der hierbei auftretenden Filtrationsmechanismen durchgeführt werden. Dabei soll die zeitgesteuerte Alterung wie in Abschnitt 4.5 vorgeschlagen, bis zum Erreichen eines extremen Druckverlustanstieges, hervorgerufen durch die vollständige Filtermediumsverstopfung, fortgeführt werden, anstatt nach einer vorgegebenen Anzahl an Filtrationszyklen abgebrochen zu werden.

relevanten Filtrationsmechanismen Um möglichst alle bei den durchgeführten Alterungsversuchen zu erfassen, sollen Teststäube mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung und Filtermedien mit poröser und glatter Oberfläche verwendet werden. Desweiteren sollen die Betriebsparameter, wie Filtrationsgeschwindigkeit, Tankdruck und Ventilöffnungszeit variiert werden. Die generelle Messgröße ist hierbei der Druckverlust über das Prüffiltermedium, welcher zu diskreten Zeitpunkten messtechnisch erfasst wird. Wenn dies für die Erklärung des Filtrations- und Verstopfungsverhaltens zweckmäßig erscheint, sollen überdies die im und am Filtermedium haftende Staubmasse und deren Partikelgrößenverteilung gemessen bzw. bestimmt werden

Im Anschluss soll eine detaillierte Auswertung der so durchgeführten Versuche hinsichtlich ihres zeitlichen Druckverlustverlaufes Klarheit über die maßgeblichen Filtrationsmechanismen bringen. Dabei soll nicht nur der Druckverlustverlauf innerhalb der Einzelzyklen in die Betrachtungen einfließen, sondern auch die Entwicklung des Restdruckverlustes, des Abreinigungs- sowie Kuchendruckverlustes über eine Vielzahl von Filtrationszyklen hinweg analysiert werden. Um die bei der Alterung festzustellende zunehmende Verstopfung des Filtermediums, die sich in einem steigenden Restdruckverlust bemerkbar macht, besser zu verstehen, sollen Partikelgrößenanalysen durchgeführt werden. Dabei soll der nach der Abreinigung am Filtermedium haftende, für die zunehmende Verstopfung mitverantwortliche, Staub auf seine Partikelgrößenverteilung hin untersucht und mit der Partikelgrößenverteilung des Staubes, aus dem der abreinigbare Staubkuchen aufgebaut ist, verglichen werden.

Basierend auf den so erhaltenen Erkenntnissen, die maßgeblichen Filtrationsmechanismen die bei der Alterung auftreten betreffend, soll ein mathematisches Modell entwickelt werden, welches im Stande ist, den Druckverlustverlauf bei zeitgesteuerter Alterung zu beschreiben. Das Hauptaugenmerk soll dabei auf die Nachbildung des Druckverlustverlaufes vieler Filtrationszyklen gerichtet sein, weniger auf den Druckverlustverlauf innerhalb eines Zyklus. Für eine hinreichende Beschreibung des Druckverlustverlaufes bei der zeitgesteuerten Alterung ist es dabei nötig, sowohl den Restdruckverlust unmittelbar nach der Abreinigung, als auch den Abreinigungsdruckverlust unmittelbar vor der Abreinigung, bzw. äquivalente Druckverlustanteile modellhaft zu beschreiben.

Da die grundlegenden Filtrationsmechanismen, welche in das gegenständliche Modell zur Beschreibung des Druckverlustverlaufes bei zeitgesteuerter Abreinigung einfließen sollen, auch bei druckgesteuertem Betrieb gelten müssen, soll ersteres Modell auch für den druckgesteuerten Betrieb angepasst werden. Somit soll es möglich sein, auch den Druckverlustverlauf bei druckgesteuerter Abreinigung modellhaft zu beschreiben.

Schlussendlich soll die Gültigkeit des so erarbeiteten Modells, sowohl für zeitgesteuerte als auch für druckgesteuerte Betriebsweise, überprüft werden, indem durch Kurvenfit eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen experimentell ermitteltem und modelliertem Druckverlustverlauf erzielt wird. Dabei soll das Modell die experimentell ermittelten Druckverlustverläufe für eine große Bandbreite an Versuchsparametern nachbilden können. Das so erarbeitete mathematisch-empirische Modell soll sich von einer rein qualitativ beschreibenden Simulation abheben, indem auch eine quantitative Nachbildung des Druckverlustverlaufes während der Alterung durch die Anpassung prozessspezifischer Konstanten möglich ist.

## 9 DURCHGEFÜHRTE VERSUCHE ZUR AUFKLÄRUNG DER MECHANISMEN BEI DER ALTERUNG

In diesem Abschnitt soll gezeigt werden, welche Versuche im Hinblick der Aufklärung der Filtrationsmechanismen bei zeit- und druckgesteuerter Filtration im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt worden sind. Ist die Versuchsdurchführung verschieden von der in Abschnitt 6.7 vorgestellten Vorgehensweise, wird dies gesondert beschrieben.

Um die Filtrations- und Verstopfungsmechanismen, die insbesondere für den Restdruckverlustanstieg verantwortlich sind, besser zu verstehen, wurden Versuche zur Bestimmung der Korngrößenverteilungen des Staubes an verschiedenen Orten der Alterungskammer durchgeführt (Durchführung siehe Abschnitt 9.1). Zusätzlich dienen die Partikelgrößenanalysen dazu, die in Abschnitt 6.5 vorgestellte Kalibrierung des Staubdosierers auf die einzelnen Teststäube zu verifizieren (Ergebnisse siehe Abschnitt 10.1).

Für eine Erklärung der schon in Abschnitt 4.5 diskutierten vollständigen Filtermediumsverstopfung wurden Versuche mit zeitlich hochaufgelöster Druckverlustmessung über das Prüffiltermedium durchgeführt, wie in Abschnitt 9.2 dargelegt wird (Ergebnisse siehe Abschnitt 10.2.2.3).

Auch wurden nach der in Abschnitt 9.3 beschriebenen Vorgehensweise Versuche zur Bestimmung der nach der Abreinigung im und am Filtermedium haftenden Reststaubmasse durchgeführt, um ein besseres Verständnis der Verstopfungsvorgänge, die zum Restdruckverlustanstieg führen, zu erlangen (Ergebnisse siehe Abschnitt 10.2.2.1).

Für eine möglichst allumfassende Aufklärung der Filtrationsmechanismen bei der Alterung wurden Teststäube mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung sowie Agglomerationsneigung verwendet (Ergebnisse siehe Abschnitt 10.4). Auch wurden zwei Filtermedien mit glatter und poröser Oberfläche in die Untersuchengen mit einbezogen (Ergebnisse siehe Abschnitt 10.3).

Überdies wurden gemäß Abschnitt 9.4 die Filtrationsgeschwindigkeit, sowie die Abreinigungsparameter Tankdruck und Ventilöffnungszeit variiert, um einen eventuellen Einfluss auf die Filtrationsmechanismen erkennen zu können (Ergebnisse siehe Abschnitt 10.5).

# 9.1 Versuche zur Messung der Partikelgrößenverteilungen an verschiedenen Orten der Alterungskammer

Im Rahmen der Versuche zur Aufklärung der Filtrationsmechanismen bei der Alterung wurden Partikelgrößenverteilungen des nach der Abreinigung am Filtermedium haftenden Staubes sowie des im vertikalen Rohgaskanal mit der Strömung nach oben transportierten bzw. nach unten sedimentierenden Staubes durchgeführt.

Als Messgerät zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilungen wurde ein Laserbeugungsanalysator "Mastersizer 2000" (ID-Nr.: MAL 1034369) der Firma Malvern Instruments mit einer roten Helium-Neon-Laserlichtquelle 633 nm und einer blauen Festkörperlichtquelle 466 nm verwendet. Der Multizonendetektor erlaubt die Ermittlung des Korngrößenspektrums von 0,02 µm bis 2.000 µm mit einer Auflösung von 50 Korngrößenklassen. Zur Suspendierung wurde eine Hydro 2000 S Dispergiereinheit (ID-NR.: MAL 1009117) der Firma Malvern Instruments verwendet. Als Dispersionsmittel wurden je Staubprobe ca. 250 ml destilliertes Wasser verwendet.

Um eine Partikelgrößenverteilung darzustellen, ermittelt das Messgerät das Gesamtvolumen der dispergierten Staubprobe ( $V_{ges}$ ) und das Volumen der Staubprobe in jeder i-ten Partikelgrößenklasse ( $V_i$ ). Das Verhältnis von Klassenvolumen zu Gesamtvolumen ergibt dann die volumenbezogene, relative Partikelgrößenverteilung ( $\Omega$ ):

$$\Omega = \frac{V_i}{V_{ges}}$$
9-1

| Ω                | Volumenbezogene, relative Partikelgrößenverteilung[     | %]  |
|------------------|---|-----|
| V <sub>i</sub>   | Volumen der Staubprobe der i-ten Partikelgrößenklasse[1 | m³] |
| V <sub>ges</sub> | Gesamtvolumen der Staubprobe[1                          | m³] |

#### 9.1.1 Partikelgrößenverteilung des Ausgangsmaterials

Es wurde je Teststaub eine repräsentative Probe aus den Staublagerbehältern entnommen. Um Probenahmefehler bei dem Verbringen des Staubes vom Probengefäß in die Dispergiereinheit des Messgerätes auszugleichen, wurden je Teststaub drei Reihenmessungen zu je fünf Einzelmessungen durchgeführt. Für jede Reihenmessung wurde 0,3-0,5 g der Probe mittels Spatel in die Dispergiereinheit des Messgerätes verbracht und analysiert (siehe Abbildung 6-6).

#### 9.1.2 Partikelgrößenverteilung des im Rohgaskanal mit der Strömung nach oben ans Filtermedium transportierten Staubes, sowie des sedimentierenden Staubes

Um an Proben des im Rohgaskanal nach oben ans Filtermedium transportierten Staubes zu gelangen ("Kuchen"), wurde ein Filtermedium, dessen Partikelpenetration vernachlässigbar ist, 10 min ohne Abreinigung in der Alterungskammer bestaubt, um einen ausreichenden Staubkuchenaufbau am Filtermedium zu gewährleisten. Die Rohgaskonzentration wurde dabei mit 5,5 g/m<sup>3</sup> konstant gehalten. Der in Abbildung 6-1 schematisch dargestellte Staubbunker wurde während dieser 10 min abgenommen und durch eine dichte Plastikplatte ersetzt. Das im von unten nach oben durchströmten Rohgaskanal durch Sedimentation während der Filtration nicht auf das Filtermedium gelangende, sondern auf besagte Platte absinkende Staubmaterial ("Bunker") konnte so gesammelt, ausgewogen und auf seine Partikelgrößenverteilung hin untersucht werden. Nach 10 min wurde das bestaubte Filtermedium vorsichtig ausgebaut, die Staubmasse des Filterkuchens durch Differenzwägung mit dem unbestaubten Filtermedium ermittelt, und der Filterkuchen vorsichtig abgeklopft. Um Probenahmefehler hintanzuhalten, wurden je drei Reihenmessungen des gewonnen Staubkuchens zu je fünf Einzelmessungen durchgeführt. Für jede Reihenmessung wurde 0,3-0,5 g Probenmaterial mittels Spatel in die Dispergiereinheit des Messgerätes verbracht und analysiert. Das auf der Plastikplatte durch Sedimentation gesammelte Staubmaterial wurde ebenso auf seine Partikelgrößenverteilung hin untersucht.

Um einen eventuellen Einfluss der Filtrationsgeschwindigkeit auf die Sedimentation im Rohgaskanal zu untersuchen, wurden Versuche bei unterschiedlichen Filtrationsgeschwindigkeiten durchgeführt. Die gewählten Filtrationsgeschwindigkeiten (2-3 m/min) decken hierbei den Bereich ab in dem die Alterungsversuche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden (Ergebnisse und Interpretation hierzu siehe Abschnitt 10.1 und Abbildung 10-1 bis Abbildung 10-3).

## 9.1.3 Partikelgrößenverteilung des nach der Abreinigung an der Filtermediumsoberfläche haftenden Staubes

Um die Partikelgrößenverteilung des direkt an der Oberfläche des Filtermediums haftenden Staubes zu bestimmen ("Sekundärkuchen") und so die in 10.2.2.1 diskutierten Modellvorstellungen zu untermauern (siehe auch Abbildung 10-14, sowie Anhang Abbildung 16-1 bis Abbildung 16-3), wurde das jeweilige Filtermedium mit dem jeweiligen Teststaub ca. 100 Zyklen lang in der Alterungskammer bei einer Rohgaskonzentration von 5,5 g/m<sup>3</sup> bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2,5 m/min gealtert und nach einer on-line Abreinigung ausgebaut. Anschließend wurde der noch anhaftende Staub mittels destillierten Wassers aus einer Sprühflasche (Membranfiltermedium) bzw. durch eine Kombination von Abbürsten und Abwaschen (PI - Nadelfilzfiltermedium) in ein Becherglas verbracht. Die Staubprobe lag so in ca. 100 ml destilliertem Wasser vor. Die erhaltene Suspension wurde ständig gerührt, um ein Absetzen der Partikel zu verhindern. Mittels einer Pipette wurde ein zur Partikelgrößenanalyse benötigte Teil (ca. 10 ml) der Suspension in die Dispergiereinheit des Messgerätes geträufelt und in weiterer Folge analysiert. Um Probenahmefehler hintanzuhalten wurden je Probe drei Reihenmessungen zu je fünf Einzelmessungen durchgeführt.

#### 9.2 Versuche mit zeitlich hochaufgelöster Druckverlustmessung über das Prüffiltermedium

Die von Schuberth in [14] vorgestellte Erklärung, wonach die gänzliche Verstopfung des Filtermediums im Rahmen der von ihm vorgeschlagenen zeitgesteuerten Alterungsprozedur (siehe Abschnitt 4.5) auf eine zunehmende Schwächung des Abreinigungsimpulses durch einen steigenden reingasseitigen Unterdruck, welcher wiederum durch den Anstieg des Abreinigungsdruckverlustes bei zeitgesteuerter Alterung verursacht wird, zurückzuführen ist, soll mittels zeitlich hochaufgelöster Druckverlustmessung über das Prüffiltermedium während der Abreinigungsprozedur bestätigt werden.

Die in Abschnitt 6.1 beschriebene Messeinrichtung zur zeitlich hochauflösenden Druckverlustmessung zeichnet hierbei, ausgelöst durch das kurzzeitige Absinken des Tankdruckes bei der Abreinigung, den Druckverlust über das Prüffiltermedium mit einer Abtastrate von 2 ms auf. Die grundsätzliche Versuchsdurchführung erfolgte dabei nach Abschnitt 6.7.1. Ergebnisse dazu, siehe Abschnitt 10.2.2.3.

# 9.3 Versuche mit Bestimmung der Reststaubmasse im und am Filtermedium

Um das durch den Restdruckverlustanstieg gekennzeichnete zeitliche Verstopfungsverhalten bei der Alterung zu analysieren, wurden Versuche durchgeführt bei denen die jeweils nach erfolgter Abreinigung sich am und im Filtermedium befindende Reststaubmasse bestimmt wurde. Hierfür wurde die Alterung jeweils nach erfolgter Abreinigung unterbrochen, das jeweilige Filtermedium vorsichtig ausgebaut und gewogen. Durch Differenzwägung konnte so die Zunahme an Reststaubmasse über eine Vielzahl an Filtrations- und Abreinigungszyklen
bestimmt werden. Die grundsätzliche Versuchsdurchführung erfolgte dabei nach Abschnitt 6.7.1. Ergebnisse, siehe Abschnitt 10.2.2.1.

### 9.4 Versuche mit Variation der Betriebsparameter (Filtrationsgeschwindigkeit, Tankdruck und Ventilöffnungszeit)

Um deren möglichen Einfluss auf die Filtrationsmechanismen bei zeitgesteuerter Alterung zu untersuchen, wurde die Filtrationsgeschwindigkeit in einer Versuchsserie ausgehend von dem in der DIN-ISO 11057 [9] Richtlinie vorgesehenen Wert im Bereich von 2,0 bis 3,0 m/min variiert.

Tankdruck und Ventilöffnungszeit wurden in Versuchsserien sowohl mit druckgesteuerter als auch mit zeitgesteuerter Abreinigung variiert, um auch deren Einfluss auf die Filtrationsmechanismen ergründen zu können. Die grundsätzliche Vorgehensweise bei diesen zeit- und druckgesteuerten Versuchen ist in Abschnitt 6.7 beschrieben (Ergebnisse siehe Abschnitt 10.5).

### 9.5 Versuche mit unterschiedlichen Teststäuben und Filtermedien

Um den Einfluss von unterschiedlichen Teststäuben und Filtermedien auf die Mechanismen bei der Alterung aufzuklären, wurden die Alterungsversuche nach der in Abschnitt 6.7.1 beschriebenen Vorgehensweise mit zwei unterschiedlich strukturierten Filtermedien (Abschnitt 6.6) und Teststäuben mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung (Abschnitt 6.4) durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abschnitt 10.3 (Variation des Filtermediums) und 10.4 (Variation des Teststaubes) dargestellt.

## 10 VERSUCHSERGEBNISSE UND DEREN INTERPRETATION

In diesem Abschnitt sollen die Ergebnisse der in Abschnitt 9 beschriebenen Versuche dargestellt und interpretiert werden.

## 10.1 Interpretation der Ergebnisse der Partikelgrößenanalyse im Hinblick auf den Einfluss der Filtrationsgeschwindigkeit auf die Sedimentation im Rohgaskanal

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Filtrationsgeschwindigkeit auf die Sedimentation von Teststaub im von unten nach oben durchströmten Rohgaskanal diskutiert. Die bei verschiedenen Filtrationsgeschwindigkeiten unterschiedlich ausgeprägte Sedimentation könnte einen Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung des im Rohgasstrom nach oben ans Filtermedium transportierten Staubanteiles ("Kuchen") besitzen. Der Staubanteil der durch Sedimentation nach unten absinkt wird im Folgenden mit "Bunker" bezeichnet.

Um an Staubproben des nach oben ans Filtermedium transportierten Staubes ("Kuchen") und des nach unten sedimentierenden Staubes ("Bunker") zu gelangen, wurde wie in Abschnitt 9.1.2 dargelegt, vorgegangen. Die Analyse der Staubproben erfolgte nach den Ausführungen in Abschnitt 9.1. Um einen eventuellen Einfluss der Filtrationsgeschwindigkeit auf die Sedimentation im von unten nach oben durchströmten Rohgaskanal zu berücksichtigen, wurden die Untersuchungen bei unterschiedlichen Filtrationsgeschwindigkeiten durchgeführt. Die gewählten Filtrationsgeschwindigkeiten (2,0-3,0 m/min) decken hierbei den Bereich ab, in dem die Alterungsversuche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden.

In Abbildung 10-1 bis Abbildung 10-3 sind die wie oben beschrieben ermittelten, aus den Einzelmessungen gemittelten, Partikelgrößenverteilungen dargestellt. Man entnimmt den Abbildungen, dass eine gewisse Klassierung aufgrund von Sedimentation im Rohgaskanal stattfindet, da die Partikelgrößenverteilungen des Bunkermaterials im Vergleich zum Kuchenmaterial generell zu größeren Partikelgrößenverteilungen sind. Im Falle des Kuchenmaterials zeigen die ermittelten Partikelgrößenverteilungen im betrachteten Bereich keine signifikanten Abhängigkeiten von der Filtrationsgeschwindigkeit – die Kurven sind nahezu deckungsgleich. Dies bedeutet, dass die festgestellte Klassierung durch Sedimentation im senkrechten Rohgasteil der Alterungskammer im betrachteten Bereich als praktisch unabhängig von der Filtrationsgeschwindigkeit angesehen werden kann.



Abbildung 10-1: Partikelgrößenverteilungen des in den Bunker sedimentierten Staubes ("Bunker") sowie des den Staubkuchen bildenden Staubes ("Kuchen") bei CaCO<sub>3</sub> als Teststaub



Abbildung 10-2: Partikelgrößenverteilungen des in den Bunker sedimentierten Staubes ("Bunker") sowie des den Staubkuchen bildenden Staubes ("Kuchen") bei Pural NF als Teststaub



Abbildung 10-3: Partikelgrößenverteilungen des in den Bunker sedimentierten Staubes ("Bunker") sowie des den Staubkuchen bildenden Staubes ("Kuchen") bei Pural SB als Teststaub

Überdies wurde die Gesamtmasse des nach 10 Minuten Filtrationszeit abgeklopften Staubkuchens gravimetrisch bestimmt. Nach Gleichung 10-1 wurden alsdann die tatsächlich erreichte Rohgaskonzentrationen errechnet.

$$c = \frac{m}{\nu * A * 10min}$$
 10-1

| m | Gesamtmasse des abgeklopften Staubkuchens | [g]               |
|---|---|-------------------|
| v | Filtrationsgeschwindigkeit                | [m/min]           |
| A | Filteranströmfläche                       | [m <sup>2</sup> ] |

In Abbildung 10-4 bis Abbildung 10-6 sind die tatsächlich erreichten Rohgaskonzentrationen für die verwendeten Teststäube bei verschiedenen Filtrationsgeschwindigkeiten (Filtrationsgeschw.) aufgetragen. Bei allen zum Einsatz kommenden Teststäuben und Filtrationsgeschwindigkeiten zeigt sich, dass der Sollwert der Rohgaskonzentration von 5,5 g/m<sup>3</sup> in guter Näherung erreicht wird.





Abbildung 10-4: Rohgaskonzentrationen bei verschiedenen Filtrationsgeschwindigkeiten für CaCO<sub>3</sub> Teststaub

Abbildung 10-5: Rohgaskonzentrationen bei verschiedenen Filtrationsgeschwindigkeiten für Pural NF Teststaub



Abbildung 10-6: Rohgaskonzentrationen bei verschiedenen Filtrationsgeschwindigkeiten für Pural SB Teststaub

Die in Abschnitt 6.5 bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2,5 m/min ermittelten Regressionsgeraden zur Kalibrierung des Staubdosierers können demnach für den gesamten, im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigten, Filtrationsgeschwindigkeitsbereich von 2 bis 3 m/min zur Einstellung einer gewünschten Rohgaskonzentration verwendet werden.

# 10.2 Interpretation der Versuchsergebnisse hinsichtlich der Aufklärung der Filtrationsmechanismen bei zeitgesteuerter Alterung

Im Folgenden sollen die bei der Alterung relevanten Filtrationsmechanismen identifiziert werden, welche bei der anschließenden Modellbildung zu berücksichtigen sind. Es sollen anhand eines Versuches (siehe Abbildung 10-7), der mit einem industriell typisch eingesetzten PI - Nadelfilzfiltermedium und einem Standard-Teststaub (Pural NF) durchgeführt wurde, die bei der zeitgesteuerten Alterung maßgebenden Filtrationsmechanismen mittels einer Analyse des Druckverlustverlaufes aufgeklärt werden. Zunächst wird hierfür der Druckverlustverlauf einzelner Zyklen während des Alterungsprozesses analysiert und so gezeigt, welche Filtrationsmechanismen während der Alterung auftreten und wie sie sich im Verlauf der Alterung ändern. Im Anschluss wird diskutiert welchen Einfluss der Wechsel der Filtrationsmechanismen auf den ganzheitlichen Druckverlustverlauf des Restdruckverlustes Druckverlustes  $\Delta p_{\rm R}({\rm N}),$ des des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{\rm C}({\rm N})$ und des Abreinigungsdruckverlustes  $\Delta p_A(N)$ während des Alterungsversuches hat. Der Kuchendruckverlust  $\Delta p_{K}(N)$  eines Zyklus N setzt sich nach Abbildung 10-7 (Detail) aus dem Druckverlust des abgereinigten Kuchens Ap<sub>C</sub>(N) zuzüglich dem Restdruckverlustanstieg  $\Delta\Delta p_{R}(N)$  zusammen. Die so gewonnenen Erkenntnisse sollen die Basis für eine Modellierung des Druckverlustverlaufes in Abschnitt 11 darstellen. Im Anschluss wird noch der Einfluss von unterschiedlichen auf Filtermedium, Teststaub und Betriebsparametern die Filtrationsmechanismen diskutiert.

In Abbildung 10-7 ist der gesamte Druckverlustverlauf über das Prüffiltermedium in Abhängigkeit Zyklenzahl N inklusive der zugehörigen Versuchsparamter dargestellt. Durch dickere Linien extra hervorgehoben sind die globalen Verläufe von Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$ (hellgrau) und Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_A(N)$  (schwarz). Man erkennt zunächst, dass die Alterung ausgehend von einem niedrigen Druckverlustniveau, dem Leedruckverlust des unbestaubten Filtermediums  $\Delta p_0$ , immer höheren Druckverlustwerten zustrebt bis ein extremer Druckverlustanstieg erfolgt, wobei rasch der anlagenseitig vorgegebene maximale Druckverlust von 35 hPa erreicht wird, bei dem der Versuch automatisch abbricht. Da die Alterung zeitgesteuert erfolgt und damit kein maximaler Druck festgelegt ist, bei dem die Abreinigungen erfolgen, steigt während des zeitgesteuerten Alterungsversuches neben dem Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$  auch der Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_A(N)$  kontinuierlich an.



Abbildung 10-7: Druckverlustverlauf bei zeitgesteuerter Alterung, links Gesamtansicht, rechts Detail

#### 10.2.1 Analyse der zeitlichen intrazyklischen Druckverlustanstiege

Im Folgenden sollen die zeitlichen Druckverlustanstiege innerhalb der Filtrationszyklen hinsichtlich der auftretenden Filtrationsmechanismen analysiert werden.

#### 10.2.1.1 Filtrationsmechanismus - Tiefenfiltration



Abbildung 10-8: Zeitlicher Druckverlustverlauf ausgewählter Zyklen - Tiefenfiltration

Abbildung 10-8 die Druckverlustzeigt entwicklung eines der ersten Filtrationszyklen des in diesem Abschnitt behandelten Versuches. Aufgrund der vergleichsweise porösen Oberfläche des verwendeten PI - Nadelfilzfiltermediums wird zu Beginn des Alterungsversuches ein nicht zu vernachlässigender Anteil des anfiltrierten Staubes nicht an der Oberfläche des Filtermediums, sondern erst in tieferen Schichten, abgeschieden. Der mit der Strömung transportierte Staub lagert sich auf einer vergleichsweise großen Fläche ab und ruft somit den in Abbildung 10-8 gezeigten vergleichsweise geringen Kuchendruckverlustanstieg,  $\Delta p_K \approx 2$  hPa, innerhalb des Zyklus hervor. Das Fehlen eines für die Tiefenfiltration typischen ausgeprägt konkaven Druckverlustanstieges ist auf die relativ kurze Zykluszeit von 100 s zurückzuführen.

#### 10.2.1.2 Filtrationsmechanismus - Inneres Patchy Cleaning

In Abbildung 10-9 ist ein Ausschnitt des zeitlichen Druckverlustverlaufes nach einer Stunde Versuchsdauer dargestellt. Der Kuchendruckverlust  $\Delta p_K(N)$  hat sich von anfänglich ca. 2 hPa bei dominierendem Tiefenfiltrationsmechanismus auf ca. 6 hPa erhöht. Überdies erkennt man, dass der Druckverlust zu Beginn eines Zyklus rasch ansteigt, bevor er nach ca. einem Drittel der Zykluszeit vergleichsweise flacher verläuft. Dieser Druckverlustverlauf lässt auf eine Vergleichmäßigung der Anströmung des Filtermediums innerhalb eines Zyklus schließen. Die

ungleichmäßige Strömungsführung zu Beginn des hier gezeigten Filtrationszyklus lässt sich mit der Staubeinlagerung im Filtermedium in der vorangegangenen Filtrationsphase mit dominierender Tiefenfiltration erklären. Da auch das Filtermedium selbst Inhomogenitäten aufweist, wird der Staub nicht gleichmäßig verteilt im Filtermedium abgelagert, sondern vornehmlich in den Strömungsschattenstellen der Faserstrukturen des Filtermediums, wo der Staub auch nach der Abreinigung verbleibt. Dies hat die Ausbildung bevorzugten von



Abbildung 10-9: Zeitlicher Druckverlustverlauf ausgewählter Zyklen – Inneres Patchy Cleaning

Strömungskanälen durch das Filtermedium zur Folge. Der konstant bleibende Volumenstrom wählt den Weg durch diese Strömungskanäle aufgrund des dort vergleichsweise geringeren Strömungswiderstandes. Lokal erhöhte Strömungs-geschwindigkeiten mit einhergehendem starkem Druckverlustanstieg sind die Folge. Die von der Strömung transportierten Staubpartikeln werden dadurch auf einer vergleichsweise kleineren Fläche abgelagert. Dies erklärt den vergleichsweise steilen Anstieg des Druckverlustes über das Prüffiltermedium zu Beginn des Zyklus.

Das Abflachen des Druckverlustanstieges nach etwa einem Drittel der Zykluszeit kann mit einer Vergleichmäßigung der Strömung über das Prüffiltermedium erklärt werden. Die aus kanalartigporösen Strukturen bestehenden bevorzugten Strömungskanäle werden innerhalb des Zyklus durch abgelagerten Staub aufgefüllt, wodurch der Strömungswiederstand an diesen Stellen auf ein höheres Niveau gebracht wird, welches den umgebenden, dichteren Faserstrukturen des Filtermediums entspricht. Durch diesen Widerstandsausgleich verteilen sich die anfiltrierten Partikeln nun auf eine größere Fläche – der Druckverlustanstieg flacht ab und läuft auf eine Kuchenfiltration zu.

Der hier diskutierte Filtrationsmechanismus beschreibt analog zum Mechanismus des Patchy Cleaning (10.2.1.3) eine Strömungsvergleichmäßigung innerhalb eines Zyklus. Anders als beim an der Oberfläche des Filtermediums stattfindenden Strömungsausgleiches beim Patchy Cleaning, findet der Strömungsausgleich im Falle des sogenannten Inneren Patchy Cleaning in den Schichten unterhalb der Oberfläche des Filtermediums statt. Der Druckverlustverlauf innerhalb eines Zyklus weist bei beiden Mechanismen die gleiche Gestalt auf: ein zunächst stärkerer Druckverlustanstieg flacht im Verlauf des Zyklus ab. Die Unterscheidung zwischen Patchy Cleaning und innerem Patchy Cleaning gelingt durch die visuelle Analyse der Filtermediumsoberfläche nach der Abreinigung. Fehlen die für das Patchy Cleaning charakteristischen Staubrückstände nach einer Regeneration am Filtermedium, kann man bei oben gezeigtem Druckverlustverlauf eines Zyklus von Innerem Patchy Cleaning ausgehen.

#### 10.2.1.3 Filtrationsmechanismus - Patchy Cleaning

Abbildung 10-10 zeigt einen typischen Druckverlustverlauf bei Vorhandensein des Filtrationsmechanismus Patchy Cleaning am Ende des hier detailliert untersuchten Alterungsversuches. Staubkuchenfragmente, welche aufgrund der unvollständigen Regenerierung des Filtermediums vollständig auf der Oberfläche haften bleiben ("Patches"), sorgen für eine lokale Erhöhung des Strömungswiderstandes gegenüber abgereinigten Flächen



Abbildung 10-10: Zeitlicher Druckverlustverlauf ausgewählter Zyklen - Patchy Cleaning

des Filtermediums. Der konstante Volumenstrom teilt sich dadurch um die haften gebliebenen Kuchenfragmente herum auf Flächen niedrigeren Strömungswiderstandes auf. Dies sorgt, ähnlich wie beim Inneren Patchy Cleaning, für lokal erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten und damit zu einem vergleichsweise raschen Druckverlust-anstieg zu Beginn des Zyklus. Der mit der Strömung transportierte Staub lagert sich im Vergleich zur Anströmfläche des Filtermediums auf einer kleineren Fläche ab. Hat sich im Verlauf des Zyklus auf den zuvor abgereinigten Flächen des Filtermediums gleich viel Staub abgelagert wie es den haften gebliebenen Kuchenfragmenten entspricht, ist der Strömungswiderstand über die Filterfläche wieder ausgeglichen. Der Volumenstrom verteilt sich in einem Kuchenfiltrationsmechanismus über die ganze Filteranströmfläche. Es ergibt sich ein Druckverlustanstieg innerhalb eines Zyklus der dem des Inneren Patchy Cleanings entspricht.

Neben der oben (10.2.1.2) erwähnten Möglichkeit der visuellen Unterscheidung zwischen Innerem Patchy Cleaning und Patchy Cleaning, weist auch ein hoher Anstieg des Restdruckverlustes  $\Delta p_R(N)$  zwischen zwei Filtrationszyklen (Abbildung 10-10) durch die haften bleibenden Kuchenfragmente auf das Vorhandensein von Patchy Cleaning hin und hilft so zwischen Innerem Patchy Cleaning und Patchy Cleaning zu unterscheiden.

#### 10.2.1.4 Filtrationsmechanismus - Kuchenfiltration

Im hier betrachteten Alterungsverlauf fehlen Zyklen mit rein linearem Druckverlustanstieg, dem Kennzeichen der Kuchenfiltration. Es kann jedoch festgestellt werden, dass der Anteil an

linearem Druckverlustverhalten und damit der Anteil der Kuchenfiltration innerhalb der Zyklen variiert. Vergleicht man Abbildung 10-11 (Zeit ca. 5,5 h) mit Abbildung 10-12 (Zeit ca. 5,6 h) so ist festzuhalten, dass mit fortschreitender Versuchsdauer der zeitliche Anteil am linearen Druckverlustanstieg innerhalb eines Zyklus und damit der Kuchenfiltrationsanteil zugenommen hat. Die Kuchenfiltration ist dabei von einem linearen Druckverlustanstieg, dem eine gleichmäßige Strömungsgeschwindigkeitsverteilung zu Grunde liegt, gekennzeichnet. Die



Abbildung 10-11: Zeitlicher Druckverlustverlauf ausgewählter Zyklen – (vornehmlich) Kuchenfiltration

Strömung verteilt sich beim Mechanismus der Kuchenfiltration gleichförmig über die Anströmfläche des Filtermediums. Der von der Strömung transportierte Staub lagert sich demnach ebenfalls gleichmäßig über die Filteroberfläche ab und formt einen homogenen Staubkuchen. Den größten Anteil an Kuchenfiltration (linearer Druckverlustanstieg) weisen die Zyklen innerhalb des extremen Druckverlustanstieges zu Ende des in diesem Abschnitt analysierten Versuches (Abbildung 10-7) auf. Dies liegt darin begründet, dass aufgrund des hohen

Abreinigungsdruckes, sowie des damit verbundenen hohen reingasseitigen Unterdrucks, der zur Regenerierung des Filtermediums auf der Reingasseite eingeblasene Druckluftstoß bis zur Unwirksamkeit der Abreinigung gedämpft wird (siehe dazu Abschnitt 10.2.2.3). Ein gänzlich intakter Staubkuchen bleibt am Filtermedium haften, wodurch der Druckverlust über das Prüffiltermedium durch die Abreinigung nicht mehr wesentlich reduziert werden kann (siehe Abbildung 10-12). Der nach auch der Abreinigung intakte Staubkuchen stellt eine



Abbildung 10-12: Zeitlicher Druckverlustverlauf ausgewählter Zyklen - (vornehmlich) Kuchenfiltration

homogene Unterlage für den im folgenden Zyklus anfiltrierten Staub dar. Somit ist vom Beginn des Zyklus ein gleichmäßiger Strömungswiderstand über die Anströmfläche gegeben, der in einer homogenen Strömungsverteilung, einem regelmäßigen Staubkuchenaufbau und damit einem linearen Druckverlustanstieg mündet. Das kurzzeitige Absinken des Druckverlustes zum Zeitpunkt des Druckluftstoßes, der das Filtermedium regenerieren soll (siehe Abbildung 10-12, eingekreiste Bereiche), ist nicht auf eine Abreinigung des Kuchens zurückzuführen, wie das blitzartige Wiederansteigen des Druckverlustes zeigt, sondern stellt Messartefakte der Differenzdruckmessung durch den eingeblasenen Druckluftpuls dar.

#### 10.2.2 Analyse der Druckverlustentwicklung über eine Vielzahl an Filtrationszyklen

Im letztem Abschnitt 10.2.1 wurden die zeitlichen Druckverlustanstiege innerhalb einzelner repräsentativ gewählter Zyklen analysiert, um die bei der Alterung auftretenden Mechanismen identifizieren zu können. Nun soll diskutiert werden in welcher Weise sich diese Mechanismen bzw. das ineinander Übergehen dieser Mechanismen auf den Druckverlustverlauf des gegenständlich behandelten Versuches (Abbildung 10-7) auswirken. Dazu werden im Folgenden die Druckverlustentwicklungen mit zunehmender Zyklenzahl von Restdruckverlust  $\Delta p_{R}(N)$ , Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_{A}(N)$  und Kuchendruckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{\rm C}({\rm N})$  über das Prüffiltermedium näher untersucht. Zur Untermauerung der im Folgenden getroffenen Aussagen wird diese Analyse der oben angegebenen zeitlichen Druckverlustverläufe mit Daten zur Reststaubmasse, die selbst nach den Abreinigungen am und im Filtermedium haftet (siehe Abbildung 10-13), mit Daten, die mit schneller Druckmessung (siehe Abbildung 10-19) gewonnen wurden, sowie mit Daten zur Partikelgrößenverteilung des Staubkuchens und des direkt am Filtermediums haftenden Staubes (siehe Abbildung 10-14) ergänzt.

### 10.2.2.1 Analyse der Entwicklung des Restdruckverlustes $\Delta p_R(N)$ unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Versuche mit Bestimmung der Reststaubmasse, sowie Partikelgrößenanalysen

Abbildung 10-13 zeigt den Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$  sowie den Verlauf der im und am Filtermedium, nach den Abreinigungen, haftenden Reststaubmasse in Abhängigkeit der Zyklenzahl N. Der Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$  eines jeden Zyklus kann aus den aufgezeichneten Druckverlustdaten mittels Tabellenkalkulationsprogramm bestimmt werden. Die Reststaubmasse ist hierbei jener Anteil des gesamt anfiltrierten Staubes, welcher nicht abgereinigt wird. Auf die Reststaubmasse wird hier Bezug genommen, da dieser Staubanteil direkt mit dem Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$  in Verbindung gebracht werden kann. Stellt man diese Daten gegenüber, so fällt zunächst auf, dass der Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$  zu Beginn der Alterung, ausgehend vom Leerdruckverlust des unbestaubten Filtermediums  $\Delta p_0$ , trotz der hohen Wachstumsrate der Reststaubmasse vergleichsweise moderat ansteigt.



Abbildung 10-13: Restdruckverlustverlauf  $\Delta p_R(N)$  und Reststaubmasse über die Zyklenzahl N

Dies hängt mit der in Abschnitt 10.2.1.1 diskutierten Tiefenfiltration zu Beginn des Versuches zusammen. Der anfiltrierte Staub dringt dabei während der Filtrationsphase in die Tiefe des Filtermediums ein. Nach der Abreinigung lagert er sich dort bevorzugt in den Strömungsschattenstellen im Faserverbund des Filtermediums ein, von wo der Staub nicht mehr vollständig entfernt werden kann. Staubmassen die sich in den Strömungsschattenstellen

ablagern, erhöhen den Filtrationswiderstand nur wenig, wodurch selbst bei den in Abbildung 10-13 gezeigten hohen Zuwächsen an Reststaubmasse zu Beginn der Alterung der Restdruckverlustanstieg  $\Delta p_{R}(N)$  vergleichsweise gering ausfällt. Nach den anfänglichen, hohen Zuwachsraten, bis zu einer Zyklenzahl von ca. 40, steigt die Reststaubmasse im und am Filtermedium mehr oder weniger linear an. Das nahezu parallel-lineare Ansteigen von Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$  und Reststaubmasse in der Versuchsphase von ca. 40 – 175 Zyklen deutet darauf hin, dass sich ein nicht abreinigbarer Sekundärkuchen aus den oberflächennahen Faserschichten des Filtermediums heraus ausbildet [23]. Aufgrund seiner erhöhten Haftneigung bleibt dabei vornehmlich der Feinanteil des anfiltrierten Staubes direkt an den Fasern des Filtermediums beziehungsweise am Sekundärkuchen selbst haften und vergrößert diesen. Vergleicht man die Partikelgrößenverteilung des den Sekundärkuchen bildenden Staubes ("Sekundärkuchen" in Abbildung 10-14), mit der Partikelgrößenverteilung des anfiltrierten Staubes ("Kuchen" in Abbildung 10-14), so stellt man fest, dass der Staub des Sekundärkuchens eine in Richtung kleinerer Partikelgrößen verschobene Partikelgrößenverteilung aufweist. Dies untermauert die These, dass sich ein Sekundärkuchen aus den oberflächennahen Schichten des Filtermediums herausbildet, der aus dem haften bleibenden Feinanteil des gesamt anfiltrierten Staubes besteht.



Abbildung 10-14: Partikelgrößenverteilung von (Staub-)Kuchen und Sekundärkuchen bei einem PI -Nadelfilzfiltermedium

Der in Abbildung 10-14 gezeigte Sachverhalt, wonach der Staub des Sekundärkuchens eine zu kleineren Partikelgrößen hin verschobene Partikelgrößenverteilung im Vergleich zum gesamt anfiltrierten Staub ("Kuchen") aufweist, kann man auch bei allen anderen im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Filtermedium/Teststaub - Kombinationen beobachten – siehe hierzu Abschnitt 16 Anhang, Abbildung 16-1 bis Abbildung 16-3. Im Wesentlichen kann also die wachsende Reststaubmasse, welche als Sekundärkuchen in Erscheinung tritt, für den Anstieg

des Restdruckverlustes  $\Delta p_{R}(N)$  verantwortlich gemacht werden. In gegenständlichem Fall wächst der Sekundärkuchen auch in einer Phase des Inneren Patchy Cleaning (siehe auch Ausführungen in Abschnitt 10.2.2.2) aus den oberflächennahen Schichten des Filtermediums heraus an die Oberfläche. Damit ist auch die Sekundärkuchenmasse anfänglich von bevorzugten Strömungskanälen durchzogen, welche mit fortschreitender Alterung durch haften bleibende Partikel verengt werden. Somit steht dem konstanten Volumenstrom eine immer geringer werdende freie Anströmfläche zur Verfügung was ebenfalls zum Anstieg des Restdruckverlustes  $\Delta p_{R}(N)$  beiträgt. Der rasche Restdruckverlustanstieg nach ca. 195 Zyklen geht mit einer stark zunehmenden Reststaubmasse einher. Dies liegt, am zu diesem Zeitpunkt erreichten, hohen Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_A(N)$ , der die Abreinigungswirkung sukzessive verringert, bis schließlich der gesamte anfiltrierte Staubkuchen auch nach der Abreinigung haften bleibt (siehe Abschnitt 10.2.2.3). Bei praktisch unwirksamer Abreinigung kann in weiterer Folge nicht mehr von Abreinigungsfiltration gesprochen werden. Der Druckverlust über das Prüffiltermedium erreicht rasch den maximalen, anlagenseitig vorgegebenen, Druckverlust von 35 hPa (siehe Abschnitt 6.7.1), womit der Versuch automatisch abgebrochen wird und damit beendet ist.

## 10.2.2.2 Analyse der Entwicklung des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens $\Delta p_C(N)$

Anstatt des häufig verwendeten Kuchendruckverlustes,  $\Delta p_K(N)$ , soll hier der Druckverlust des abgereinigten Kuchens,  $\Delta p_C(N)$ , näher analysiert werden (siehe Abbildung 10-15). Dies ermöglicht eine konsistente Weiterführung der in Abschnitt 10.2.2.1 formulierten Gedanken bezüglich des Einflusses von Staubmassen auf den jeweiligen Druckverlustanteil. War es der nicht abgereinigte Anteil des gesamt anfiltrierten Staubes, die Reststaubmasse, welche für die Entwicklung des Restdruckverlustes mitverantwortlich ist, so ist im Falle der Entwicklung des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$  die abgereinigte Staubmasse als wesentlich anzusehen. Der in Abbildung 10-16 abgebildete Verlauf des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$  kann mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogrammes nach in Abbildung 10-15 dargestellter schematischen Darstellung aus den während des Versuches (Abbildung 10-7) aufgezeichneten Druckverlustes des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$ über die Zyklenzahl N, so stellt man fest, dass dieser von anfänglich vergleichbar kleinen Werten anwächst, ein Maximum durchläuft und gegen Ende des Versuches wieder abnimmt.



Abbildung 10-15: Schematische Darstellung von Kuchendruckverlust  $\Delta p_K(N)$  und Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$ 

Dieser prinzipielle Verlauf wurde schon von Höflinger et al. [15] beschrieben. Der vergleichsweise geringe Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{C}(N)$  zu Beginn des Alterungsversuches ist auf einen gewissen Anteil an Tiefenfiltration zurückzuführen (siehe Abschnitt 10.2.1.1). Dem in die Tiefe vordringenden Staub steht die große innere Faseroberfläche des Filtermediums als Partikelabsetzfläche zur Verfügung, wodurch dieser Staubanteil einen vergleichsweise geringen Druckverlustanstieg hervorruft. Überdies wird der bevorzugt in den Strömungsschattenstellen eingelagerte Staub nur mehr sehr unvollständig regeneriert; die für den Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{C}(N)$  verantwortliche pro Zyklus abgereinigte Staubmasse ist demnach vergleichsweise gering.



Abbildung 10-16: Druckverlustverlauf des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$  als Funktion der Zyklenzahl

Durch die Partikelablagerungen auf der großen inneren Faseroberfläche des Filtermediums wird die Filtration im weiteren Verlauf der Alterung kontinuierlich an die Oberfläche des Filtermediums verlagert, wo eine vergleichsweise geringere Fläche zur Partikelablagerung zur Verfügung steht. Auch kann der an der Oberfläche als Staubkuchen abgelagerte Staub relativ vollständiger regeneriert werden, wodurch die Masse des abgereinigten Staubes zunimmt. Dies beides zusammen führt zu einem Ansteigen des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{\rm C}({\rm N})$ . Der Beitrag der steigenden abgereinigten Staubmasse zum steigenden Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{\rm C}(N)$  ist allerdings nur bis ca. Zyklus 50 geltend zu machen. Nach Abbildung 10-13 verläuft ab ca. Zyklus 50 der Anstieg der gesamt am und im Filtermedium haftenden Staubmasse linear. Dies bedeutet, dass der Staubmassenzuwachs pro Zyklus konstant ist. Bei einer mit dem Rohgas pro Zyklus konstant zugeführten Staubmasse muss demnach auch die abgereinigte Staubmasse pro Zyklus konstant sein. Dass der Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{\rm C}(N)$  nach dem 50. Zyklus weiter anwächst, ist demnach nicht auf eine steigende abgereinigte Staubmasse pro Zyklus zurückzuführen, sondern auf den oben diskutierten Mechanismus des Inneren Patchy Cleaning (Abschnitt 10.2.1.2) und dessen sich mit der Zyklenzahl ändernden Ausprägung. In Abbildung 10-17 sind die Druckverlustverläufe dreier Zyklen zu unterschiedlichen Versuchszeitpunkten bei Vorhandensein von Innerem Patchy Cleaning dargestellt. Das intrazyklische Abflachen des Druckverlustanstieges, welches auf das Eintreten der Kuchenfiltration hinweist, beginnt dabei zu unterschiedlichen Zykluszeiten und beeinflusst somit den Druckverlustanstieg innerhalb des Zyklus und damit den Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{\rm C}(N)$ . Nach der anfänglichen Tiefenfiltration haben sich bevorzugte Strömungskanäle gebildet (Abschnitt 10.2.1.2), welche im Verlauf des Zyklus mit Staub aufgefüllt werden, wodurch eine Strömungsvergleichmäßigung erreicht wird und der Druckverlustverlauf innerhalb eines Zyklus abflacht. Bei Zyklus 50 (Abbildung 10-17, oben) sind die bevorzugten Strömungskanäle noch in ihrer Ausbildung begriffen. Bei Zyklus 150 (Abbildung 10-17, Mitte), dem Zeitpunkt des maximalen Druckverlustes des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{C}(N)$ , sind die Strömungskanäle voll ausgebildet. Das Auffüllen der Strömungskanäle dauert hier am längsten, wodurch die Kuchenfiltrationsphase vergleichsweise kurz ausfällt und der Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{\rm C}(N)$  maximal wird. Der Grund für das vergleichsweise frühere Abflachen des Druckverlustverlaufes innerhalb eines Zyklus bei höherer Zyklenzahl (Abbildung 10-17, unten) lässt sich durch die Verengung der bevorzugten Strömungskanäle erklären. Durch Staubeinlagerungen, die selbst nach der Abreinigung haften bleiben, verengen sich die Strömungskanäle mit fortschreitender Zyklenzahl. Je enger die Strömungskanäle zu Beginn des Zyklus sind, desto rascher können diese mit Staub aufgefüllt, oder durch Brückenbildung blockiert werden.

Dies bedeutet nichts anderes als eine rasche Egalisierung von lokal erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten zugunsten einer homogenen Anströmung des Filtermediums und damit einem abflachenden Druckverlustverlauf innerhalb eines Zyklus. Als Resultat verringert sich



Abbildung 10-17: Druckverlustverlauf ausgewählter Zyklen bei unterschiedlichen Ausprägungen des Inneren Patchy Cleaning; oben: Zyklus 50, Mitte: Zyklus 150, unten: Zyklus 185

der Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{\rm C}({\rm N})$  nach Durchlaufen eines Maximums (vergl. Abbildung 10-17 Mitte und unten). Das in Abbildung 10-16 gezeigte Durchlaufen eines Maximums des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{\rm C}(N)$  kann demnach mit der Verengung der bevorzugten Strömungskanäle mit steigender Zyklenzahl und deren dadurch beschleunigtes Blockieren, welches eine schnellere intrazyklische Vergleichmäßigung der Anströmung zur Folge (Kuchenfiltration) hat, erklärt werden. Dies hat eine Verringerung des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{\rm C}({\rm N})$  zur Folge, wie in Abbildung 10-17 dargestellt ist. Betreffend die Partikelabsetzfläche welche zu jedem Zykluszeitpunkt verfügbar ist, kann festgehalten werden, dass diese vergleichsweise gering ist, wenn die bevorzugten Strömungskanäle noch offen sind. Durch deren Blockieren innerhalb des Zyklus kommt es zu einem Strömungswiderstandsausgleich über die Filterfläche, wodurch nun auch wieder Bereiche stärker durchströmt werden, die bei offenen Strömungskanälen fast nicht durchströmt worden sind und damit die Partikelabsetzfläche steigt. Über die gesamte Zykluszeit gesehen steht im Mittel im Falle des Cleaning Inneren Patchy demnach eine vergleichsweise größere mittlere Fläche für die Durchströmung und damit die Partikelablagerung zur Verfügung, je größer der Anteil der Kuchenfiltration an der gesamten Zykluszeit ist.

### 10.2.2.3 Analyse der Entwicklung des Abreinigungsdruckverlustes Δp<sub>A</sub>(N) unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der zeitlich hochaufgelösten Druckverlustmessung

Nach Abbildung 10-15 setzt sich der Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_A(N)$  additiv aus dem Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$  und dem Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$  zusammen. Der grundsätzliche Verlauf des Abreinigungsdruckverlustes ist damit mit den oben diskutierten Entwicklungen des Restdruckverlustes und des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens umfassend behandelt. Hier soll im Speziellen auf die letzte Phase des betrachteten eingegangen werden, Alterungsversuches in der bei Erreichen des maximalen Abreinigungsdruckverlustes  $\Delta p_{A,max}$  ein extremer Druckverlustanstieg eingeleitet wird (Abbildung 10-18). Dieser führt rasch zum Erreichen des anlagenseitig vorgegebenen maximalen Druckverlustes von 35 hPa bei dem der Versuch abgebrochen wird. Höflinger et al. führen diesen extremen Druckverlustanstieg auf den gemeinsam mit [15] dem Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_A(N)$  stetig anwachsenden Unterdruck auf der Reingasseite zurück, welcher den konstant gehaltenen Abreinigungsdruckstoß (Ventilöffnungszeit und Tankdruck werden konstant gehalten) immer weiter dämpft. Bei Erreichen des maximalen Abreinigungsdruckverlustes  $\Delta p_{A,max}$  reicht das reingasseitig eingeblasene Druckstoßvolumen nicht mehr aus um den Kuchen zu entfernen, wodurch der Druckverlust extrem ansteigt und die Abreinigungsfiltration als beendet angesehen werden kann.



Abbildung 10-18: Verlauf des Abreinigungsdruckverlustes  $\Delta p_A(N)$  über die Zyklenzahl

Eine Analyse des zeitlichen Druckverlustverlaufes über das Prüffiltermedium während der Abreinigung, durchgeführt mit Hilfe einer zeitlich hochauflösenden Druckmessung, hilft bei der Erklärung des ausbleibenden Abreinigungserfolges bei Erreichen eines maximalen Abreinigungsdruckverlustes  $\Delta p_{A,max}$ . Abbildung 10-19 zeigt die zeitlichen Druckverluste

während der Abreinigung bei verschiedenen Filtrationszyklen. Bei Zyklus 60 liegt zu Beginn der Einleitung des Abreinigungsdruckluftstoßes ein Abreinigungsdruck  $\Delta p_A \approx 9 \text{ hPa}$  an. Bei diesem Abreinigungsdruck und den gewählten Abreinigungsparametern (Tankdruck: 5 MPa, Ventilöffnungszeit: 60 ms) reicht der Druckluftstoß aus um für eine, verglichen mit dem Filtrationsbetrieb. Umkehr der Druckverhältnisse zu sorgen (Nulldurchgang der Druckverlustkurve Zyklus 60). Somit erfolgt eine Strömungsumkehr; das Prüffiltermedium wird beschleunigt und wieder abgebremst, wodurch der im vorangegangenen Zyklus anfiltrierte Staubkuchen vergleichsweise vollständig abgeworfen werden kann. Beim maximalen Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_{A.max} \approx 17$  hPa (Zyklus 195) erreicht die während der Abreinigung aufgenommene Druckverlustkurve gerade noch den Nulldurchgang. Die Strömungsumkehr und Beschleunigung des Filtermediums sind soweit reduziert, dass nicht mehr genügen Kräfte aufgebracht werden können, um den Staubkuchen zufriedenstellend abzureinigen. Bei noch höheren Abreinigungsdrücken  $\Delta p_A \approx 29$  hPa (Zyklus 204) ist man vom Nulldurchgang weit entfernt und der Staubkuchen bleibt gänzlich am Filtermedium haften. Es sei an dieser Stelle festgehalten, dass ab Erreichen des maximalen Abreinigungsdruckverlustes ApA,max keine Abreinigungsfiltration in dem Sinne, dass ein überwiegender Teil des Staubkuchens abgeworfen wird, mehr gegeben ist.



Abbildung 10-19: Zeitlicher Druckverlustverlauf während der Abreinigung repräsentativ gewählter Zyklen (Tankdruck: 5 MPa, Ventilöffnungszeit: 60 ms)

## 10.3 Analyse des Einflusses des Filtermediums auf die Filtrationsmechanismen

In diesem Abschnitt soll erläutert werden welchen Einfluss Filtermedien mit unterschiedlicher Oberflächenstruktur auf die bei der zeitgesteuerten Alterung auftretenden Filtrationsmechanismen besitzen.

Im Rahmen der gegenständlichen Arbeit wurden zwei typisch industriell eingesetzte Filtermedien für die Versuche zur Aufklärung der Filtrationsmechanismen verwendet. Dabei wurden ein Filtermedium mit vergleichsweise poröser Oberflächenstruktur (PI - Nadelfilzfiltermedium) und ein Filtermedium mit glatter, wenig poröser Oberfläche (Membranfiltermedium) gewählt.

In Abbildung 10-20 ist die Entwicklung des Druckverlustes über das Prüffiltermedium und des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$  über die Zyklenzahl N bei einem PI - Nadelfilzfiltermedium abgebildet. Diese Druckverlustverläufe wurden bereits in Abschnitt 10.2.2 ausführlich auf die daraus ableitbaren Filtrationsmechanismen hin untersucht.

| Filtermedium:               | PI - Nadelfilzfiltermedium         |
|-----------------------------|------------------------------------|
| Teststaub:                  | Pural NF ( $d_{50,3} = 8,6\mu m$ ) |
| Zyklusdauer:                | 100 s                              |
| Tankdruck:                  | 0,5 MPa                            |
| Ventilöffnungszeit:         | 60 ms                              |
| Rohgaskonzentration:        | 5,5 g/m <sup>3</sup>               |
| Filtrationsgeschwindigkeit: | 2,5 m/min                          |
|                             |                                    |



Abbildung 10-20: Entwicklung des Druckverlustes – PI - Nadelfilzfiltermedium

Hier soll vor allem auf die Unterschiede - die Filtrationsmechanismen betreffend - bei sonst gleichen Versuchsparametern (siehe Legenden) unter Verwendung PI eines Nadelfilzfiltermediums (Abbildung 10-20) Membranfiltermediums und eines (Abbildung 10-21) eingegangen werden. Hierfür wird wiederum von der Druckverlustentwicklung auf die Filtrationsmechanismen rückgeschlossen.

In Abbildung 10-21 (links) ist der Druckverlust über das Prüffiltermedium sowie der Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{C}(N)$  in Abhängigkeit der Zyklenzahl bei Verwendung eines Membranfiltermediums dargestellt. In Abbildung 10-21 (rechts) sind die zeitlichen Druckverlustverläufe von repräsentativ über die gesamten Versuchszyklen gewählten Einzelzyklen desselben Versuches abgebildet. Deren linearer Verlauf lässt auf eine reine Kuchenfiltration während der gesamten Versuchsdauer schließen. Dass sich die Steigungen der Druckverlustverläufe praktisch nicht ändern, bestätigt diesen Befund (vergleiche dazu die unterschiedlichen intrazyklischen Druckverlustverläufe beim PI - Nadelfilzfiltermedium in Abschnitt 10.2.1, Abbildung 10-8 bis Abbildung 10-12). Als Gründe für das Fehlen einer Tiefenfiltrationsphase zu Beginn des Versuches sei die glatte, Teflon-laminierte Oberfläche des Membranfiltermediums, welche ein Vordringen der Staubpartikeln in die Tiefe des Filtermediums erschwert, angeführt. Aufgrund der glatten, wenig porösen Oberflächenstruktur wird auch ein Ausbilden von ausgeprägtem Inneren Patchy Cleaning weitestgehend verhindert. Dass der Mechanismus des Patchy Cleaning, im Gegensatz zum PI-Nadelfilzfiltermedium ebenfalls weitestgehend ausbleibt, liegt an der homogenen Oberflächenstruktur des Membranfiltermediums und der damit während der gesamten Versuchszeit gegebenen homogenen Anströmung, sowie Abreinigung des Filtermediums.

Bezogen auf den Druckverlustverlauf über die gesamte Zyklenzahl (Abbildung 10-21, links) fällt zunächst auf, dass der Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$  im Vergleich zum PI-Nadelfilzfiltermedium (Abbildung 10-20) von Beginn an auf einem höheren Niveau liegt. Dies ist dem allgemein höheren Durchströmungswiderstand des Membranfiltermediums geschuldet, der schon einen vergleichsweise höheren Leerdruckverlust  $\Delta p_0$  des unbestaubten Filtermediums hervorruft. Der Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$  steigt in den ersten Zyklen des Alterungsversuches relativ rasch an, bevor er in einen relativ linearen Anstieg übergeht. Dieses Verhalten ist mit dem Ausbilden eines Sekundärkuchens, bestehend aus dem Feinanteil des gesamt anfiltrierten Staubes, der bevorzugt am Filtermedium haften bleibt (Abbildung 10-22) und dessen Wachstum geschuldet. Der Mechanismus des Sekundärkuchenwachstums ist dabei in Analogie zum Sekundärkuchenwachstum beim PI - Nadelfilzfiltermedium zu sehen, wird allerdings in gegenständlichem Fall vergleichsweise weniger vom Mechanismus des Inneren Patchy Cleanings überlagert, welches durch die glatte Membran an der Oberfläche des Filtermediums hintangehalten wird.



Abbildung 10-21: Entwicklung des Druckverlustes - Membranfiltermedium

Zu den bisherigen Ausführungen passt auch der Verlauf des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{C}(N)$  (Abbildung 10-21, links). Zu Beginn des Versuches bleibt vergleichsweise mehr Staub am Filtermedium haften und bildet den durch Partikelgrößenanalysen bestätigten Sekundärkuchen aus, der aus dem haften bleibenden Feinanteil des anfiltrierten Staubes besteht (Abbildung 10-22). Somit wird anfänglich ein geringerer Anteil des anfiltrierten Staubes als Kuchen abgeworfen, wodurch der Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{C}(N)$ vergleichsweise geringer ist. Wird eine konstante Staubmenge bei jeder Abreinigung abgeworfen, bleibt im Falle der hier vorherrschenden reinen Kuchenfiltration auch der Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{C}(N)$  konstant.



Abbildung 10-22: Partikelgrößenverteilung von Staubkuchen und Sekundärkuchen bei einem Membranfiltermedium

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die glattere, weniger poröse Oberfläche des Membranfiltermediums eine nahezu reine Kuchenfiltration hervorruft. Die poröse Oberfläche des PI - Nadelfilzfiltermediums hingegen sorgt für eine breite Palette an Filtrationsmechanismen von Tiefenfiltration über Inneres Patchy Cleaning bis hin zum Patchy Cleaning und der Kuchenfiltration.

## 10.4 Analyse des Einflusses des Teststaubes auf die Filtrationsmechanismen

In diesem Abschnitt soll dargelegt werden, welchen Einfluss Teststäube mit unterschiedlicher Partikelgrößenverteilung (siehe Abschnitt 6.4) auf die bei der Alterung zu beobachtenden Filtrationsmechanismen haben. Dabei wird zunächst auf das verwendete Membranfiltermedium und im Anschluss auf das PI - Nadelfilzfiltermedium, jeweils unter Verwendung der in Abschnitt 6.4 vorgestellten Teststäube, eingegangen

In Abbildung 10-23 (CaCO<sub>3</sub> - Teststaub), Abbildung 10-24 (Pural NF - Teststaub) und in Abbildung 10-25 (Pural SB - Teststaub) sind die Druckverlustverläufe über die gesamte Zyklenzahl, sowie die zeitlichen Druckverlustverläufe repräsentativ ausgewählter Zyklen des Membranfiltermediums abgebildet. In allen drei Fällen entnimmt man dem linearen Druckverlustanstieg der Einzelzyklen, dass zu jedem Versuchszeitpunkt nahezu reine Kuchenfiltration herrscht. Dies kann mit der glatten, wenig porösen Oberflächenstruktur des Membranfiltermediums erklärt werden, welche das Eindringen von Staubpartikeln in die Tiefe des Filtermediums und so die Ausbildung einer Tiefenfiltration verhindert. Die homogene Ausführung der Oberfläche begünstigt eine gleichmäßige Anströmung sowie Abreinigung des Filtermediums wodurch Inneres Patchy Cleaning und Patchy Cleaning hintangehalten werden.



Abbildung 10-23: Druckverlustverlauf über die gesamte Zyklenzahl und Einzelzyklen: Membranfiltermedium mit CaCO<sub>3</sub> -Teststaub (d<sub>50,3</sub> = 3,1µm)



Abbildung 10-24: Druckverlustverlauf über die gesamte Zyklenzahl und Einzelzyklen: Membranfiltermedium mit Pural NF - Teststaub (d<sub>50,3</sub> = 8,6µm)



Abbildung 10-25: Druckverlustverlauf über die gesamte Zyklenzahl und Einzelzyklen: Membranfiltermedium mit Pural SB - Teststaub (d<sub>50,3</sub> = 51,1µm)

Dass es bei durchgängiger, nahezu reiner Kuchenfiltration dennoch zu den in Abbildung 10-23 bis Abbildung 10-25 gezeigten unterschiedlichen Ausprägungen des Druckverlustverlaufes während der Alterung des Membranfiltermediums mit den drei verschiedenen Teststäuben kommt, kann teilweise auf die unterschiedlichen Korngrößenverteilungen der eingesetzten Teststäube zurückgeführt werden. Vergleicht die Druckverlustverläufe man aus Abbildung 10-24 (Pural NF - Teststaub) und Abbildung 10-25 (Pural SB - Teststaub) so stellt man einen rascheren Anstieg des Restdruckverlustes  $\Delta p_R(N)$ , sowie das Erreichen eines höheren maximalen Abreinigungsdruckverlustes  $\Delta p_{A,max}$  im Falle des Versuches mit Pural SB -Teststaub fest. Da in diesem Fall das Teststaubmaterial die gleiche chemische Zusammensetzung besitzt (siehe Abschnitt 6.4), kann davon ausgegangen werden, dass die unterschiedlichen Korngrößenverteilungen für die beobachteten Unterschiede im Druckverlustverhalten über die gesamte Zyklenzahl verantwortlich sind. In [23] wurde gezeigt, dass das raschere Ansteigen des Restdruckverlustes  $\Delta p_R(N)$  auf die vergleichsweise breite Partikelgrößenverteilung des grobkörnigeren Pural SB - Teststaubes zurückgeführt werden kann.

In Abbildung 10-26 ist der schematische Verlauf der Kuchenfestigkeit über die Kuchendicke eingetragen: links stellvertretend für den Pural NF - Teststaub mit der engeren Partikelgrößenverteilung, rechts stellvertretend für den Pural SB - Teststaub mit der breiteren Partikelgrößenverteilung. In beiden Fällen ist die Kuchenfestigkeit im Bereich des Sekundärkuchens am größten. Dies ist auf dessen zu kleineren Korngrößen hin verschobene,

enge Partikelgrößenverteilung zurückzuführen. Die erhöhte Anzahl an Haftstellen bildet einen stabilen Sekundärkuchenverbund aus. Im Staubkuchen, der von einer im Vergleich zum Sekundärkuchen grobkörnigeren Staubmasse gebildet wird, ist die Kuchenfestigkeit generell kleiner und nimmt aufgrund von Kompressionseffekten Richtung Staubkuchenoberfläche stetig ab. Den wesentlichen Unterschied stellen die vergleichsweise stärker ausgeprägten Schwankungen in der Kuchenfestigkeit beim grobkörnigeren Teststaub mit der breiteren Partikelgrößenverteilung dar. Diese vergleichsweise stärker ausgeprägten Schwankungen erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass die bei der Abreinigung durch die Beschleunigung des Filtermediums in den Kuchen eingebrachte Zugspannung die Kuchenfestigkeit vergleichsweise weit entfernt von der Filtermediumsoberfläche des Filtermediums abgereinigt; ein größerer Anteil des Staubkuchens pro Zyklus bleibt haften und lässt den Sekundärkuchen stärker wachsen, wodurch der raschere Restdruckverlustanstieg im Fall des grobkörnigeren Pural SB - Teststaubes im Vergleich zum Pural NF - Teststaub beim Membranfiltermedium (vergl. Abbildung 10-24 und Abbildung 10-25) erklärt werden kann.



Abbildung 10-26: Schematische Darstellung der Kuchenfestigkeit und Zugspannung über die Kuchendicke bei der Abreinigung für Teststäube mit unterschiedlicher Partikelgrößenverteilung; links feinkörniger Teststaub mit enger Partikelgrößenverteilung, rechts grobkörniger Teststaub mit breiter Partikelgrößenverteilung (nach [23])

In [23] wird das im Mittel gröbere Korn des Pural SB - Teststaubes verglichen mit dem Pural NF - Teststaub als ursächlich für den im Fall des Pural SB - Teststaubes erreichten höheren maximalen Abreinigungsdruckverlust angegeben. Demnach ist die Kuchenfestigkeit eines aus vergleichsweise gröberen Partikeln aufgebauten Staubkuchens generell geringer. Bei der Abreinigung muss der Druckluftstoß zunächst den mit dem Abreinigungsdruckverlust wachsenden Unterdruck auf der Reingasseite ausgleichen. Der "Rest" des Druckluftstoßes steht zur Beschleunigung und Rückströmung durch das Filtermedium zur Verfügung, wodurch eine gewisse Zugspannung in den Staubkuchen induziert wird. Erreicht der Wert der Zugspannung innerhalb des Staubkuchens den Wert der Kuchenfestigkeit, wird der Staubkuchen an dieser

Stelle abgeworfen. Da nun die Kuchenfestigkeit beim Pural SB - Teststaub als Konsequenz der vergleichsweise gröberen Partikeln kleiner ist als beim Pural NF - Teststaub, wird der aus Pural SB - Teststaub aufgebaute Staubkuchen bei kleineren Werten der durch die Abreinigung induzierten Zugspannung abgeworfen werden. Bei den gegenständlich konstant gehaltenen Abreinigungsparametern, Tankdruck und Ventilöffnungszeit, kann so beim Pural SB – Teststaub ein vergleichsweise größerer Anteil des Druckluftstoßes zum Ausgleich eines größeren Unterdrucks auf der Reingasseite verwendet werden. Da der Unterdruck auf der Reingasseite direkt mit der Höhe des Abreinigungsdruckverlustes verknüpft ist, bedeutet dies nichts anderes, als dass die geringere Kuchenfestigkeit des gröberen Teststaubes höhere Werte für den maximalen Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_{A,max}$  ermöglicht.

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass der Pural SB - Teststaub aufgrund seiner höheren mittleren Korngröße eine geringere Kuchenfestigkeit aufweist und daher (bei identem Tankdruck und Ventilöffnungszeit) höhere Werte des maximalen Abreinigungsdruckverlustes  $\Delta p_{A,max}$  erreicht werden können. Die vergleichsweise breitere Partikelgrößenverteilung des Pural SB – Teststaubes führt zu stärker ausgeprägten Schwankungen in der Kuchenfestigkeit über die Kuchenschichtdicke, wodurch die Wahrscheinlichkeit steigt, dass der Egalisierungspunkt zwischen Kuchenfestigkeit und durch die Abreinigung induzierter Zugspannung weiter weg von der Oberfläche des Filtermediums liegt. Dies ruft eine vergleichsweise unvollständigere Abreinigung des Staubkuchens hervor, wodurch der Restdruckverlustanstieg beim Staub mit der breiteren Partikelgrößenverteilung stärker ausfällt.

Diese Betrachtungen können nicht ohne weiteres auf den im Rahmen dieser Arbeit mit einbezogenen CaCO<sub>3</sub> - Teststaub ausgeweitet werden, da man davon ausgehen muss, dass dessen von den Pural - Teststäuben verschiedene chemische Zusammensetzung, neben der Partikelgrößenverteilung, ebenfalls einen Einfluss auf die Druckverlustentwicklung über die gesamte Zyklenzahl gesehen hat.

Betrachtet man den Einfluss der verschiedenen Teststäube auf die Alterung bei dem PI-Nadelfilzfiltermedium, stellt man fest, dass die grundlegenden Filtrationsmechanismen sowie deren Abfolge bei Verwendung von CaCO<sub>3</sub> - Teststaub und Pural NF - Teststaub ident sind. Einer Tiefenfiltrationsphase, gekennzeichnet durch die geringen intrazyklischen Druckverlustanstiege (Darstellung der Einzelzyklen rechts in Abbildung 10-27 und Abbildung 10-28) folgt eine Phase, in der der Mechanismus des Inneren Patchy Cleaning dominiert, wie schon in Abschnitt 10.2.1.2 beschrieben wurde. Ganz am Ende der Alterungsversuche ist noch Kuchenfiltration zu beobachten, welche sich durch einen rein linearen Druckverlustanstieg in den Einzelzyklen äußert.



Abbildung 10-27: Druckverlustverlauf über die gesamte Zyklenzahl und Einzelzyklen: PI - Nadelfilzfiltermedium mit CaCO<sub>3</sub> – Teststaub (d<sub>50,3</sub> = 3,1μm)

Während beim Membranfiltermedium, bei sonst gleichen Versuchsparametern, mehr Zyklen bis zur vollständigen Verstopfung des Filtermediums bei der Verwendung von CaCO<sub>3</sub> - Teststaub im Vergleich zur Verwendung von Pural NF - Teststaub erreicht werden, verhält sich dies beim PI-Nadelfilzfiltermedium konträr. Erklären lässt sich dies mit der, durch seine enge Partikelgrößenverteilung hervorgerufenen, starken Agglomerationsneigung des sehr feinkörnigen, klebrigen CaCO<sub>3</sub> - Teststaubes. Bei einer glatten Oberfläche des Filtermediums, wie dies beim Membranfiltermedium der Fall ist, sorgen die interpartikulären Kräfte für einen kompakten Staubkuchen, der vergleichsweise wenig an der glatten Filtermediumsoberfläche haftet und so relativ vollständig abgereinigt werden kann. Dagegen bietet die raue, poröse Oberfläche des Nadelfilzfiltermediums dem aus CaCO3 - Teststaub bestehenden Staubkuchen wesentlich mehr Ankerpunkte, wodurch die Regenerierung des Filtermediums erschwert wird. Der CaCO<sub>3</sub> - Staubkuchen haftet stärker an der rauen Oberfläche des PI -Nadelfilzfiltermediums als dies beim Pural NF - Staubkuchen der Fall ist. Daher verliert die Abreinigung bei Verwendung des CaCO<sub>3</sub> - Teststaubes bereits bei vergleichsweise niedrigeren Abreinigungsdrücken ihre Wirksamkeit, wodurch das PI-Nadelfilzfiltermedium rascher verstopft als bei Verwendung des Pural NF - Teststaubes (siehe Abbildung 10-20).



Abbildung 10-28: Druckverlustverlauf über die gesamte Zyklenzahl und Einzelzyklen: PI - Nadelfilzfiltermedium mit Pural NF – Teststaub (d<sub>50,3</sub> = 8,6μm)

Ein gänzlich anderes Druckverlustverhalten zeigt sich bei der Kombination aus Pural SB -Teststaub und PI - Nadelfilzfiltermedium. Durch den wenig agglomerierenden, frei fließenden Staub wird die Brückenbildung an der Oberfläche des relativ grobporigen Nadelfilzes erschwert, wodurch der Mechanismus der Tiefenfiltration bevorzugt wird. Erkennbar ist dies am anfänglich flachen Druckverlustverlauf (Abbildung 10-29 links) und in der geringen Steigung des Druckverlustes innerhalb der Einzelzyklen (Abbildung 10-29 rechts, Zyklenzahl 5 und 50).



Abbildung 10-29: Druckverlustverlauf über die gesamte Zyklenzahl und Einzelzyklen: PI - Nadelfilzfiltermedium mit Pural SB - Teststaub (d<sub>50,3</sub> = 51,1µm)

Trotz des anfänglich durch die Tiefenfiltration hervorgerufenen vergleichsweise geringen Restund Abreinigungsdruckverlustes, führt dieser Prozess zu einem rascheren gänzlichen Verstopfen des PI – Nadelfilzfiltermediums, als dies bei dem Pural NF - Teststaub der Fall ist. Durch die mit der Tiefenfiltration einhergehende verstärkte Staubeinlagerung im Filtermedium wird dieses mit Staub aufgefüllt. Dabei wird der Staub zunächst bevorzugt in die Strömungsschattenstellen des Faserverbundes des Nadelfilzes eingelagert, wodurch der Restdruckverlustanstieg gering bleibt. Bei Zyklenzahl 110 (Abbildung 10-29, rechts) zeigt sich bereits ein insgesamt steilerer, im Verlaufe des Zyklus leicht abflachender, Druckverlustverlauf innerhalb des Zyklus, was auf eine Vergleichmäßigung der Anströmung innerhalb des Zyklus hinweist. Das vergleichsweise rasche gänzliche Verstopfen des PI - Nadelfilzfiltermediums in Kombination mit dem Pural SB - Teststaub ist auf dessen frei fließendes Verhalten zurückzuführen. Das Filtermedium wird dabei sprichwörtlich mit Staub aufgefüllt: die nach dem gänzlichen Verstopfen des Filtermediums festgestellte Reststaubmasse ist beim PI -Nadelfilzfiltermedium mit Pural SB als Teststaub verglichen mit Pural NF als Teststaub in etwa dreimal so hoch [23].

# 10.5 Analyse des Einflusses verschiedener Betriebsparameter auf die Filtrationsmechanismen

In diesem Abschnitt soll geklärt werden, ob die Betriebsparamter Filtrationsgeschwindigkeit sowie Tankdruck und Ventilöffnungszeit Einfluss auf die Filtrationsmechanismen während der Alterung ausüben.

#### 10.5.1 Variation der Filtrationsgeschwindigkeit

Im Rahmen dieser Arbeit wurden mit den zwei in Abschnitt 6.6 beschriebenen industriell typisch eingesetzten Filtermedien und den in Abschnitt 6.4 beschriebenen Teststäuben mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung zeitgesteuerte Alterungsversuche bei Filtrationsgeschwindigkeiten im Bereich von 1,8 bis 3,0 m/min durchgeführt, um einen eventuellen Einfluss auf die Filtrationsmechanismen aufklären zu können. Der Bereich der Filtrationsgeschwindigkeit wurde dabei an die Prüfvorschriften der DIN-ISO 11057 Richtline [9] angelehnt gewählt. In Tabelle 9 für das PI - Nadelfilzfiltermedium und Tabelle 10 für das Membranfiltermedium sind die durchgeführten Versuche aufgelistet. Die Druckverlustverläufe der hier tabellarisch aufgelisteten Versuche sind im Anhang zu finden (Abbildung 16-4 bis Abbildung 16-9).

| Filtrations-<br>geschwindigkeit<br>[m/min] | CaCO <sub>3</sub> | Pural NF | Pural SB |
|--|-------------------|----------|----------|
| Teststaub                                  |                   |          |          |
| 1,8  | Х                 | -        | -        |
| 1,9  | -                 | Х        | Х        |
| 2,0  | Х                 | Х        | Х        |
| 2,1  | -                 | -        |          |
| 2,2  | Х                 | Х        | Х        |
| 2,3  | -                 | Х        |          |
| 2,4  | Х                 | Х        | Х        |
| 2,5  | -                 | Х        |          |
| 2,6  | Х                 | Х        | Х        |
| 2,7  | -                 | Х        |          |
| 2,8  | Х                 | Х        | Х        |
| 2,9  | -                 | -        | -        |
| 3.0  | Х                 | -        | Х        |

| Tabelle 9: Durchgeführte Versuche (X) mit PI - Nadelfilzfiltermedium; Versuchsparameter: 100s Zykluszeit; 0,5MI |
|---|
| Tankdruck; 60ms Ventilöffnungszeit; 5,5g/m <sup>3</sup> Rohgaskonzentration                                     |

 Tabelle 10: Durchgeführte Versuche (X) mit Membranfiltermedium; Versuchsparameter: 100s Zykluszeit; 0,4 bzw. 0,5MPa

 Tankdruck; 60ms Ventilöffnungszeit; 5,5g/m³ Rohgaskonzentration

| Filtrations-<br>geschwindigkeit<br>[m/min]<br>Teststaub | CaCO <sub>3</sub> | Pural NF | Pural SB |
|---|-------------------|----------|----------|
| 2,0   | -                 | -        | Х        |
| 2,1   | -                 | Х        | Х        |
| 2,2   | Х                 | Х        | Х        |
| 2,3   | -                 | Х        | Х        |
| 2,4   | Х                 | Х        | Х        |
| 2,5   | -                 | Х        | Х        |
| 2,6   | Х                 | Х        | Х        |
| 2,7   | -                 | Х        | Х        |
| 2,8   | Х                 | Х        | -        |
| 2,9   | -                 | -        | -        |
| 3,0   | Х                 | -        | Х        |

Die Auswertung dieser Versuche hat ergeben, dass die Filtrationsgeschwindigkeit im betrachteten Rahmen keinen Einfluss auf die grundlegenden Filtrationsmechanismen bei der Alterung besitzt. Lediglich der Zeitpunkt der vollständigen Filtermediumsverstopfung (Alterungskennwert nach [15]) hängt stark von der Filtrationsgeschwindigkeit ab. Der Zusammenhang des Alterungskennwertes von der Filtrationsgeschwindigkeit ist für die oben tabellarisch angeführten Versuche in Abbildung 10-30 dargestellt. Das generell raschere vollständige Verstopfen bei höheren Filtrationsgeschwindigkeiten ist dabei auf ein schnelleres Erreichen des maximalen Abreinigungsdruckverlustes (siehe auch Abschnitt 10.2.2.3) zurückzuführen.



Abbildung 10-30: Alterungskennwert als Funktion der Filtrationsgeschwindigkeit für verschiedene Teststaub/Filtermedium - Kombinationen

## 10.5.2 Variation des Tankdruckes und der Ventilöffnungszeit (zeitgesteuerte Abreinigungsfiltration)

Um einen eventuellen Einfluss der Abreinigungsbedingungen auf die bei der Alterung auftretenden Filtrationsmechanismen zu ergründen, wurden Versuche mit zeitgesteuerter Abreinigung bei verschiedenen Tankdrücken und Ventilöffnungszeiten durchgeführt. Tabelle 11 gibt einen Überblick über die bei den durchgeführten Versuchen erreichten maximalen Abreinigungsdruckverluste  $\Delta p_{A,max}$  bei Tankdrücken von 1 bis 6 MPa und Ventilöffnungszeiten von 10 bis 150 ms. Die Variation wurde dabei ausgehend von den in der DIN-ISO 11057 [9] vorgegebenen Werten für den Tankdruck (0,5 MPa) und die Ventilöffnungszeit (60 ms) für die Alterung vorgenommen. Beim Versuch mit 1 bar Tankdruck und 150 ms Ventilöffnungszeit war praktisch keine abreinigende Wirkung des Druckluftstoßes zu beobachten. Da bei den Versuchen mit noch geringerer Ventilöffnungszeit keine abreinigende Wirkung mehr zu erwarten ist, wurden diese nicht durchgeführt. Beim Versuch mit 6 bar Tankdruck und 10 ms Ventilöffnungszeit konnte keine abreinigende Wirkung des Druckluftstoßes beobachtet werden. Daher wurde auf die Versuche bei noch geringerem Tankdruck verzichtet. Die Druckverlustverläufe der Einzelversuche sind dem Anhang zu entnehmen (siehe Abbildung 16-10 bis Abbildung 16-26).

| Tabelle 11: Übersicht über den maximalen Abreinigungsdruckverlust ∆pA,max in hPa bei Variation des Tankdruckes und  |
|---|
| der Ventilöffnungszeit; Versuchsparameter: 100s Zykluszeit, 5,5g/m³ Rohgaskonzentration, Pural NF - Teststaub, PI - |
| Nadelfilzfiltermedium   |

| Tankdruck [bar]         |    |    |     |     |
|-------------------------|----|----|-----|-----|
| Ventil-<br>öffnungszeit | 10 | 60 | 100 | 150 |
| 1                       | -  | -  | -   | 4   |
| 2                       | -  | 5  | 8   | 12  |
| 3                       | -  | 10 | 15  | 18  |
| 4                       | -  | 15 | 17  | 24  |
| 5                       | -  | 17 | 22  | 32  |
| 6                       | 0  | 18 | 26  | 38  |

Die grundlegenden Filtrationsmechanismen ändern sich analog zur Variation der Filtrationsgeschwindigkeit (siehe Abschnitt 10.5.1), bei der hier vorgenommenen Variation der Abreinigungsparamter Ventilöffnungszeit und Tankdruck nicht. Die Variation der Abreinigungsbedingungen wirkt sich dabei lediglich auf den Wert des maximalen Abreinigungsdruckverlustes  $\Delta p_{A,max}$  aus, welcher bei der jeweiligen Kombination aus Tankdruck und Ventilöffnungszeit erreicht werden kann. Während unter einem gewissen Tankdruck (1-2 bar) und unter einer gewissen Ventilöffnungszeit (10-60 ms) keine abreinigende Wirkung erzielt wird, bringt eine darüber hinausgehende Steigerung der Werte dieser Paramter eine Erhöhung des maximalen Abreinigungsdruckes  $\Delta p_{A,max}$  mit sich. Abbildung 10-31 zeigt die Abhängigkeit des maximalen Abreinigungsdruckes  $\Delta p_{A,max}$  vom Tankdruck und der Ventilöffnungszeit eines PI - Nadelfilzfiltermediums mit Pural NF - Teststaub. Die laut Tabelle 11 fehlenden Versuchswerte bei Tankdrücken kleiner 6 bar in Kombination mit einer Ventilöffnungszeit von 10 ms und Ventilöffnungszeiten kleiner 150 ms bei einem Tankdruck von 1 bar werden in Abbildung 10-31 mit dem Wert "0" dargestellt. Je höher die Werte des Tankdruckes bzw. der Ventilöffnungszeit sind, desto größer kann der mit dem Abreinigungsdruck gekoppelte reingasseitige Unterdruck sein, welcher bei gleichzeitiger Abreinigung des Staubkuchens gerade noch ausgeglichen werden kann. Dies erklärt den in Abbildung 10-31 dargestellten Zusammenhang wonach der maximale Abreinigungsdruckverlust mit steigendem Tankdruck bzw. Ventilöffnungszeit ebenfalls ansteigt.



Abbildung 10-31: Maximaler Abreinigungsdruck ( $\Delta p_{A,max}$ ) in Abhängigkeit vom Tankdruck; Scharparameter ist die Ventilöffnungszeit

Der maximale Abreinigungsdruck  $\Delta p_{A,max}$  kann als direkt proportional zur auf die jeweilige Filtermediumfläche wirkenden Abreinigungsintensität angesehen werden. Bei dem gegenständlich verwendeten Prüffiltermedium in der Alterungskammer (siehe Abschnitt 6) mit einer Anströmfläche von ca. 0,0177 m² kann von einer homogenen Abreinigungsintensität und damit einem einheitlichen maximalen Abreinigungsdruck  $\Delta p_{A,max}$  über die gesamte angeströmte Filtermediumfläche ausgegangen werden. Dies erklärt auch den plötzlichen Druckverlustanstieg über das Prüffiltermedium wenn der maximale Abreinigungsdruck ApA,max bei zeitgesteuerter Abreinigung erreicht wird. Bei einem industriell eingesetzten, mehrere Meter langen, Schlauchfiltermedium gibt es Filtermediumflächen die bei konstantem Tankdruck und konstanter Ventilöffnungszeit eine höhere Abreinigungsintensität erfahren, beispielsweise Flächen nahe der Pulse-Jet Düse, und Filtermediumflächen die eine geringere Abreinigungsintensität erfahren, beispielsweise weiter entfernt von der Pulse-Jet Düse. Analog zu den unterschiedlichen Abreinigungsintensitäten, besitzen diese Filtermediumflächen auch unterschiedliche maximale Abreinigungsdrücke ApA,max in Abhängigkeit der Entfernung von der Pulse-Jet Düse bei dessen Erreichen sie verstopfen. Das Verstopfen eines mehrere Meter langen Schlauches erfolgt demnach nicht plötzlich, sondern kontinuierlich angefangen bei den Flächen mit der geringsten Abreinigungsintensität bzw. dem geringsten maximalen Abreinigungsdruckverlust. Eine Versuchsreihe in der Alterungskammer mit unterschiedlichen Tankdrücken und damit verknüpften Abreinigungsintensitäten kann demnach als Simulation der Abreinigungssituation einzelner Bereiche eines Schlauchfilters mit verschiedenen Abreinigungsintensitäten angesehen werden. In weiterer Folge könnte die in der Alterungskammer festgestellte Abhängigkeit des maximalen Abreinigungsdrucks ApA,max vom Tankdruck als Verstopfungskennlinie eines Schlauchfilters herangezogen werden.

# 10.6 Interpretation der Versuchsergebnisse hinsichtlich der Aufklärung der Filtrationsmechanismen bei druckgesteuerter Filtration

Analog zum vorangegangenen Abschnitt 10.2 soll der Druckverlustverlauf, diesmal bei druckgesteuerter Filtration, detailliert untersucht werden, um so auf die dabei auftretenden Filtrationsmechanismen rückschließen zu können.

Abbildung 10-32 (links) zeigt einen typischen Druckverlustverlauf über der Zyklenzahl bei druckgesteuerter Abreinigung. Das leichte Überschreiten des vorgegebenen Abreiningungsdruckes ( $\Delta p_A = 10$  hPa) ist dem System zur Druckverlustmessung geschuldet, welches den Druckverlust über das Prüffiltermedium nicht kontinuierlich, sondern zu diskreten Zeitpunkten (3 s Intervall), erfasst und aufzeichnet. Der Restdruckverlust  $\Delta p_{R}(N)$  nimmt aufgrund der unvollständigen Abreinigung mit steigender Zyklenzahl N stetig zu, wohingegen die Zyklusdauer t<sub>Z</sub>(N) stetig abnimmt. In Abbildung 10-32 (rechts) ist überdies ein intrazyklischer Druckverlustverlauf dargestellt. Vom Restdruckverlust  $\Delta p_{R}(N)$  ausgehend, nimmt der Druckverlust über das Prüffiltermedium während der Filtrationsphase um den Kuchendruckverlust  $\Delta p_K(N+1)$  zu und fällt durch die Abreinigung bei Erreichen des Abreinigungsdruckverlustes ApA um den Betrag des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{\rm C}({\rm N+1})$  auf den Restdruckverlust  $\Delta p_{\rm R}({\rm N+1})$  ab.



Abbildung 10-32: Druckverlustverlauf bei druckgesteuerter Filtration, links Gesamtansicht, rechts Detail

Betrachtet man den Druckverlustverlauf einzelner Zyklen, so stellt man die gleichen Filtrationsmechanismen wie bei zeitgesteuerter Alterung fest. Von der anfänglichen Tiefenfiltration (Abbildung 10-33, links), über das ebenfalls schon beschriebene (Innere) Patchy Cleaning (Abbildung 10-33, Mitte) bis hin zur Kuchenfiltration (Abbildung 10-33, rechts) treten alle schon bei zeitgesteuerter Alterung festgestellten Filtrationsmechanismen auch bei



Abbildung 10-33: Zeitlicher Druckverlustverlauf ausgewählter Zyklen – links: Tiefenfiltration, Mitte: (Inneres) Patchy Cleaning, rechts: Kuchenfiltration

druckgesteuerter Filtration auf. Die in Abschnitt 10.2.2.2 beschriebene Vergleichmäßigung der Anströmung innerhalb eines Zyklus, welche sich durch einen vermehrt linear verlaufenden Druckverlustanstieg innerhalb eines Zyklus bemerkbar macht, stellt man auch bei druckgesteuerter Filtration fest. In Abbildung 10-33 (Mitte) ist zu Beginn des vergleichsweise Zyklus noch ein steiler Druckverlustanstieg festzustellen, welcher auf die in Abschnitt 10.2.2.2 beschriebene Ausbildung von bevorzugten Strömungskanälen zurückzuführen ist. Das folgende Abflachen des Druckverlustverlaufes innerhalb des Zyklus wird durch das temporäre Auffüllen dieser bevorzugten Strömungskanäle mit dem anfiltrierten Staub hervorgerufen, wodurch ein Widerstandsausgleich über das Filtermedium stattfindet und die Kuchenfiltrationsphase innerhalb dieses Zyklus erreicht wird. Mit Zyklenzahl zunehmender werden die bevorzugten Strömungskanäle durch dauerhafte Staubablagerungen verengt, wodurch diese innerhalb eines Zyklus rascher mit Staub aufgefüllt werden können. Über einen Zyklus gemittelt bedeutet dies eine homogenere Anströmung des Filtermediums und eine damit verbundene Reduzierung des auf die Zyklusdauer  $t_Z(N)$ bezogenen Kuchendruckverlustes  $\Delta p_{\rm K}({\rm N}),$ dem Kuchendruckverlustanstieg  $\Delta \dot{p}_{K}(N)$  (siehe dazu

auch Abschnitt 12.3.1). Abbildung 10-34 zeigt den Verlauf des Kuchendruckverlustanstieges  $\Delta \dot{p}_{K}(N)$  in Abhängigkeit der Zyklenzahl N. Zu Beginn wird die Filtration von einem gewissen Anteil Tiefenfiltration beeinflusst, der Kuchendruckverlustanstieg innerhalb eines Zyklus N ist daher gering. Mit der Verlagerung der Filtration an die Oberfläche steigt der Kuchendruckverlust innerhalb eines Zyklus rascher an. Das Wiederabsinken des Kuchendruckverlustanstieges  $\Delta \dot{p}_{K}(N)$  nach Durchlaufen eines Maximums, ist in Analogie zu dem Durchlaufen eines maximalen Druckverlustes des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{C}(N)$  im Fall der zeitgesteuerten Alterung zu sehen (siehe Abschnitt 10.2.2.2). Das jeweilige Maximum wird in beiden Fällen (zeitgesteuerte und druckgesteuerte Abreinigung) durch die Zunahme des Kuchenfiltrationsanteiles innerhalb eines Zyklus hervorgerufen (vergl. Abbildung 10-33, Mitte und rechts bei druckgesteuerte Filtration und Abbildung 10-17 bei zeitgesteuerter Alterung).



Abbildung 10-34: Auf die Zyklusdauer bezogener mittlerer Kuchendruckverlustanstieg Δp<sub>K</sub>(N) in Abhängigkeit der Zyklenzahl N

Obige Ausführungen zeigen, dass die, bei druckgesteuerter Filtration festgestellten Filtrationsmechanismen als praktisch ident zu jenen, bei zeitgesteuerter Filtration anzusehen sind.
## 10.7 Zusammenfassung der Aufklärung der Filtrationsmechanismen

Durch die detaillierte Analyse der zeitlichen Druckverlustverläufe innerhalb der einzelnen Zyklen eines beispielhaft ausgewählten Alterungsversuches wurden folgende, den Alterungsverlauf bestimmende, Filtrations- und Verstopfungsmechanismen identifiziert:

- Tiefenfiltration
- Inneres Patchy Cleaning
- Patchy Cleaning
- Kuchenfiltration
- Sekundärkuchenwachstum

Die Diskussion der intrazyklischen Druckverlustverläufe hat ergeben, dass im Wesentlichen die Strömungsverhältnisse und deren Änderungen, die durch Staubablagerungen während des Zyklus hervorgerufen werden, für die Form der Druckverlustanstiege, welche die jeweiligen Filtrationsmechanismen charakterisieren, innerhalb der einzelnen Zyklen verantwortlich sind. Die zu jedem Zeitpunkt eines Zyklus herrschenden Strömungsverhältnisse sind ein Resultat der jeweiligen Widerstandsverteilung über die Fläche des Filtermediums. Flächen mit vergleichsweise geringerem Widerstand werden dabei in trivialer Weise bevorzugt durchströmt. Die Staubablagerung des von der Strömung transportierten Staubes findet dann im Wesentlichen im Bereich der jeweilig durchströmten Flächen des Filtermediums, der Partikelabsetzfläche, statt. Durch Staubablagerungen wird der vormals vergleichsweise niedrigere Widerstand von bevorzugt durchströmten Flächen erhöht und mitunter eine Vergleichmäßigung der Widerstandsverteilung über die Filterfläche erreicht, wie dies beim (Inneren) Patchy Cleaning der Fall ist. Hierdurch kann sich die Partikelabsetzfläche innerhalb eines Zyklus vergrößern. Auch die Verkleinerung der Partikelabsetzfläche innerhalb eines Zyklus ist denkbar. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn sich die Filtration von der Tiefe des Filtermediums an die Oberfläche verlagert, wobei ein Teil der hohen inneren Faserfläche des Filtermediums von Staubablagerungen blockiert wird und somit nicht mehr als Partikelabsetzfläche zur Verfügung steht. Bei reiner Kuchenfiltration herrscht eine gleichmäßige Strömungsverteilung über die Filterfläche und die Partikelabsetzfläche bleibt konstant.

Neben dem zeitlichen Druckverlustverlauf innerhalb einzelner Zyklen wurde auch die Entwicklung des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{C}(N)$ , des Restdruckverlustes  $\Delta p_{R}(N)$  und des Abreinigungsdruckverlustes  $\Delta p_{A}(N)$  über alle Zyklen N des Versuches hinweg diskutiert. Hierbei konnte verdeutlicht werden wie die einzelnen Filtrationsmechanismen ineinander übergehen.

Für den Anstieg des Restdruckverlustes  $\Delta p_R(N)$  in Abhängigkeit der Zyklenzahl zeichnet unter anderem jene Reststaubmasse, die sich kurz nach der Abreinigung im und am Filtermedium befindet, verantwortlich. Dabei konnte durch Partikelgrößenanalysen untermauert werden, dass eine gewisse Menge Feinanteil des jeweils anfiltrierten Staubes als Sekundärkuchen am Filtermedium haften bleibt und so mitverantwortlich für den Restdruckverlustanstieg ist. Alleine die Reststaubmasse reicht jedoch nicht aus um die Entwicklung des Restdruckverlustes in Abhängigkeit der Zyklenzahl zu erklären. Entscheidend ist auch wie sich die Reststaubmasse im und am Filtermedium verteilt. Bei vorhandener Tiefenfiltration steht die große innere spezifische Partikelabsetzfläche zur Partikelablagerung zur Verfügung; ein relativ geringer Strömungswiderstand ist zu konstatieren. Hierdurch steigt der Restdruckverlust Ap<sub>R</sub>(N) selbst bei hohen Zuwachsraten an Reststaubmasse beim Vorhandensein von Tiefenfiltration vergleichsweise langsam an. Mit der dauerhaften Einlagerung von Staub in der Tiefe des Filtermediums bilden sich bevorzugte Strömungskanäle aus, die unmittelbar nach der Abreinigung des Staubkuchens frei liegen. Kurz nach der Abreinigung verteilt sich demnach der konstante Luftvolumenstrom über die relativ kleine Fläche dieser Strömungskanäle die überdies durch anhaftenden Staub noch verengt werden. Dies sorgt bei vergleichsweise geringen Zuwachsraten der Reststaubmasse für ein weiteres Steigen des Restdruckverlustes Ap<sub>R</sub>(N) mit zunehmender Zyklenzahl N.

Im Falle des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$  in Abhängigkeit der Zyklenzahl N ist einerseits die Masse des im jeweiligen Zyklus abgereinigten Staubes maßgebend, andererseits die Partikelabsetzfläche auf der sich dieser Staub im gegenständlichen Filtrationszyklus ablagert. Der Staub lagert sich dabei zu jedem Zykluszeitpunkt auf der jeweiligen zur Verfügung stehenden Partikelabsetzfläche ab. Dabei werden Flächen mit vergleichsweise geringen Strömungswiderständen zunächst bevorzugt durchströmt, bis durch abgelagerten Staub eine Widerstands- und damit Strömungsvergleichmäßigung eintritt. Die mittlere Partikelabsetzfläche die dem Staub, welcher bei der nachfolgenden Abreinigung wieder abgeworfen wird, zur Verfügung steht, ist demnach verantwortlich für den Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$  eines Zyklus N. Der Übergang des Tiefenfiltrationsmechanismus zum Mechanismus des Inneren Patchy Cleaning lässt sich beispielsweise mit einer Reduzierung der mittleren Partikelabsetzfläche eines Zyklus erklären.

Die Entwicklung des Abreinigungsdruckverlustes  $\Delta p_A(N)$  erklärt sich aus dem Zusammenspiel von Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$  und Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$ . Die ab

einem gewissen maximalen Abreinigungsdruck  $\Delta p_{A,max}$  zu einem extremen Druckverlustanstieg führende Unwirksamkeit der Abreinigung, konnte auf ein nicht Erreichen der Umkehr der Druckverlustverhältnisse bei der Abreinigung im Vergleich zum Filtrationsbetrieb zurückgeführt werden.

Auch wurde der Einfluss zweier Filtermedien mit glatter und poröser Oberfläche bei der Verwendung von Teststäuben mit unterschiedlicher Partikelgrößenverteilung und chemischer Zusammensetzung auf die dabei auftretenden Filtrationsmechanismen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die Alterung bei allen untersuchten Staub/Filtermedium - Kombinationen auf den vier oben genannten Filtrationsmechanismen basiert. Bei verschiedenen Staub/Filtermedium - Kombinationen kommen einzelne Filtrationsmechanismen bei der Alterung verstärkt vor, oder zeigen sich mitunter auch gar nicht.

Hingegen haben die Filtrationsgeschwindigkeit, Ventilöffnungszeit und Tankdruck in der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Bandbreite keinen Einfluss auf die Filtrationsmechanismen während der Alterung. Auch lässt sich der Druckverlustverlauf bei druckgesteuerter Filtration mit den Filtrationsmechanismen beschreiben die auch bei zeitgesteuerter Alterung anzutreffen sind.

# 11 MODELLIERUNG DES DRUCKVERLUSTES BEI ZEITGESTEUERTER ALTERUNG

Auf Basis der in Abschnitt 10 erarbeiteten Erkenntnisse über die Filtrationsmechanismen bei der Alterung wird in diesem Abschnitt ein neues Modell, welches im Stande ist den ganzheitlichen Druckverlustverlauf während der zeitgesteuerten Alterung zu beschreiben, vorgestellt.

Die in Abschnitt 7 durchgeführte Bestandsaufnahme zum Thema Modellierung und Simulation des Druckverlustes bei der Filtration hat gezeigt, dass sich auch moderne Ansätze auf die altbewährten Durchströmungsgesetze von Darcy, Hagen-Poiseuille und Kozeny-Carman berufen. Anleihen für die Modellierung des Druckverlustverlaufes bei der Fest/Gas-Filtration können auch von der Fest/Flüssig-Filtration genommen werden [29]-[35], da die zu Grunde liegenden Gesetzmäßigkeiten als analog anzusehen sind.

Auch konnte herausgearbeitet werden, dass es grundsätzlich zwei Arten der Herangehensweise der Modellbildung bzw. der Simulation des Filtrationsvorganges gibt. Die mikroskopische Betrachtungsweise einzelner Partikel und ihrer Bahnen erlaubt beispielsweise das detaillierte Studium des Kuchenaufbaus und der Kompressibilität des Kuchens, wodurch auch auf den Druckverlustverlauf geschlossen werden kann [58][63]-[66][69]-[79]. Der vergleichsweise große Rechenaufwand lässt diese Modellbildung auf mikroskopischer Ebene jedoch ungeeignet für die Betrachtung des ganzheitlichen Druckverlustverlaufes während der Vielzahl an Die makroskopische Betrachtungsweise der Filtration Alterungszyklen erscheinen. berücksichtigt nicht einzelne Partikeln sondern beschreibt den Filtrationsprozess und damit auch die Druckverlustentwicklung beispielsweise über einen mittleren Durchströmungswiderstand [49]-[51][56][57][59]-[62]. Für die Modellierung des Druckverlustverlaufes über eine Vielzahl an Zyklen erscheint daher die makroskopische Betrachtungsweise die geeignetere zu sein. Die oben angeführten makroskopischen Modelle sind jeweils speziell auf eine Filtrationsaufgabe abgestimmt und berücksichtigen daher nicht alle in Abschnitt 10 identifizierten, bei der Alterung auftretenden, Filtrationsmechanismen. Das in diesem Abschnitt vorgestellte neue Modell zur Beschreibung des Druckverlustverlaufes bei der zeitgesteuerten Alterung abreinigbarer Filtermedien vereint auf Basis einer makroskopischen Betrachtungsweise der Filtration alle im Rahmen dieser Arbeit als beim Alterungsprozess als wesentlich erkannten Filtrationsmechanismen.

Zunächst soll im Abschnitt 11.1 erläutert werden, welche Druckverlustanteile notwendig sind, um den Druckverlustverlauf bei der zeitgesteuerten Alterung über eine Vielzahl an Filtrationszyklen hinweg umfassend zu beschreiben. Anschließend wird das phänomenologische Konzept, auf dem die nachfolgende mathematische Beschreibung des Druckverlustverlaufes beruht, vorgestellt.

Die mathematischen Modellgleichungen basieren dabei auf einem Kuchenfiltrationsgesetz. Um die verschiedenen bei der Alterung auftretenden Filtrationsmechanismen und ihrer Druckverlustentwicklung zu beschreiben, werden diese durch Anpassen einer im Modell eingeführten variablen mittleren Partikelabsetzfläche jeweils auf eine Kuchenfiltration zurückgeführt. Die mittlere Partikelabsetzfläche ergibt sich dabei, wie in Abschnitt 11.3.2 näher ausgeführt wird, aus dem arithmetischen Mittelwert der effektiven Partikelabsetzflächen zu jedem betrachteten Zeitpunkt, welche ihrerseits auf der Strömungsgeschwindigkeitsverteilung über die gesamte Partikelabsetzfläche beruhen.

## 11.1 Modellgegenstand

In Abbildung 11-1 ist ein typischer, bei der zeitgesteuerten Alterung in Laborfilteranlagen auftretender, Druckverlustverlauf zu sehen, der durch das in dieser Arbeit erarbeitete Modell beschrieben werden soll.

Teststaub:

Zyklusdauer:

Pural NF ( $d_{50,3} = 8,6\mu m$ )

100 s



Abbildung 11-1: Typischer Druckverlustverlauf bei zeitgesteuerter Alterung in Laborfilteranlagen

Ausgehend vom Leerdruckverlust  $\Delta p_0$  des unbestaubten Filtermediums, nimmt der Druckverlust über das Filtermedium um den Betrag des Kuchendruckverlustes  $\Delta p_{K}(N=1)$  im Zuge der Anfiltration von Staub im ersten Zyklus zu (siehe auch Abbildung 11-2). Nach einer festgelegten Zykluszeit (zeitgesteuerte Abreinigung) wird der Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_A(N=1)$  des ersten Zyklus erreicht und die Druckstoßabreinigung entfernt einen Großteil des zuvor anfiltrierten Staubes, wodurch der Druckverlust über das Filtermedium um den Betrag des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{C}(N=1)$  auf den Restdruckverlust  $\Delta p_{R}(N=1)$ absinkt. Der Restdruckverlust ist nun um den Betrag des Restdruckverlustanstieges  $\Delta\Delta p_R(N=1)$ gestiegen. Demnach setzt sich der Kuchendruckverlust  $\Delta p_{K}(N)$  eines Zyklus N aus dem Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{C}(N)$ , sowie dem Restdruckverlustanstieg  $\Delta \Delta p_{R}(N)$ zusammen. Durch das fortgesetzte Anfiltrieren von Staub steigt der Druckverlust über das Filtermedium im zweiten Zyklus wieder an. Während des Alterungsprozesses steigen der Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$  und damit der Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_A(N)$  aufgrund unvollständiger Filtermediumsregeneration durch die Abreinigungen kontinuierlich an. Mit dem Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_A(N)$  steigt auch der zugehörige Unterdruck auf der Reingasseite. Nach einer gewissen Anzahl an Filtrationszyklen, abhängig von den Betriebsparametern, dem Filterprüfstand, dem jeweiligen Filtermedium und Teststaub, erreicht der Abreinigungsdruck sein Maximum ApA,max (Abbildung 11-1, siehe auch Abschnitt 10.2.2.3). Die Höhe des maximalen Abreinigungsdruckes  $\Delta p_{A,max}$  hängt dabei im Wesentlichen von den Abreinigungsparametern (Tankdruck und Ventilöffnungszeit), sowie der Geometrie des Reingasraumes ab.



Abbildung 11-2: Druckverlustverlauf bei zeitgesteuerter Alterung - schematisch

Der zum maximalen Abreinigungsdruck  $\Delta p_{A,max}$  gehörende reingasseitige Unterdruck dämpft den reingasseitig eingeblasenen Abreinigungsdruckstoß in einem so großen Ausmaß, dass der

Druckstoß seine Filtermedium-regenerierende Wirkung verliert. Somit bleibt der während des Filtrationszyklus anfiltrierte Staub weitestgehend am Filtermedium haften und der Druckverlust steigt extrem an. Hiermit wird die Alterung als beendet angesehen.

Zusammenfassend kann man für den Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_A(N)$  in Abhängigkeit der Zyklenzahl N schreiben:

$$\Delta p_A(N) = \Delta p_R(N) + \Delta p_C(N) = \Delta p_0 + \left[\sum_{N=1}^N \Delta \Delta p_R(N)\right] + \Delta p_C(N)$$
<sup>11-1</sup>

Demnach setzt sich der Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_A(N)$  aus dem Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$ und dem Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$  zusammen. Der Restdruckverlust wiederum lässt sich als Summe aus dem Leerdruckverlust des unbestaubten Filtermediums  $\Delta p_0$ und der Summe der einzelnen Restdruckverlustanstiege  $\sum_{N=1}^{N} \Delta \Delta p_R(N)$  eines jeden Zyklus bis zur Zyklenzahl N schreiben. Die Zählweise für die Zyklenzahl N beginnt mit dem ersten Zyklus (N=1).

Um den Druckverlustverlauf eines abreinigbaren Filtermediums bei der zeitgesteuerten Alterung in Laborfilteranlagen hinreichend zu beschreiben, wurden im Rahmen dieser Arbeit die Verläufe von Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$  und Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$ modelliert. Der Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_A(N)$  ergibt sich nach Gleichung 11-1 aus den beiden erstgenannten.

## 11.2 Modellierung

In diesem Abschnitt soll zunächst das grundlegende Modellkonzept vorgestellt werden. Im Anschluss wird gezeigt, in welcher Art und Weise dieses Konzept die in Abschnitt 10 als wesentlich bei der Alterung identifizierten Filtrationsmechanismen modellhaft beschreiben kann, bevor schließlich die mathematische Umsetzung dargelegt wird.

Das grundlegende Modellkonzept basiert auf einer Gleichung (11-2) zur Beschreibung der Kuchenfiltration, welche ihrerseits auf den Gesetzmäßigkeiten von Darcy beruht.

$$\Delta p(t) = \frac{\dot{V} * \eta * \alpha * m(t)}{A^2}$$
 11-2

| Δp(t)    | Druckverlust der Kuchenschicht zum Zeitpunkt t | [Pa]   |
|----------|--|--------|
| η        | Viskosität des fluiden Mediums                 | [Pa·s] |
| <b>İ</b> |  | [m³/s] |
| α        | mittlerer spezifischer Kuchenwiderstand        | [m/kg] |
| m(t)     | Kuchenmasse zum Zeitpunkt t                    | [kg]   |
| A        |  | [m²]   |

Demnach steigt der Druckverlust  $\Delta p(t)$  einer Kuchenschicht während der Filtration mit steigender Kuchenmasse m(t) und ist dabei proportional dem spezifischen Kuchenwiderstand  $\alpha$ , der Viskosität des fluiden Mediums  $\eta$  und dem durchgesetzten Volumenstrom  $\dot{V}$ . Die Fläche A, auf welcher der Kuchen, bzw. die Partikeln aus denen der Kuchen aufgebaut ist, abgelagert wird, bzw. werden, geht dabei in umgekehrter, quadratischer, Proportionalität in die Berechnung des zugehörigen Druckverlustes ein.

Für die Erarbeitung der Modellgleichungen wird von dem in Abschnitt 10.2 (Abbildung 10-7) detailliert analysierten Versuch ausgegangen. Dieser beinhaltet alle bei der Alterung als maßgebend identifizierten Filtrationsmechanismen. Lässt sich der gegenständliche Druckverlustverlauf mathematisch beschreiben, so kann davon ausgegangen werden, dass die Druckverlustverläufe alle anderen im Rahmen der gegenständlichen Arbeit untersuchten Staub/Filtermedium - Kombinationen ebenfalls mit selbigem Modell dargestellt werden können. Diese Annahme wird von der Vorstellung gestützt, dass der komplizierteste Fall, der alle Filtrationsmechanismen enthaltende Versuch aus Abschnitt 10.2, die weniger komplexen Fälle der nicht alle Filtrationsmechanismen beinhaltenden restlichen untersuchten Staub/Filtermedium - Kombinationen abdeckt.

## 11.3 Druckverlust des abgereinigten Kuchens $\Delta p_{\rm C}({\rm N})$

Der Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$  eines Zyklus N, wird nach Gleichung 11-3 von der abgereinigten Staubmasse  $m_C(N)$  verursacht, die sich auf der mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_C(N)$  verteilt und die bei der folgenden Pulse-Jet Abreinigung abgereinigt wird. Der Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$  ist nach Abbildung 11-2 ein Teil des Kuchendruckverlustes  $\Delta p_K(N)$ , der neben dem erstgenannten auch den Restdruckverlustanstieg  $\Delta \Delta p_R(N)$  beinhaltet.

$$\Delta p_C(N) = \frac{\dot{V} * \eta * \alpha_C * m_C(N)}{\bar{A}_C(N)^2}$$
11-3

| $\Delta p_C(N)$       | Druckverlust des abgereinigten Kuchens des N-ten Zyklus                  | [Pa]              |
|-----------------------|--|-------------------|
| η                     | Viskosität der Luft  | [Pa·s]            |
| Ÿ                     | Volumenstrom   | [m³/s]            |
| α <sub>C</sub>        | mittlerer spezifischer Kuchenwiderstand                                  | [m/kg]            |
| m <sub>C</sub> (N)    | abgereinigte Staubmasse des N-ten Zyklus                                 | [kg]              |
| $\overline{A}_{C}(N)$ | mittlere Partikelabsetzfläche des abgereinigten Staubes des N-ten Zyklus | [m <sup>2</sup> ] |

Der maßgebliche Unterschied zur Gleichung 11-2 nach Darcy, welche nur bei reiner Kuchenfiltration angewandt werden kann, ist das Einführen einer mit der Zyklenzahl N veränderlichen mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$ . Durch die Veränderung der mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$  können auch von der Kuchenfiltration verschiedene Filtrationsformen, wie Tiefenfiltration und (Inneres) Patchy Cleaning modellhaft erfasst werden. Wie die abgereinigte Staubmasse m<sub>C</sub>(N) sowie die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$ modellhaft und in weiterer Folge mathematisch beschrieben werden können, ist Gegenstand folgender Ausführungen.

#### 11.3.1 Abgereinigte Staubmasse m<sub>C</sub>(N)

Bei zeitgesteuerter Alterung wird in jedem Zyklus eine von den konstant gehaltenen Betriebsparametern Zykluszeit, Volumenstrom und Rohgaskonzentration abhängige und somit ebenfalls konstante Masse Staub  $m_A$  auf das Filtermedium anfiltriert. Diese Staubmasse  $m_A$ berechnet sich in trivialer Weise nach Gleichung 11-4:

$$m_A = c * \dot{V} * t \tag{11-4}$$

| m <sub>A</sub> pro Zyklus anfiltrierte Staubmasse | [kg]    |
|---|---------|
| c Rohgaskonzentration                             | [kg/m³] |
| VVolumenstrom                                     | [m³/s]  |
| tZykluszeit                                       | [s]     |

Die für den Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$  relevante Staubmasse  $m_C(N)$  wird zu Beginn der Alterung am geringsten sein, da ein relativ großer Anteil der anfiltrierten Staubmasse  $m_A$  in der Tiefe des Filtermediums abgeschieden wird, von wo er nur schwer bei der folgenden Pulse-Jet Abreinigung abgereinigt werden kann (siehe auch Abschnitt 10.2.2.2 und Abbildung 11-3).



Abbildung 11-3: Schematische Darstellung von haften bleibender und abgereinigter Staubmasse in Abhängigkeit der Zyklenzahl N

Mit fortschreitender Alterung wird die Filtration zunehmend an die Oberfläche des Filtermediums verlagert. Von dort wird die anfiltrierte Staubmasse  $m_A$  vergleichsweise vollständiger abgereinigt, womit die Staubmasse  $m_C(N)$  steigt. Wird in einem quasi-stationären Zustand die gesamte anfiltrierte Staubmasse  $m_A$  an der Oberfläche des Filtermediums abgelagert, erreicht die abgereinigt Staubmasse  $m_C(N)$  ihren Maximalwert  $m_{C,max}$ , wobei immer ein gewisser Anteil am gesamt anfiltrierten Staub auch nach der Abreinigung haften bleibt. Dieser, in der Modellvorstellung konstant bleibende Anteil an oberflächlich haften bleibendem Staub, bildet den Sekundärkuchen, der zum Restdruckverlustanstieg beiträgt (siehe Abschnitt 11.4). Nach diesen Überlegungen kann für die Masse des abgereinigten Staubes  $m_C(N)$  geschrieben werden (siehe auch Abbildung 11-3):

$$m_{\mathcal{C}}(N) = m_{\mathcal{C},max} * (1 - e^{-k_1 * N})$$
11-5

| m <sub>C</sub> (N) | pro Zyklus abgereinigte Staubmasse         | .[kg]         |
|--------------------|--|---------------|
| m <sub>C,max</sub> | maximal pro Zyklus abgereinigte Staubmasse | .[kg]         |
| k <sub>1</sub>     | Staubmassenkoeffizient                     | .[ <b>-</b> ] |
| N                  | Zyklenzahl                                 | .[-]          |

Die Differenzstaubmasse, aus pro Zyklus anfiltrierter Staubmasse  $m_A$  und abgereinigter Staubmasse  $m_C(N)$ , bleibt am Filtermedium haften und ist für den Restdruckverlustanstieg  $\Delta\Delta p_R(N)$  verantwortlich (siehe Abschnitt 11.4.1).

#### **11.3.2** Mittlere Partikelabsetzfläche $\bar{A}_{C}(N)$

Die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$  ist eine fiktive Fläche, welche im Rahmen dieser Arbeit zur Modellierung des Druckverlustes bei der Abreinigungsfiltration eingeführt worden ist. Sie ergibt sich rein gedanklich aus der veränderlichen Strömungsgeschwindigkeitsverteilung zu verschiedenen Zeitpunkten t während eines Zyklus.

### 11.3.2.1 Definition der mittleren Partikelabsetzfläche

Abbildung 11-6 a zeigt die zu verschiedenen Zeitpunkten  $t_{RC}$  und  $t_E$  eines Zyklus (siehe Abbildung 11-5) herrschende Strömungsgeschwindigkeitsverteilung über die gesamte Partikelabsetzfläche A<sub>G</sub> des Filtermediums (Abbildung 11-4).



Abbildung 11-4: Schematische Darstellung der gesamten Partikelabsetzfläche AG

Diese umfasst auch die innere Faseroberfläche des Filtermediums (strichlierte Linien in Abbildung 11-4). Zu Beginn, bei noch unbestaubtem Filtermedium, steht die gesamte Faseroberfläche, welche als gesamte Partikelabsetzfläche  $A_G$  bezeichnet wird, zur Partikelabsetzung zur Verfügung. Mit zunehmender Staubablagerung nimmt die zur Verfügung stehende Partikelabsetzfläche ab. In Abbildung 11-5 wird t<sub>E</sub> als der Zeitpunkt am Ende eines Zyklus und t<sub>A</sub> als der Zeitpunkt zu Anfang eines Zyklus definiert. Dazwischen liegt der



Abbildung 11-5: Schematische Darstellung eines Zyklus mit der Zyklenzahl N

Zeitpunkt  $t_{RC}$  Während des Zyklusdauerintervalles  $[t_A-t_{RC}]$  wird der Restdruckverlustanstieg  $\Delta\Delta p_R(N)$  des betreffenden Zyklus, während des Zyklusdauerintervalles  $[t_{RC}-t_E]$ der Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$  aufgebaut. Die gesamte Partikelabsetzfläche A<sub>G</sub> des Filtermediums umfasst nicht nur die reine Filteranströmfläche, sondern auch die mitunter hohe innere Faseroberfläche des jeweiligen Filtermediums. Aufgrund der Inhomogenität des Filtermediums bzw. des inhomogen verteilten Staubes am und im Filtermedium gibt es Bereiche, die kaum durchströmt sind, wohingegen andere Bereiche mit größerer Strömungsgeschwindigkeit beaufschlagt werden. Um zunächst die effektive Partikelabsetzfläche zum Zeitpunkt  $t_{RC}$  (A( $t_{RC}$ )) zu erhalten, mit der sich später die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$  errechnet, wird die Strömungsgeschwindigkeitsverteilung zum Zeitpunkt  $t_{RC}$  gedanklich umverteilt (strichpunktierte Linie in Abbildung 11-6 a).



Abbildung 11-6: Strömungsgeschwindigkeitsverteilung und daraus resultierende mittlere Partikelabsetzfläche

Unter der Prämisse, dass die Fläche A der Summe der Flächen B und C darstellt, werden die grau hinterlegten Flächen minimiert und so eine neue Strömungsgeschwindigkeitsverteilung eingezeichnet. Die Fläche unter der so gebildeten neuen gleichmäßigen Strömungsgeschwindigkeitsverteilung stellt die effektive Partikelabsetzfläche  $A(t_{RC})$  dar. Gedanklich ist die effektive Partikelabsetzfläche perfekt gleichmäßig durchströmt, wohingegen die Differenzfläche aus effektiver und gesamter Partikelabsetzfläche nicht durchströmt ist. Die effektive Partikelabsetzfläche kann überdies unter die Filteranströmfläche sinken. Dies ist

beispielsweise der Fall, wenn die gesamte Partikelabsetzfläche A<sub>G</sub> der Filteranströmfläche entspricht. Zum Zeitpunkt t<sub>E</sub> fällt die Strömungsgeschwindigkeitsverteilung über die gesamte Partikelabsetzfläche A<sub>G</sub> im Vergleich zum Zeitpunkt t<sub>RC</sub> enger aus. Dies ist beispielsweise beim Übergang von der Tiefenzu Kuchenfiltration der Fall. Zunächst ist die Strömungsgeschwindigkeitsverteilung breit und der Staub lagert sich auf großen Bereichen der gesamten Partikelabsetzfläche A<sub>G</sub> ab (Zeitpunkt t<sub>RC</sub>, Tiefenfiltration). Im Verlaufe des Zyklus füllt der anfiltrierte Staub die Strömungsschattenstellen des Filtermediums auf und bevorzugte Strömungskanäle entstehen. Hierdurch ergibt sich die vergleichsweise enge Strömungsgeschwindigkeitsverteilung zum Zeitpunkt t<sub>RC</sub>. Dies hat eine Verringerung der effektiven Partikelabsetzfläche A(t<sub>E</sub>) unter dem strichlierten Linienzug in Abbildung 11-6 a zur Folge.

Die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$  ergibt sich schließlich durch graphische (siehe Abbildung 11-6 b) oder durch arithmetische Mittelwertbildung der effektiven Partikelabsetzflächen nach Gleichung 11-6:

$$\bar{A}_{C}(N) = \frac{A(t_{RC}) + A(t_{E})}{2}$$
 11-6

| $\overline{A}_{C}(N)$ | mittlere Partikelabsetzfläche des abgereinigten Staubes des N-ten Zyklus[m     | 2] |
|-----------------------|--|----|
| A(t <sub>RC</sub> )   | effektive Partikelabsetzfläche zum Zeitpunkt $t_{RC}$ des N-ten Zyklus[m       | 2] |
| A(t <sub>E</sub> )    | effektive Partikelabsetzfläche zum Zeitpunkt t <sub>E</sub> des N-ten Zyklus[m | 2] |

Betrachtet man, so wie hier gezeigt, das Zyklusdauerintervall  $[t_{RC}-t_E]$ , so erhält man als arithmetisches Mittel der effektiven Partikelabsetzflächen die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_C(N)$  zur Berechnung des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$ . Um die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_R(N)$  für die Berechnung des Restdruckverlustanstieges  $\Delta \Delta p_R(N)$  zu erhalten, müssen das Zyklusdauerintervall  $[t_A-t_{RC}]$  sowie die zugehörigen effektiven Partikelabsetzflächen betrachtet werden. Berücksichtigt man die gesamte Zyklusdauer, so ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel der effektiven Partikelabsetzflächen im Intervall  $[t_A-t_E]$  die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_K(N)$  für den Kuchendruckverlust  $\Delta p_K(N)$ , wie sie in Abschnitt 12 zur Modellierung des Druckverlustes bei druckgesteuerter Filtration verwendet wird.

## 11.3.2.2 Veränderung der mittleren Partikelabsetzfläche bei verschiedenen Filtrationsmechanismen

In Abbildung 11-7 sind die Druckverlustverläufe und zugehörigen Entwicklungen der effektiven Partikelabsetzfläche A(t), sowie der mittleren Partikelabsetzflächen  $\overline{A}_{C}(N)$  und  $\overline{A}_{R}(N)$  bei den in Abschnitt 10 als wesentlich bei der Alterung identifizierten verschiedenen Filtrationsmechanismen dargestellt. Die in dieser Abbildung vorgenommene Aneinanderreihung der Zyklen ist rein schematisch und zu Erklärungszwecken vorgenommen und entspricht nicht einem tatsächlichen Drucktverlustverlauf bei einem Laborversuch. Es wird hierbei neben der mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$ , welche für die Berechnung des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{C}(N)$  benötigt wird, auch auf die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{R}(N)$ eingegangen, die in Abschnitt 11.4 zur Berechnung des Restdruckverlustanstieges  $\Delta \Delta p_{R}(N)$ herangezogen wird.



Zykluszeit tz [s] verschiedener Zyklenzahlen N

Abbildung 11-7: Verlauf des Druckverlustes und der Partikelabsetzfläche innerhalb eines Zyklus bei verschiedenen Filtrationsmechanismen

Im oberen Bereich von Abbildung 11-7 sind die typischen Druckverlustverläufe bei Tiefenfiltration, Kuchenfiltration, dem Übergang von Tiefen- zu Kuchenfiltration und Innerem

Patchy Cleaning bzw. Patchy Cleaning wiedergegeben. Im unteren Bereich sind die zugehörigen Verläufe der effektiven Partikelabsetzfläche A(t) dargestellt. Zusätzlich ist jeweils die Größe der mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_R(N)$ , welche der, den Restdruckverlustanstieg  $\Delta\Delta p_R(N)$  hervorrufenden, Staubmasse m<sub>R</sub>(N) zur Ablagerung zur Verfügung steht (dunkelgrau) und die Größe der mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_C(N)$ , welche der, den Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C$  hervorrufenden, Staubmasse m<sub>C</sub>(N) zur Ablagerung zur Verfügung steht (hellgrau), eingezeichnet. Das Verhältnis der Breite der hellgrauen Bereiche zu den dunkelgrauen Bereichen innerhalb eines Zyklus, spiegelt das Verhältnis von abgereinigter Staubmasse m<sub>C</sub>(N) zu haften bleibender Staubmasse m<sub>R</sub>(N) desselben Zyklus wieder.

Im Fall der Kuchenfiltration kann ein linearer Druckverlustanstieg über die gesamte Zykluszeit konstatiert werden (Abbildung 11-7, links oben). Der zugehörige Verlauf der effektiven Partikelabsetzfläche A(t) (Abbildung 11-7, links unten) ist konstant, wie dies im ursprünglichen Kuchengesetz (Gleichung 11-2) der Fall ist. Während des gesamten Zyklus ändert sich demnach die Durchströmungssituation nicht, wobei die konstante mittlere Partikelabsetzfläche ( $\overline{A}_{C}(N) = \overline{A}_{R}(N)$ ) der Filteranströmfläche entspricht. Der auch nach der Abreinigung am Filtermedium haftende Staub, der für den Restdruckverlustanstieg  $\Delta\Delta p_{R}(N)$  verantwortlich ist, wird demnach auf einer gleich großen mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{R}(N)$  bzw.  $\overline{A}_{C}(N)$  abgelagert, wie der abgereinigte Staub, der für den Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{C}(N)$  verantwortlich zeichnet. Das Verhältnis von haften bleibender zu abgereinigter Staubmasse entspricht daher dem Verhältnis des Restdruckverlustanstiegs zum Druckverlust des abgereinigten Kuchens.

Im Gegensatz zur Kuchenfiltration nimmt bei der Tiefenfiltration die effektive Partikelabsetzfläche A(t) mit zunehmender Zykluszeit stetig ab. Zunächst steht dem anfiltrierten Staub die große innere Faseroberfläche des Filtermediums für die Partikelablagerung zur Verfügung. Im Verlauf des Zyklus werden vormals freie Flächen von Staubablagerungen blockiert, wodurch dem konstanten Volumenstrom eine vergleichsweise geringere Fläche zur Durchströmung und den von der Strömung transportieren Partikeln eine geringere Fläche zur Ablagerung zur Verfügung steht. Diese Reduzierung der effektiven Partikelabsetzfläche A(t) mit fortschreitender Zyklusdauer erklärt den steiler werdenden Druckverlustverlauf im Fall des Mechanismus der Tiefenfiltration. Da die effektive Partikelabsetzfläche A(t) im ganzen Zyklus über der für die Kuchenfiltration charakteristischen Filteranströmfläche liegt, erreicht der Druckverlustanstieg bei reiner Tiefenfiltration die vergleichsweise höheren Zuwachsraten bei vorherrschender Kuchenfiltration nicht. Die mittleren Partikelabsetzflächen  $\overline{A}_R(N)$  und  $\overline{A}_C(N)$ liegen dabei jeweils über der Filteranströmfläche. Da die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_R(N)$ des haften bleibenden Staubes m<sub>R</sub>(N) dabei größer ist, als die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$  des abgereinigten Staubes, fällt der Restdruckverlustanstieg  $\Delta\Delta p_{R}(N)$  im Vergleich zum Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{C}(N)$  geringer aus, als dies alleine das Verhältnis der nicht abgereinigten Staubmasse m<sub>R</sub>(N) zur abgereinigten Staubmasse m<sub>C</sub>(N) erklären würde.

Da die Mechanismen des Inneren Patchy Cleanings und des Patchy Cleanings beide auf einer Strömungsvergleichmäßigung beruhen und so einen ähnlichen Druckverlustverlauf hervorrufen, werden sie hier zusammengefasst behandelt. Sowohl beim Patchy Cleaning (unregelmäßige Abreinigung des Kuchens) als auch beim Inneren Patchy Cleaning (im Vorfeld ausgebildete bevorzugte Strömungskanäle) herrscht zu Beginn des Zyklus eine unregelmäßige Strömungsverteilung mit lokal erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten vor. Dies erklärt die zu Beginn des Zyklus geringe effektive Partikelabsetzfläche A(t), sowie den damit verbundenen steilen Druckverlustanstieg. Aufgrund der, in den Schichten knapp unter der Filteroberfläche (Inneres Patchy Cleaning) bzw. an der Filteroberfläche (Patchy Cleaning) stattfindenden, Strömungsvergleichmäßigung nimmt der Druckverlustanstieg im Verlauf des Zyklus ab und geht in einen Anstieg über, wie er bei reiner Kuchenfiltration vorkommt. Damit steigt auch die effektive Partikelabsetzfläche A(t) innerhalb des Zyklus auf das Niveau der Filteranströmfläche. Die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{R}(N)$  auf der sich die haften bleibende Staubmasse m<sub>R</sub>(N) ablagert und so den Restdruckverlustanstieg  $\Delta \Delta p_R(N)$  hervorruft, sowie die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$  auf der sich die abgereinigte Staubmasse m<sub>C</sub>(N) ablagert und so den Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{C}(N)$  hervorruft, sind geringer als die Filteranströmfläche. Dies ergibt in Summe einen steileren Druckverlustanstieg innerhalb eines Zyklus verglichen mit reiner Kuchenfiltration. Gerade beim Patchy Cleaning können so relativ geringe haften-bleibende Staubmassen für einen überproportional hohen Anstieg des Restdruckverlustes sorgen, wie dies in Versuchen kurz vor der gänzlichen Verstopfung des Filtermediums im Rahmen dieser Arbeit beobachtet wurde (siehe z.B. Abschnitt 10.2.1.3).

Mit dieser Modellvorstellung der mittleren Partikelabsetzfläche, auf der sich der abgereinigte und haften bleibenden Staub verteilt, können auch Übergänge von Filtrationsmechanismen innerhalb eines Zyklus berücksichtigt werden. In Abbildung 11-7 rechts oben, ist der Druckverlustverlauf eines Zyklus beim Übergang von anfänglicher Tiefenfiltration zur Kuchenfiltration dargestellt. Der Druckverlust steigt zunächst vergleichsweise flach an. Dies ist auf die große zu dieser Zykluszeit verfügbare Partikelabsetzfläche zurückzuführen. Im Verlauf des Zyklus steigt der Druckverlust beim Übergang von Tiefenfiltration zur Kuchenfiltration stärker an. Die effektive Partikelabsetzfläche A(t) ist auf die für Kuchenfiltration typische Filteranströmfläche gesunken. Die mittleren Partikelabsetzflächen sind größer bzw. gleich groß wie die Filteranströmfläche. In Summe ist der Druckverlustanstieg des gesamten Zyklus verglichen mit reiner Tiefenfiltration (Partikelabsetzfläche stets größer der Filteranströmfläche) dadurch höher, jedoch niedriger als bei Patchy Cleaning oder Innerem Patchy Cleaning (Partikelabsetzfläche kleiner bzw. gleich groß der Filteranströmfläche).

Ein weiterer Vorteil dieser Betrachtungsweise mit den mittleren Partikelabsetzflächen,  $\overline{A}_R(N)$ für die haften bleibende Staubmasse m<sub>R</sub>(N), welche den Restdruckverlustanstieg  $\Delta \Delta p_R(N)$ hervorruft und  $\overline{A}_C(N)$  für die abgereinigte Staubmasse m<sub>C</sub>(N), die den Druckverlust des abgereinigten Kuchen  $\Delta p_C(N)$  hervorruft, liegt darin begründet, dass hiermit eine einfache Erweiterung des Kuchengesetztes aus Gleichung 11-2 ausreicht, um nun den Druckverlustverlauf bei verschiedensten Filtrationsmechanismen beschreiben zu können.

#### 11.3.2.3 Mathematische Beschreibung der mittleren Partikelabsetzfläche $\bar{A}_{C}(N)$

In diesem Abschnitt soll dargelegt werden, wie die oben definierte mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$  mathematisch beschrieben werden kann, um den in Abschnitt 10.2 diskutierten Druckverlustverlauf eines industriell typisch eingesetzten PI - Nadelfilzfiltermediums bei zeitgesteuerter Alterung modellhaft beschreiben zu können.

Dass mit der Vorstellung der veränderlichen mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$  grundsätzlich alle in Abschnitt 10.2 identifizierten Filtrationsmechanismen beschrieben werden können, wurde schon in vorangegangenem Abschnitt 11.3.2.2 gezeigt. Im Folgenden wird dargelegt, wie sich die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$  beim in Abschnitt 10.2 diskutierten Versuch mit der Zyklenzahl N verändert, um schließlich zu einem mathematischen Ausdruck zu gelangen, welcher diese Veränderung zu beschreiben im Stande ist.

Zu Beginn der Alterung wird der Luftstrom nicht nur über die Filteranströmfläche, sondern auch über die hohe innere Faseroberfläche des Filtermediums verteilt. Dies bedingt, dass die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$ während dieser Tiefenfiltrationsphase die Filteranströmfläche übersteigt und somit relativ hoch ist. Aufgrund der unvollständigen Abreinigung kommt es zu dauerhaften Staubablagerungen an der inneren Faseroberfläche, wodurch diese nicht mehr als Partikelabsetzfläche zur Verfügung steht. Durch das Vernetzen dieser dauerhaften Staubablagerungen kommt es überdies zur Ausbildung von bevorzugten Strömungskanälen, welche lokal erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten zur Folge haben. Dies ist gleichbedeutend mit einer ungleichmäßigen Strömungsgeschwindigkeitsverteilung über das Filtermedium und führt nach Abbildung 11-7 zu einer Reduzierung der mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$ . Die anfiltrierte Staubmasse m<sub>C</sub>(N) wird durch die ungleichmäßige Strömungsgeschwindigkeitsverteilung auf eine mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$  verteilt, die kleiner als die Filteranströmfläche ist. Mit weiter steigender Zyklenzahl N werden die

Strömungskanäle durch anfiltrierten Staub innerhalb eines Zyklus temporär, bis zur folgenden Abreinigung, verstopfen. Das temporäre Verstopfen der Strömungskanäle ist gleichbedeutend mit einer Vergleichmäßigung des Strömungswiderstandes über das Filtermedium innerhalb eines Zyklus. Zyklenübergreifend ist der immer raschere Strömungsausgleich innerhalb der Einzelzyklen zu beobachten. Dies ist mit der Verengung der bevorzugten Strömungskanäle durch haften bleibenden Staub nach der Abreinigung zu erklären. Je enger die Strömungskanäle sind, desto rascher werden diese innerhalb eines Zyklus mit Staub aufgefüllt, was gleichbedeutend mit einer rascheren Strömungsvergleichmäßigung ist. Im Modell wird dieses Verhalten durch ein Ansteigen der mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$  berücksichtigt. Die Partikelabsetzfläche startet also zu Beginn der Alterung bei einem hohen Niveau, bedingt durch die anfängliche Tiefenfiltration, nimmt dann aufgrund des Inneren Patchy Cleaning ab und im weiteren Verlauf der Alterung durch die raschere intrazyklische Strömungsvergleichmäßigung nach Durchlaufen eines Minimums wieder in Richtung des Niveaus bei reiner Kuchenfiltration zu. Mathematisch lässt sich dieses Durchlaufen eines Minimums bei N<sub>max</sub> (N<sub>max</sub> bezieht sich hier auf den maximalen Druckverlust des abgereinigten Kuchens, der bei minimaler mittlerer Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$  erreicht wird) der mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$  mit einer Parabelgleichung beschreiben.

$$A_C(N) = A * [(N - N_{max})^2 + k_2]$$
 11-7

| $\overline{A}_{C}(N)$ | mittlere Partikelabsetzfläche für den Druckverlust des abgereinigten Kuchens | .[m²]         |
|-----------------------|--|---------------|
| A                     | . Hilfsfläche  | .[m²]         |
| N                     | . Zyklenzahl   | .[-]          |
| N <sub>max</sub>      | . Zyklenzahl mit minimaler mittlerer Partikelabsetzfläche                    | .[ <b>-</b> ] |
| k <sub>2</sub>        | . Flächenkoeffizient   | .[ <b>-</b> ] |

Nach Gleichung 11-7 nimmt die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$  mit steigender Zyklenzahl N zunächst durch die Verblockung der inneren Faseroberfläche und durch das Ausbilden von Strömungskanälen kontinuierlich ab. Bei der Zyklenzahl N<sub>max</sub> durchläuft die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$  ein Minimum, bevor sie durch den rascher werdenden intrazyklischen Strömungsausgleich durch das temporäre Verstopfen der Strömungskanäle wieder ansteigt.

#### 11.3.3 Modellgleichung für den Druckverlust des abgereinigten Kuchens $\Delta p_C(N)$

Setzt man in Gleichung 11-3 für m<sub>C</sub>(N) und  $\overline{A}_{C}(N)$  die oben angeführten Gleichungen für m<sub>C</sub>(N) und  $\overline{A}_{C}(N)$  ein, erhält man die Modellgleichung für den Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{C}(N)$  in Abhängigkeit der Zyklenzahl N:

$$\Delta p_C(N) = \frac{\dot{V} * \eta * \alpha_C * m_{C,max} * (1 - e^{-k_1 * N})}{A^2 * [(N - N_{max})^2 + k_2]^2}$$
 11-8

Unter der Annahme, dass  $\eta$ ,  $\alpha_C$ ,  $m_{C,max}$  und A Versuchskonstanten sind, lässt sich Gleichung 11-8 mit k<sub>0</sub> als zusammenfassender, prozessspezifischer Konstante vereinfacht schreiben:

$$\Delta p_C(N) = k_0 \frac{\dot{V}(1 - e^{-k_1 * N})}{[(N - N_{max})^2 + k_2]^2}$$
11-9

k<sub>0</sub>..... zusammenfassende prozessspezifische Konstante...... [kg/(m<sup>4</sup>s)]

Gleichung 11-9 beschreibt den Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C$  in Abhängigkeit der Zyklenzahl N. Im Zähler wird im Wesentlichen die steigende abgereinigte Staubmasse  $m_C(N)$  beschrieben, im Nenner der Verlauf der mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_C(N)$ , welche ein Minimum durchläuft.

Um den Druckverlustverlauf bei zeitgesteuerter Alterung hinreichend zu beschreiben, wird im Folgenden noch die mathematische Formulierung des Restdruckverlustverlaufes  $\Delta p_R(N)$  auf Basis einer mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_R(N)$  diskutiert.

## 11.4 Restdruckverlust $\Delta p_R(N)$

Der Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$  in Abhängigkeit zur Zyklenzahl N setzt sich nach Gleichung 11-1 aus dem Leerdruckverlust des Filtermediums  $\Delta p_0$  und der Summe der Restdruckverlustanstiege  $\Delta \Delta p_R(N)$  bis zum betrachteten Zyklus N zusammen.

Im Modell wird die, pro Zyklus nach der Abreinigung haften bleibende, Staubmasse  $m_R(N)$  auf die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_R(N)$  verteilt und verursacht so den Restdruckverlustanstieg  $\Delta\Delta p_R(N)$ . Die, pro Zyklus nach der Abreinigung haften bleibende, Staubmasse  $m_R(N)$  wird zu Beginn der Alterung aufgrund der vergleichsweise unvollständigen Abreinigung bei der vorherrschenden Tiefenfiltration hoch sein und bei Übergang der Filtration an die Oberfläche des Filtermediums abnehmen. Die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_R(N)$  wird als Folge der zunehmenden Verstopfung des Filtermediums stetig abnehmen.

Allgemein lässt sich für den Restdruckverlustanstieg  $\Delta\Delta p_R(N)$  als Folge der dauerhaften Staubablagerungen im und am Filtermedium analog zu Gleichung 11-3 schreiben:

$$\Delta \Delta p_R(N) = \frac{\dot{V} * \eta * \alpha_R * m_R(N)}{\bar{A}_R(N)^2}$$
11-10

| $\Delta\Delta p_R(N)$ | Anstieg des Restdruckverlustes des N-ten Zyklus                                | .[Pa]              |
|-----------------------|--|--------------------|
| η                     | . Viskosität der Luft  | .[Pa·s]            |
| Ý                     | . Volumenstrom   | .[m³/s]            |
| α <sub>R</sub>        | . mittlerer spezifischer Kuchenwiderstand                                      | .[m/kg]            |
| m <sub>R</sub> (N)    | . haften bleibende Staubmasse des N-ten Zyklus                                 | .[kg]              |
| $\overline{A}_{R}(N)$ | . mittlere Partikelabsetzfläche des haften bleibenden Staubes des N-ten Zyklus | .[m <sup>2</sup> ] |

Um nun den Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$  zu einem Zyklus N berechnen zu können, werden die Restdruckverlustanstiege  $\Delta \Delta p_R(N)$  aufsummiert und zusätzlich der Leerdruckverlust des unbestaubten Filtermediums  $\Delta p_0$  addiert.

Alternativ kann der Restdruckverlust auch direkt berechnet werden, indem man die Summe der haften bleibenden Staubmassen auf die Fläche  $\overline{A}_{R}(N)$  bezieht, welche den Mittelwert aller mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{R}(N)$  bis zum N-ten Zyklus darstellt:

$$\Delta p_R(N) = \Delta p_0 + \sum_{N=1}^{N} \Delta \Delta p_R(N) = \Delta p_0 + \frac{\dot{V} * \eta * \alpha_R * \sum_{N=1}^{N} m_R(N)}{\bar{A}_R(N)}$$
 11-11

Die Fläche  $\overline{A}_R(N)$  ist nach Gleichung 11-12 der Mittelwert über N Zyklen der mittleren Partikelabsetzflächen  $\overline{A}_R(N)$  eines jeden betrachteten Zyklus:

$$\frac{\sum_{N=1}^{N} \bar{A}_R(N)}{N} = \bar{A}_R(N)$$
 11-12

#### 11.4.1 Haften bleibende Staubmasse m<sub>R</sub>(N)

Die den Restdruckverlustanstieg eines Zyklus  $\Delta\Delta p_R(N)$  verursachende Staubmasse m<sub>R</sub>(N) ist die Differenzstaubmasse aus anfiltrierter Staubmasse m<sub>A</sub> (Gleichung 11-4) und abgereinigter Staubmasse m<sub>C</sub>(N) (Gleichung 11-5) im jeweiligen Zyklus. Die Staubmasse m<sub>R</sub>(N) ist demnach jene Staubmasse, die zusätzlich zu der schon dauerhaft anhaftenden Staubmasse im N-ten Zyklus selbst nach der Pulse-Jet Abreinigung am und im Filtermedium haften bleibt.

$$m_R(N) = m_A - m_{C,max} * (1 - e^{-k_1 * N})$$
11-13

| m <sub>A</sub>     | pro Zyklus anfiltrierte Staubmasse                 | [kg] |
|--------------------|--|------|
| m <sub>R</sub> (N) | zusätzlich haften bleibende Staubmasse im Zyklus N | [kg] |
| k <sub>1</sub>     | Staubmassenkoeffizient                             | [-]  |

Die für die Berechnung des Restdruckverlustes  $\Delta p_R(N)$  zu einem Zyklus N benötigte gesamt anhaftende Staubmasse ist die Summe aller bei jedem betrachteten Zyklus anhaftenden Staubmassen m<sub>R</sub>(N):

$$\sum_{N=1}^{N} m_{R}(N) = \sum_{N=1}^{N} m_{A} - m_{C,max} * (1 - e^{-k_{1}*N})$$
$$= \int_{N=1}^{N} m_{A} - m_{C,max} * (1 - e^{-k_{1}*N}) dN$$
$$= (m_{A} - m_{C,max}) * N + \frac{m_{C,max}}{k_{1}} * (1 - e^{-k_{1}*N})$$

In Gleichung 11-14 erkennt man, dass die gesamt am und im Filtermedium haftenden Staubmassen im Wesentlichen von der Entwicklung zweier Gleichungsterme als Funktion der Zyklenzahl abhängt. Der erste Term,  $(m_A-m_{C,max})$ \*N, beschreibt einen konstanten Zuwachs an der gesamten Reststaubmasse mit steigender Zyklenzahl und berücksichtigt so den linearen Restdruckverlustanstieg, der in Abschnitt 10.2.2.1 mit dem Wachstum eines Sekundärkuchens erklärt wurde. Der zweite Termn der zum Anwachsen der gesamten Reststaubmasse beiträgt,  $\frac{m_{C,max}}{k_1}$ \*(1-e<sup>-k\_1\*N</sup>), verliert mit steigender Zyklenzahl an Einfluss und beschreibt somit die anfänglich erhöhte Staubeinlagerung im Filtermedium durch den Mechanismus der Tiefenfiltration.

## 11.4.2 Mittlere Partikelabsetzfläche $\bar{A}_R(N)$

Die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{R}(N)$  auf welcher der im Zyklus N zusätzlich haften bleibende Staub abgelagert wird, ist der arithmetische Mittelwert der effektiven Partikelabsetzflächen (analog zu Abbildung 11-6) im Zyklusdauerintervall [t<sub>A</sub>-t<sub>RC</sub>] (Abbildung 11-5) des betreffenden Zyklus.

Zu Beginn der Alterung wird der Luftstrom und damit die von ihm transportierten Staubpartikel nicht nur über die Filteranströmfläche, sondern auch über die hohe innere Faseroberfläche verteilt, welche als Partikelabsetzfläche fungiert. Dies wird im Modell durch eine mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_R(N)$  berücksichtigt, welche größer als die Filteranströmfläche selbst ist. Durch die dauerhafte Staubablagerung auf der inneren Faseroberfläche wird diese teilweise blockiert, nicht mehr durchströmt und steht somit nicht mehr zur Partikelabsetzung zur Verfügung. Die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_R(N)$  sinkt. Durch das Vernetzen der dauerhaften Staubablagerungen werden Strömungskanäle ausgebildet, die eine unregelmäßige Strömungsgeschwindigkeits- und damit Staubverteilung über das Filtermedium hervorrufen. Dies wird im Modell durch ein Sinken der mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_R(N)$  unter die Filteranströmfläche berücksichtigt. Die Verengung der bevorzugten Strömungskanäle durch haften bleibenden Staub verstärkt die Abnahme der mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{R}(N)$  zu Beginn eines Zyklus noch mehr.

Da nach obigen Überlegungen auch der über N Zyklen gebildete Mittelwert der mittleren Partikelabsetzflächen  $\overline{A}_{R}(N)$ ,  $\overline{\overline{A}}_{R}(N)$ , stetig sinkt, kann man nach Gleichung 11-15 formulieren:

$$\bar{A}_R(N) = A_0 * (1 - k_4 * N^2)$$
11-15

A<sub>0</sub>......Partikelabsetzfläche des unbestaubten Filtermediums......[m<sup>2</sup>] k<sub>4</sub>......[-]

Setzt man in die aus der Grundgleichung 11-3 abgeleiteten Gleichung 11-11 die oben angeführten Gleichungen für  $\sum_{N=1}^{N} m_R(N)$  und  $\overline{A}_R(N)$  ein und ersetzt  $\alpha_i$  durch  $\alpha_R$ , erhält man die Modellgleichung für den Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$  in Abhängigkeit der Zyklenzahl N:

$$\Delta p_R(N) = \Delta p_0 + \frac{\dot{V} * \eta * \alpha_R * \left[ \left( m_A - m_{C,max} \right) * N + \frac{m_{C,max}}{k_1'} (1 - e^{-k_1 * N}) \right]}{[A_0 * (1 - k_4 * N^2)]^2}$$
 11-16

Unter der Annahme, dass  $\eta$ ,  $\alpha_R$ ,  $m_{C,max}$ ,  $m_A$  und  $A_0$  prozessspezifische Konstanten sind, lässt sich Gleichung 11-16 mit  $k_3$  und  $k_5$  als zusammenfassende prozessspezifische Konstanten vereinfacht schreiben:

$$\Delta p_R(N) = \Delta p_0 + \frac{\dot{V} * k_3 * [N + k_5(1 - e^{-k_1 * N})]}{(1 - k_4 * N^2)^2}$$
11-17

 $\label{eq:k3} k_3 ... zusammenfassende prozessspezifische Konstante... [kg/(m^4s)] k_5 ... zusammenfassende prozessspezifische Konstante ... [-]$ 

Gleichung 11-17 beschreibt somit den Restdruckverlustverlauf  $\Delta p_R(N)$  in Abhängigkeit der Zyklenzahl N. Im Zähler wird die steigende gesamte Reststaubmasse durch einen mit zunehmender Zyklenzahl linear steigenden Anteil, der den Sekundärkuchen (siehe auch Abbildung 11-3) berücksichtigt, und einen mit zunehmender Zyklenzahl schwächer werdenden Anteil, welcher die anfängliche vermehrte Staubeinlagerung durch Tiefenfiltration berücksichtigt, modelliert. Im Nenner wird die durch die zunehmende Verstopfung des Filtermediums stetig sinkende gemittelte mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_R(N)$  nachgebildet. Dass mit den so erarbeiteten Modellgleichungen für den Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$  (Gleichung 11-9) und des Restdruckverlustes  $\Delta p_R(N)$  (Gleichung 11-17) in Abhängigkeit der Zyklenzahl N die Druckverlustverläufe, der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten zeitgesteuerten Alterungsversuche, gut abgebildet werden können, wird in Abschnitt 13 gezeigt.

Im Folgenden wird die Adaption des gegenständlichen Modelles für den Fall der druckgesteuerten Abreinigungsfiltration erläutert.

# 12 ANPASSEN DES MODELLS FÜR DIE DRUCKGESTEUERTE ABREINIGUNGSFILTRATION

In diesem Abschnitt soll das obige Modell, welches für die Nachbildung des Druckverlustverlaufes bei zeitgesteuerter Alterung entwickelt wurde, so adaptiert werden, dass auch eine druckgesteuerte Abreinigungsfiltration in ihrer Druckverlustentwicklung nachgebildet werden kann.

## 12.1 Modellgegenstand

Bei druckgesteuerter Abreinigung wird anstatt einer Zykluszeit  $t_Z(N)$  ein Druckverlust, der Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_A$  festgelegt, bei dem die Filtermittelregenerierung erfolgt. Analog zur zeitgesteuerten Alterung steigt der Druckverlust aufgrund anfiltrierten Staubes zu Beginn der Alterung ausgehend vom Leerdruckverlust des unbestaubten Filtermediums  $\Delta p_0$  um den Betrag des Kuchendruckverlustes des ersten Zyklus  $\Delta p_K(N=1)$  an (Abbildung 12-1).



Abbildung 12-1: Druckverlustverlauf bei druckgesteuerter Abreinigung - schematisch

Bei Erreichen des vorgegebenen Abreinigungsdruckverlustes  $\Delta p_A$  erfolgt die Regenerierung des Filtermediums mittels Pulse-Jet Druckstoßes von der Reingasseite aus. Somit sinkt der Druckverlust um den Betrag des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens des ersten Zyklus  $\Delta p_C(N=1)$  auf den Wert des Restdruckverlustes des ersten Zyklus  $\Delta p_R(N=1)$  ab. Der Restdruckverlust ist damit um den Betrag des Restdruckverlustanstieges  $\Delta \Delta p_R(N=1)$  des ersten Zyklus gestiegen. Es folgt das Wiederansteigen des Druckverlustes im zweiten Zyklus. Der unvollständigen Filtermittelregenerierung ist es geschuldet, dass der Restdruckverlust mit steigender Zyklenzahl N stetig ansteigt. Dies hat im Allgemeinen eine kontinuierliche Verringerung der Zyklusdauer  $t_Z(N)$  bis zum Erreichen einer festgelegten minimalen Zyklusdauer zur Folge.

Analog zur zeitgesteuerten Alterung, setzt sich auch bei druckgesteuerter Abreinigung der Abreinigungsdruckverlust nach Gleichung 12-1 aus dem Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$  und dem Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$  bzw. des Kuchendruckverlustes  $\Delta p_K(N+1)$ zusammen (siehe auch Abbildung 12-1):

$$\Delta p_A = \Delta p_R(N) + \Delta p_C(N) = \Delta p_R(N) + \Delta p_K(N+1)$$
12-1

Da der Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_A$  konstant gehalten wird, genügt entweder der Verlauf des Restdruckverlustes  $\Delta p_R(N)$  (bzw. dessen Anstieg) oder des Kuchendruckverlustes  $\Delta p_K(N)$ , um den Druckverlustverlauf bei druckgesteuerter Abreinigungsfiltration zu beschreiben. Da sich die Zykluszeit  $t_Z(N)$  in Abhängigkeit der Zyklenzahl N ändert, muss für eine vollständige Beschreibung dieser Druckverlustentwicklung die Zykluszeit  $t_Z(N)$  modelliert werden. Die Zählweise für die Zyklenzahl N beginnt wiederum mit dem ersten Zyklus (N=1).

Um den in Abbildung 12-1 gezeigten Druckverlustverlauf mathematisch eindeutig zu beschreiben, wird demnach der Kuchendruckverlustverlauf  $\Delta p_K(N)$  und der Verlauf der Zyklusdauer  $t_Z(N)$  modelliert. Der Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$ , sowie der Restdruckverlust ergeben sich bei konstantem, vorgegebenem Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_A$  in trivialer Weise nach Gleichung 12-1.

### 12.2 Modellkonzept

Das in Abschnitt 11 vorgestellte Modellkonzept zur Beschreibung der Druckverlustentwicklung bei zeitgesteuerter Alterung ist auch bei druckgesteuerter Abreinigungsfiltration gültig und wird daher folgerichtig als Basis für die mathematische Beschreibung der Druckverlustentwicklung bei druckgesteuerter Abreinigung herangezogen.

## 12.3 Mathematisches Konzept

Im Folgenden soll gezeigt werden, wie das in Abschnitt 11 diskutierte Modellkonzept für die Beschreibung der Druckverlustentwicklung bei druckgesteuerter Abreinigungsfiltration (siehe Abbildung 12-2) in mathematische Modellgleichungen übergeführt werden kann.



Abbildung 12-2 Druckverlust über das Prüffiltermedium in Abhängigkeit der Zyklenzahl bei druckgesteuerter Abreinigung

Um den Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$  in Abhängigkeit der Zyklenzahl N zu beschreiben, wird auf das Kuchengesetz in Gleichung 11-2 zurückgegriffen. Für die mathematische Beschreibung der Veränderung der Zyklusdauer  $t_Z(N)$  in Abhängigkeit der Zyklenzahl N wird eine Potenzfunktion verwendet.

Auch hier soll analog zu Abschnitt 11 vom Vorhandensein aller in Abschnitt 10 vorgestellten Filtrationsmechanismen ausgegangen werden, um so eine allgemein gültige Modellbildung zu erreichen.

#### 12.3.1 Zyklusdauer t<sub>Z</sub>(N)

Die Zyklusdauer  $t_Z(N)$  ist die Zeit, die zur Filtration in einem Zyklus N zur Verfügung steht, bis ein vorgegebener Abreinigungsdruckverlust erreicht ist. Die Zyklusdauer hängt in hohem Maße Filtrationsgeschwindigkeit, von den Betriebsparametern, insbesondere der der Rohgaskonzentration und dem Filtermedium selbst ab. Des Weiteren wird die Zyklusdauer  $t_{z}(N)$  durch die während der Alterung stetig fortschreitende Verstopfung des Filtermediums, welche durch den Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$  bzw. dessen Anstieg charakterisiert wird, beeinflusst. Die Druckverlustspanne zwischen Restdruckverlust  $\Delta p_{\rm R}({\rm N})$ und Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_A(N)$ , der sogenannte Kuchendruckverlust  $\Delta p_K(N)$ , wird durch den steigenden Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$  immer kleiner, wodurch die Zyklusdauer  $t_Z(N)$  stetig abnimmt. Dem entgegen wirkt eine schon in Abschnitt 10.2.2.2 beschriebene Vergleichmäßigung der Anströmung während der Alterung über das Filtermedium. Dies bedingt einen vergleichsweise langsameren (Kuchen-)Druckverlustanstieg innerhalb eines Zyklus und damit theoretisch eine Verlängerung der Zyklusdauer t<sub>Z</sub>(N).

In Abbildung 12-3 ist der auf die jeweilige Zyklusdauer bezogene mittlere Kuchendruckverlustanstieg  $\Delta \dot{p}_{K}(N)$  (siehe Gleichung 12-2) über die Zyklenzahl N für einen Versuch mit druckgesteuerter Abreinigung aufgetragen.

$$\Delta \dot{p}_K(N) = \frac{\Delta p_K(N)}{t_Z(N)}$$
12-2

Dieser auf die Zyklusdauer bezogene mittlere Kuchendruckverlustanstieg  $\Delta \dot{p}_{K}(N)$  ist direkt mit der Zyklusdauer t<sub>Z</sub>(N) verknüpft, wie aus Gleichung 12-2 hervorgeht. Man erkennt in Abbildung 12-3, dass der auf die Zyklusdauer bezogene mittlere Kuchendruckverlustanstieg  $\Delta \dot{p}_{K}(N)$  zu Beginn der Alterung am geringsten ist. Dies ist dem langsamen Druckverlustanstieg innerhalb eines Zyklus bei der hier vorherrschenden Tiefenfiltration geschuldet. Verlagert sich die Filtration an die Oberfläche, steigt der (Kuchen-)Druckverlust innerhalb eines Zyklus vergleichsweise rascher an. Durch die Strömungsvergleichmäßigung (siehe auch Abschnitt Filtermedium während 10.2.2.2) über das der Alterung, sinkt der mittlere Kuchendruckverlustanstieg pro Zyklusdauer nach Durchlaufen eines Maximums wieder ab.

Auf die Zyklusdauer  $t_Z(N)$  wirkt sich die Zunahme des auf die Zyklusdauer bezogenen mittleren (Kuchen-)Druckverlustanstieges verkürzend aus, wohingegen sich das Absinken des Kuchendruckverlustanstieges pro Zyklusdauer verlängernd auf die Zyklusdauer  $t_Z(N)$  auswirkt.



Abbildung 12-3: Auf die Zyklusdauer bezogener Kuchendruckverlustanstieg als Funktion der Zyklenzahl bei druckgesteuerter Abreinigung

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten druckgesteuerten Alterungsversuche zeigen jedoch kein Ansteigen der Zyklusdauer (siehe Abbildung 12-4). Dies lässt den Schluss zu, dass der oben gezeigte Zyklusdauer-verlängernde Effekt, die Vergleichmäßigung der Anströmung des Filtermediums, von dem Zyklusdauer-verkürzenden Effekt, dem Ansteigen des Restdruckverlustes, überkompensiert wird.

Mathematisch lässt sich damit die Zyklusdauer in Abhängigkeit der Zyklenzahl N in erster Näherung mit einer Potenzfunktion darstellen:

$$t_Z(N) = t_1 * (N)^{-j_1}$$
 12-3

| t <sub>Z</sub> (N) | Zyklusdauer als Funktion der Zyklenzahl | s]  |
|--------------------|---|-----|
| t <sub>1</sub>     | Zyklusdauer des ersten Zyklus           | [s] |
| j <sub>1</sub>     | Zeitkoeffizient                         | [-] |
| N                  | Zyklenzahl                              | [-] |



Abbildung 12-4: Zyklusdauer als Funktion der Zyklenzahl bei druckgesteuerter Abreinigung

Die Zyklusdauer nimmt nach Gleichung 12-3, ausgehend von einer (maximalen) Zyklusdauer  $t_1$ zu Beginn der Filtration mit dem noch unbestaubten Filtermedium, mit steigender Zyklenzahl N ständig ab. Bei Unterschreiten einer festzulegenden Zyklusdauer  $t_Z(N)$  wird die Abreinigungsfiltration abgebrochen und beispielsweise das Filtermedium ersetzt.

#### **12.3.2** Restdruckverlust $\Delta p_R(N)$

Der Restdruckverlust eines Zyklus N,  $\Delta p_R(N)$ , ergibt sich durch einfaches Umformen der Gleichung 12-1 als Differenz von konstant gehaltenem Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_A$  und dem Kuchendruckverlust  $\Delta p_K(N+1)$  (siehe dazu auch Abbildung 12-1).

$$\Delta p_R(N) = \Delta p_A - \Delta p_K(N+1)$$
12-4

Die Berechnung des Restdruckverlustes  $\Delta p_R(N)$  über den Kuchendruckverlust  $\Delta p_K(N)$  ist im Fall der druckgesteuerten Abreinigung zweckmäßig, da dieser direkt mit der pro Zyklus anfiltrierten Staubmasse und damit mit der im vorigen Abschnitt modellierten Zyklusdauer  $t_Z(N)$  verknüpft ist. Um den Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$  aus Gleichung 12-4 berechnen zu können, wird für den Kuchendruckverlust  $\Delta p_K(N+1)$  die entsprechende Modellgleichung nach Gleichung 11-2 eingesetzt. Dabei wird von der zeitlichen Betrachtungsweise auf eine zyklenweise Betrachtungsweise übergegangen. Hierfür wird statt der zeitabhängigen Staubmasse m(t) die Staubmasse, die für den Kuchendruckverlust eines Zyklus verantwortlich ist, m<sub>A</sub>(N+1), und für die Fläche zur Kuchenablagerung A die mittlere Partikelabsetzfläche,  $\overline{A}_K(N+1)$  (siehe Abschnitt 11.3.2.1), die der Staubmasse m<sub>A</sub>(N+1) zur Ablagerung zur Verfügung steht, eingesetzt:

$$\Delta p_R(N) = \Delta p_A - \frac{\dot{V} * \eta * \alpha_K * m_A(N+1)}{\bar{A}_K (N+1)^2}$$
 12-5

 $\overline{A}_{K}(N+1)$ ...... mittlere Partikelabsetzfläche für den Kuchendruckverlust des (N+1)-ten Zyklus .. [m<sup>2</sup>] m<sub>A</sub>(N+1) ...... verantwortliche Staubmasse für den Kuchendruckverlust des (N+1)-ten Zyklus ... [kg]

#### 12.3.2.1 Anfiltrierte Staubmasse $m_A(N)$

Die während des (N)-ten Zyklus anfiltrierte Staubmasse  $m_A(N)$ , welche für den Kuchendruckverlust verantwortlich ist, ist das Produkt aus der Zyklusdauer  $t_Z(N)$  und den konstant gehaltenen Versuchsparametern Volumenstrom  $\dot{V}$  und Rohgaskonzentration c.

$$m_A(N) = \dot{V} * c * t_Z(N) = \dot{V} * c * t_1 * (N)^{-J_1}$$
  
12-6

| m <sub>A</sub> (N) | pro Zyklus anfiltrierte Staubmasse | [kg]                 |
|--------------------|------------------------------------|----------------------|
| Ý                  | Volumenstrom                       | $[m^3/s]$            |
| c                  | Rohgaskonzentration                | [kg/m <sup>3</sup> ] |

Die Staubmasse  $m_A(N)$  in Gleichung 12-5 ist jene Staubmasse die im N-ten Zyklus anfiltriert wird und damit den Kuchendruckverlust  $\Delta p_K(N)$  dieses Zyklus hervorruft. Für die Berechnung des Restdruckverlustes  $\Delta p_R(N)$  nach Gleichung 12-5 wird noch der Verlauf der mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_K(N)$  benötigt.

## 12.3.2.2 Mittlere Partikelabsetzfläche $\bar{A}_{K}(N)$

Zu Beginn der druckgesteuerten Filtration steht dem anfiltrierten Staub eine Fläche, die neben der Filteranströmfläche zusätzlich die hohe innere Faseroberfläche des Filtermediums umfasst, zur Partikelabsetzung zur Verfügung. Damit verteilt sich der Volumenstrom und damit die von ihm transportierten Partikel über eine große Partikelabsetzfläche, wodurch der mittlere auf die Zyklusdauer bezogene Kuchendruckverlustanstieg vergleichsweise gering ist (siehe Abbildung 12-3). Die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{K}(N)$  ist dabei größer als die Filteranströmfläche selbst. Durch die unvollständige Filtermittelregenerierung wird die innere Faseroberfläche des Filtermediums dauerhaft mit Staub belegt und steht demnach nicht mehr vollständig der Durchströmung und damit der Partikelabsetzung zur Verfügung. Der konstante Volumenstrom verteilt sich über eine kleinere Fläche und die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{K}(N)$  sinkt daher. Durch die Vernetzung des dauerhaft in den Schichten unterhalb der Filteroberfläche eingelagerten Staubes entstehen durch die Abreinigungs- und Filtrationszyklen bevorzugte Strömungskanäle, die lokal erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten mit sich bringen. Damit wird der konstante Volumenstrom über eine vergleichsweise geringere effektive Partikelabsetzfläche A(t) verteilt, wodurch ein Absinken der mit ihr nach Abbildung 11-6 bzw. Gleichung 11-6 korrelierenden mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{K}(N)$  unter die Filteranströmfläche erklärt werden kann. Innerhalb eines Zyklus können diese Strömungskanäle durch Staubablagerungen verstopfen. Dies bedeutet einen Strömungswiderstandsausgleich über das Filtermedium: Filterareale die wegen ihres vergleichsweise hohen Strömungswiderstandes bei vormals offenen Strömungskanälen nicht durchströmt worden sind, werden nach dem temporären Verstopfen der Strömungskanäle innerhalb eines Zyklus wieder durchströmt. Dies führt zu einem Ansteigen der effektiven Partikelabsetzfläche A(t) innerhalb eines Zyklus. Nach der folgenden Abreinigung werden die temporär verstopften Strömungskanäle größtenteils wieder freigeblasen. Vereinzelte von der Abreinigung nicht erfasste Partikelablagerungen in den Strömungskanälen bleiben allerdings zurück und verengen die Strömungskanäle dauerhaft. Die im Vergleich zum vorangegangenen Zyklus engeren Strömungskanäle wachsen nun innerhalb des Zyklus rascher zu. Der Strömungswiderstandsausgleich innerhalb des Zyklus erfolgt somit vergleichsweise schneller. Über den Zyklus gemittelt, verteilt die sich Strömungsgeschwindigkeit daher gleichmäßiger über die gesamte Partikelabsetzfläche, wodurch die effektive Partikelabsetzfläche im Mittel anwächst. Nach Abbildung 11-6 bzw. Gleichung 11-6 führt dies zu einem Anwachsen der mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{K}(N)$ . Im Falle der zeitgesteuerten Alterung hat diese Vergleichmäßigung der über den Zyklus gemittelten Strömungsgeschwindigkeitsverteilung ein Ansteigen der mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{K}(N)$ und damit ein Absinken des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens zur Folge. Da im

gegenständlichen Fall nicht die Zyklusdauer  $t_Z(N)$ , sondern der Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_A$ konstant gehalten wird, würde ein Ansteigen der mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{K}(N)$  eine Verlängerung der Zyklusdauer  $t_{Z}(N)$  zur Folge haben, da der Druckverlust innerhalb eines Zyklus vergleichsweise langsamer ansteigt wenn eine größere mittlere Partikelabsetzfläche kann  $\overline{A}_{K}(N)$ Verfügung steht. Dieses Verhalten in zur druckgesteuerten Laborfiltrationsversuchen nicht beobachtet werden. Der Restdruckverlustanstieg wirkt sich demnach stärker verkürzend auf die Zyklusdauer aus, als sich die Strömungsvergleichmäßigung verlängernd auf die Zyklusdauer auswirkt. Der auf die Zyklusdauer bezogene Druckverlustanstieg  $\Delta \dot{p}_{K}(N)$  durchläuft jedoch ein Maximum (Abbildung 12-3) aufgrund der beschriebenen Strömungsvergleichmäßigung. Mathematisch wird diesem Verhalten durch eine Parabelfunktion für die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{K}(N)$  Rechnung getragen. Somit lässt sich für die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{K}(N)$  in Abhängigkeit der Zyklenzahl N schreiben:

$$\bar{A}_{K}(N) = A_{0} * \left[ (N - N_{max})^{2} + j_{2} \right]$$
12-7

Zu Beginn der Filtration beinhaltet die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{K}(N)$  neben der Filteranströmfläche auch hohe innere Faseroberfläche des Filtermediums. Mit steigender Zyklenzahl nimmt die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{K}(N)$  durch das Ausbilden bevorzugter Strömungskanäle bis zum Erreichen einer minimalen Fläche bei maximalem auf die Zyklusdauer bezogenem mittlere Kuchendruckverlustanstieg bei N=N<sub>max</sub> ab (Abbildung 12-3). Dem nach obigen Überlegungen auftretenden Wiederanwachsen der mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{K}(N)$  nach Durchlaufen eines Minimums wird mit der Parabelform der Modellgleichung 12-7 Rechnung getragen.

Setzt man nun in Gleichung 12-5 die oben erarbeiteten Gleichungen für die abgereinigte Staubmasse  $m_C(N+1)$  und die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_K(N+1)$  ein, erhält man die Modellgleichung für den Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$  in Abhängigkeit der Zyklenzahl N:

$$\Delta p_R(N) = \Delta p_A - \frac{\dot{V} * \eta * \alpha_C * \dot{V} * c * t_1 * (N+1)^{-j_1}}{A_0^2 * [(N+1-N_{max})^2 + j_2]^2}$$
12-8

Fasst man die prozessspezifischen Konstanten  $\eta$ ,  $\alpha_C$ , c,  $t_1$  und  $A_0$  zusammen, lässt sich für den Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$  in Abhängigkeit der Zyklenzahl N mit  $j_0$  als zusammenfassender prozessspezifischer Konstanten vereinfacht schreiben:

$$\Delta p_R(N) = \Delta p_A - j_0 \frac{\dot{V}^2 * (N+1)^{-j_1}}{[(N+1-N_{max})^2 + j_2]^2}$$
12-9

j<sub>0</sub>.....zusammenfassende prozessspezifische Konstante ......[kg/m<sup>7</sup>]

Mit Gleichung 12-9 kann nun der Restdruckverlust bei druckgesteuerter Abreinigungsfiltration beschrieben werden. Dabei wird vom konstanten Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_A$  der durch den rechten Term dargestellte Kuchendruckverlust  $\Delta p_K(N+1)$  subtrahiert um nach Abbildung 12-1 den Restdruckverlust  $\Delta p_K(N)$  in Abhängigkeit der Zyklenzahl N zu erhalten. Im Zähler des rechten Terms ist im Wesentlichen die sinkende Masse des pro Zyklus anfiltrierten Kuchens beschrieben, im Nenner die mittlere Partikelabsetzfläche, die ein Minimum durchläuft.

## 13 VERGLEICH MODELL VS. EXPERIMENT

In diesem Abschnitt soll anhand repräsentativ gewählter Versuche gezeigt werden, dass sich mit den oben vorgestellten Modellen zur Beschreibung der Druckverlustentwicklung bei zeitgesteuerter Alterung und druckgesteuerter Filtration eine gute Übereinstimmung mit im Labor aufgenommenen Versuchswerten erreichen lässt.

Hierfür wurden die Modellgleichungen (zeitgesteuerte Alterung: Gleichungen 11-9 und 11-17; druckgesteuerte Filtration: Gleichungen 12-3 und 12-9) zunächst in die Software "OriginPro 8G" implementiert. Durch eine Software-interne iterative Prozedur wurden anschließend die prozessspezifischen Konstanten des Modells, ausgehend von geeigneten Startwerten, so lange variiert, bis eine Konvergenz erzielt wurde und sich minimale Fehlerquadrate zwischen Modell- und Versuchskurve ergeben haben (entsprechende prozessspezifische Konstanten, siehe Tabelle 12). Der Restdruckverlust der unbestaubten Filtermedien  $\Delta p_0$  wurde jeweils experimentell bestimmt.

## 13.1 Vergleich Modell vs. Experiment bei zeitgesteuerter Alterung

Im Folgenden werden repräsentativ ausgewählte Druckverlustverläufe aller sechs Teststaub/Filtermedium – Kombinationen, die sich aus den drei verwendeten Teststäuben (Abschnitt 6.4) und zwei Filtermedien (Abschnitt 6.6) bilden lassen, hinsichtlich der Übereinstimmung des Druckverlustverlaufes bei zeitgesteuerter Alterung von Versuch und Modell verglichen und diskutiert. Die Versuchsparameter sind bei allen sechs Teststaub/Filtermedium - Kombinationen ident.

In Abbildung 13-1 bis Abbildung 13-6 sind die Druckverlustverläufe während der zeitgesteuerten Alterung von sechs Versuchen in Form von grauen Linien auf der vertikalen Primärachse und der Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$  in Form grauer Punkte auf der vertikalen Sekundärachse jeweils in Abhängigkeit der Zyklenzahl N aufgetragen. Die mit Hilfe des Modells berechneten zugehörigen Druckverlustverläufe sind in schwarzer durchgezogener (Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$ ), strichpunktierter (Abreinigungsdruckverlust  $\Delta p_A(N)$ ) und strichlierter (Restdruckverlust  $\Delta p_R(N)$ ) Linie eingetragen.

Man entnimmt den gegenständlichen Abbildungen eine im Wesentlichen gute Übereinstimmung von Versuchsdaten und mittels Modell errechneten Werten. Bemerkenswert dabei ist die unterschiedliche Morphologie der Verläufe des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{C}(N)$  bei den sechs Teststaub/Filtermedium - Kombinationen. Während bei Verwendung des Pural NF - Teststaubes in Verbindung mit dem PI - Nadelfilzfiltermedium (Abbildung 13-1) der schon in Abschnitt 10 diskutierte Verlauf mit Durchschreiten eines Maximums, der auf eine Strömungsvergleichmäßigung während der Alterung zurückgeführt werden kann, feststellbar ist, verhält sich dies bei Verwendung eines vergleichsweise feinkörnigeren CaCO<sub>3</sub> - Teststaubes (Abbildung 13-2) und eines vergleichsweise grobkörnigeren Pural SB - Teststaubes

(Abbildung 13-3) gänzlich anders.

| Filtermedium:               | PI - Nadelfilzfiltermedium         |
|-----------------------------|------------------------------------|
| Teststaub:                  | Pural NF ( $d_{50,3} = 8,6\mu m$ ) |
| Zyklusdauer:                | 100 s                              |
| Tankdruck:                  | 0,5 MPa                            |
| Ventilöffnungszeit:         | 80 ms                              |
| Rohgaskonzentration:        | 5,5 g/m <sup>3</sup>               |
| Filtrationsgeschwindigkeit: | 2,4 m/min                          |
|                             |                                    |



Abbildung 13-1: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust, Abreinigungsdruckverlust und Druckverlust des abgereinigten Kuchens; PI - Nadelfilzfiltermedium mit Pural NF - Teststaub

feinkörnigeren CaCO<sub>3</sub> - Teststaubes in Im Fall des Verbindung mit dem PI -Nadelfilzfiltermedium, steigt der Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{C}(N)$  degressiv an. Dies deutet darauf hin, dass die pro Zyklus abgereinigte Staubmasse, welche für den Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{\rm C}(N)$  verantwortlich ist, während des Versuches ständig im Anstieg begriffen ist. Bevor es zum in Abbildung 13-1 gezeigten Durchlaufen eines Maximums des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{C}(N)$  kommt, welches durch die in Abschnitt 10.2.2.2 beschriebene Strömungsvergleichmäßigung verursacht wird, verstopft das Filtermedium vollständig. Das dabei auftretende Patchy Cleaning an der Oberfläche des Filtermediums und die damit verbundene unvollständige Abreinigung des Staubkuchens begünstigen dieses vorzeitige Verstopfen des Filtermediums. Die mittleren Partikelabsetzflächen  $\overline{A}_R(N)$  und  $\overline{A}_C(N)$  nehmen dabei stetig ab. Das raschere Verstopfen des
vergleichsweise rauen, offenporigen PI - Nadelfilzfiltermediums bei Verwendung des CaCO<sub>3</sub> - Teststaubes verglichen mit Pural NF - Teststaub, lässt sich auf die erhöhte Agglomerationsund Haftneigung des feinkörnigeren CaCO<sub>3</sub> - Teststaubes zurückführen.



Abbildung 13-2: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust, Abreinigungsdruckverlust und Druckverlust des abgereinigten Kuchens; PI - Nadelfilzfiltermedium mit CaCO<sub>3</sub> - Teststaub

Wiederum ein gänzlich anderes Verhalten zeigt sich bei der Verwendung eines vergleichsweise grobkörnigeren Pural SB - Teststaubes in Kombination mit dem PI - Nadelfilzfiltermedium, dargestellt in Abbildung 13-3. Der Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$  steigt hier progressiv über die Zyklenzahl an. Das Ansteigen selbst deutet auf eine wachsende Masse des abgereinigten Kuchens hin. Die Form des progressiven Anstiegs kann hingegen auf das frei fließende Verhalten des Pural SB - Teststaubes zurückgeführt werden. Anstatt wie die vergleichsweise kohäsiveren, feinkörnigeren Teststäube Staubbrücken auszubilden, die den Staub davon abhalten tief in das Filtermedium vorzudringen, gelangt der frei fließende Pural -Teststaub in die Tiefe des Filtermediums und verstopft somit auch die Strömungskanäle. Dies hat ein stetiges Sinken der mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_C(N)$  zur Folge, womit der progressive Anstieg des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$  erklärt werden kann.



Abbildung 13-3: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust, Abreinigungsdruckverlust und Druckverlust des abgereinigten Kuchens; PI - Nadelfilzfiltermedium mit Pural SB - Teststaub

Dagegen weisen die Versuche mit dem Membranfiltermedium und den drei verwendeten Teststäuben (Abschnitt 6.4) eine relativ einheitliche Morphologie bezüglich des Druckverlustverhaltens auf (Abbildung 13-4 bis Abbildung 13-5). Im Wesentlichen kann beim CaCO<sub>3</sub> - und Pural NF - Teststaub ein rasches Ansteigen des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{\rm C}(N)$  auf ein konstantes Niveau beobachtet werden. Dies liegt an der glatten, wenigen porösen Oberfläche des Membranfiltermediums, die eine vermehrte Einlagerung von Staub in der Tiefe des Filtermediums hintanhält. Somit erreichen die abgereinigte Staubmasse und damit auch der Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{\rm C}({\rm N})$  rasch ein hohes, konstantes Niveau. Da das Membranfiltermedium eine vergleichsweise glatte und homogene Oberflächenstruktur aufweist, welche eine gleichmäßige und relativ vollständige Regeneration des Filtermediums fördert, ist auch keine wesentliche Ab- oder Zunahme des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens aufgrund von Änderungen der Anströmsituation zu beobachten. Die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$  bleibt dabei weitestgehend konstant.



Abbildung 13-4: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust, Abreinigungsdruckverlust und Druckverlust des abgereinigten Kuchens; Membranfiltermedium mit Pural NF - Teststaub

| Filtermedium:               | Membranfiltermedium             |
|-----------------------------|---------------------------------|
| Teststaub:                  | $CaCO_3 (d_{50,3} = 3,1 \mu m)$ |
| Zyklusdauer:                | 100 s                           |
| Tankdruck:                  | 0,5 MPa                         |
| Ventilöffnungszeit:         | 80 ms                           |
| Rohgaskonzentration:        | 5,5 g/m <sup>3</sup>            |
| Filtrationsgeschwindigkeit: | 2,4 m/min                       |



Abbildung 13-5: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust, Abreinigungsdruckverlust und Druckverlust des abgereinigten Kuchens; Membranfiltermedium mit CaCO<sub>3</sub> - Teststaub

Ein etwas differenziertes Bild ergibt sich bei der Verwendung des vergleichsweise grobkörnigeren Pural SB - Teststaubes. Wieder steigt der Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{\rm C}(N)$  rasch an, erreicht dann jedoch kein konstantes Niveau und durchläuft ein Maximum. Der rasche Anstieg des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{\rm C}(N)$  zu Beginn des Versuches kann mit einer steigenden abgereinigten Staubmasse erklärt werden; der weitere Anstieg nach Abschnitt 10.2.2.2 mit einer abnehmenden mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$  durch eine vergleichsweise unvollständigere, unregelmäßigere Abreinigung des Pural -Teststaubes. Dies ist nach [23] auf die vergleichsweise breitere Korngrößenverteilung des Pural SB-Teststaubes zurückzuführen, welche eine inhomogenere Struktur betreffend die Kuchenfestigkeit zur Folge hat. Bei der Abreinigung wird der Kuchen an Stellen mit geringer Kuchenfestigkeit tendenziell weiter entfernt von der Oberfläche des Filtermediums abgeworfen, wodurch Staubablagerungen am Filtermedium zurückbleiben und so für eine inhomogene Anströmsituation sorgen. Dies wird im Modell durch eine sinkende mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$  berücksichtigt. Jene Stellen, die noch vollständig abgereinigt worden sind, werden in weiterer Folge bevorzugt durchströmt, wodurch auch auf diesen Flächen nach und nach Staub dauerhaft haften bleibt. Dies ist gleichbedeutend mit einem Strömungsausgleich, wodurch der Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{\rm C}(N)$  sinkt und damit ein Maximum durchläuft. Dies wird im Modell durch ein Ansteigen der Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$  berücksichtigt.

| Filtermedium:               | Membranfiltermedium                  |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| Teststaub:                  | Pural SB ( $d_{50,3} = 51,1 \mu m$ ) |
| Zyklusdauer:                | 100 s                                |
| Tankdruck:                  | 0,5 MPa                              |
| Ventilöffnungszeit:         | 80 ms                                |
| <b>Rohgaskonzentration:</b> | 5,5 g/m <sup>3</sup>                 |
| Filtrationsgeschwindigkeit: | 2,4 m/min                            |
|                             |                                      |



Abbildung 13-6: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust, Abreinigungsdruckverlust und Druckverlust des abgereinigten Kuchens; Membranfiltermedium mit Pural SB - Teststaub

In Tabelle 12 sind die, zur Berechnung der in Abbildung 13-1 bis Abbildung 13-6 wiedergegebenen Modellkurven verwendeten, prozessspezifischen Konstanten aufgelistet. Um eine größtmögliche Übereinstimmung zwischen Versuch und Modell zu erzielen, wurden die prozessspezifischen Paramter der Modellgleichungen für den Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{C}(N)$  und des Restdruckverlustes  $\Delta p_{R}(N)$  getrennt voneinander an die jeweiligen Versuchsdaten angepasst. Daher scheint der sowohl zur Berechnung des Druckverlustes des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{C}(N)$ , als auch des Restdruckverlustes  $\Delta p_{R}(N)$  verwendete Wert für k<sub>1</sub> (bzw. k<sub>1</sub><sup>c</sup>) zweimal in Tabelle 12 auf.

| Teststaub<br>Filtermedium                    | prozessspez.<br>Konst. | CaCO <sub>3</sub><br>Membran | Pural NF<br>Membran | Pural SB<br>Membran | Pural NF<br>PI | CaCO3<br>PI | Pural SB<br>PI |
|--|------------------------|------------------------------|---------------------|---------------------|----------------|-------------|----------------|
|  | N <sub>max</sub>       | 900                          | 500                 | 125                 | 160            | 50          | 120            |
|  | $\mathbf{k}_0$         | 1,79E+16                     | 4,27E+15            | 3,64E+11            | 1,17E+12       | 4,39E+12    | 4,67E+09       |
| $\Delta \mathbf{p}_{\mathrm{C}}(\mathbf{N})$ | $\mathbf{k}_1$         | 0,65                         | 0,62                | 0,57                | 0,17           | 0,07        | 0,25           |
|  | $\mathbf{k}_2$         | 1,57E+07                     | 7,69E+06            | 7,05E+04            | 1,05E+05       | 7,50E+03    | 5,61E+03       |
| $\Delta \mathbf{p}_{\mathbf{R}}(\mathbf{N})$ | k <sub>1</sub> '       | 8,27E-03                     | 1,53E-02            | 2,85E-02            | 1,29E-02       | 1,13E-01    | 5,63E-02       |
|  | k <sub>3</sub>         | 2,29E-02                     | 2,14E-02            | 5,83E-05            | 2,69E-04       | 4,35E-05    | 2,96E-02       |
|  | $k_4$                  | 1,00E-08                     | 5,34E-08            | 6,88E-06            | 6,15E-06       | 3,35E-04    | 4,86E-05       |
|  | k5                     | 1,86E+03                     | 1,72E+03            | 1,41E+06            | 1,34E+05       | 2,14E+05    | 2,17E+02       |

 Tabelle 12: Prozessspezifische Konstanten f

 Versuche mit unterschiedlichen Filtermedien und Testst

 versuchsbedingungen (siehe Legenden Abbildung 13-1 bis Abbildung 13-6)

Da die prozessspezifischen Konstanten in obiger Tabelle bei identen Versuchsparametern (siehe Legenden Abbildung 13-1 bis Abbildung 13-6) aufgenommen wurden, kann aus einzelnen Werten grob das Verstopfungs- und Filtrationsverhalten der einzelnen Versuche abgelesen werden.

Für den Druckverlust des abgereinigten Kuchens ist beispielsweise der Wert des Staubmassenkoeffizienten  $k_1$  von entscheidender Bedeutung. Nach Gleichung 11-5 beschreibt  $k_1$  wie rasch die maximal pro Zyklus abgereinigte Staubmasse und damit auch die pro Zyklus haften bleibende Staubmasse in Abhängigkeit der Zyklenzahl konstant bleiben. Ein vergleichsweise hoher Wert für  $k_1$  bedeutet, dass dieser quasistationäre Zustand der konstant abgereinigten bzw. haften bleibenden Staubmassen schnell erreicht wird. Dies ist vor allem beim Membranfiltermedium der Fall, da hier praktisch keine Tiefenfiltration, welche das Ausbilden des Zustandes der pro Zyklus konstant abgereinigten bzw. haften bleibenden Staubmassen schnell erreicht wird. Dies ist vor allem beim Membranfiltermedium der Fall, da hier praktisch keine Tiefenfiltration, welche das Ausbilden des Zustandes der pro Zyklus konstant abgereinigten bzw. haften bleibenden Staubmassen verzögert, vorhanden ist.

Das Verhältnis des Wertes der prozessspezifischen Konstanten  $k_2$ , dem Flächenkoeffizient, zum Wert des quadratischen Terms  $(N-N_{max})^2$  in Gleichung 11-7, bildet den Grad der Strömungsvergleichmäßigung während des Filtrationsversuches ab (siehe Abschnitt 10.2.2.2). Je höher der Wert von  $k_2$  im Vergleich zum quadratischen Term  $(N-N_{max})^2$  ist, desto konstanter ist die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_C(N)$ . Dies ist beispielsweise im Fall des Membran-filtermediums mit CaCO<sub>3</sub> - und Pural NF - Teststaub feststellbar. Die vergleichsweise konstante mittlere Partikelabsetzfläche sorgt hierbei im Mittel für einen ebenfalls vergleichsweise konstanten Druckverlust des abgereinigten Kuchens.

Der Restdruckverlustverlauf wird hingegen vom Wert der prozessspezifischen Konstanten k<sub>4</sub>, dem Verstopfungskoeffizient, maßgeblich beeinflusst. Laut Gleichung 11-15 beschreibt k<sub>4</sub> in Abhängigkeit der Zyklenzahl wie schnell die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_R(N)$ , welche für den Restdruckverlustverlauf verantwortlich ist, durch die zunehmende Verstopfung des Filtermediums während der Alterung abnimmt. Aus den niedrigen Werten für k<sub>4</sub> im Falle des Membranfiltermediums in Kombination mit dem CaCO<sub>3</sub> - und Pural NF - Teststaub lässt sich demnach eine geringe Verstopfungsneigung dieser Teststaub/Filtermedium mit Pural SB - Teststaub und dem PI - Nadelfilzfiltermedium mit Pural NF - Teststaub gegeben. Eine hohe Verstopfungsneigung kann hingegen beim PI - Nadelfilzfiltermedium mit CaCO<sub>3</sub> - und Pural SB - Teststaub beobachtet werden.

Die übrigen prozessspezifischen Konstanten beinhalten unter anderem die Viskosität der Luft  $\eta$ , den spezifischen (Staub-)Kuchenwiderstand  $\alpha$  und eine Hilfsfläche A und sind in Abschnitt 14.1 näher erklärt.

#### 13.2 Vergleich Modell vs. Experiment bei druckgesteuerter Filtration

Im Folgenden soll demonstriert werden, dass mit dem in Abschnitt 12 erarbeiteten Modell der Druckverlust- sowie Zykluszeitverlauf bei druckgesteuerter Abreinigungsfiltration in Abhängigkeit von der Zyklenzahl nachgebildet werden kann. Hierfür wurden die Modellgleichungen 12-3 und 12-9 zunächst in die Software "OriginPro 8G" implementiert. Mit Hilfe des Software-internen Kurvenfitalgorithmus wurden die prozessspezifischen Paramter an die jeweiligen Versuchsdaten angepasst. Die daraus erhaltenen Modell-Kurven sind in der folgenden Abbildung im Vergleich zu den aus einem Versuch erhaltenen Daten dargestellt.



Abbildung 13-7: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; PI - Nadelfilzfiltermedium mit Pural NF - Teststaub

Abbildung 13-7 zeigt den Verlauf der Zyklusdauer  $t_Z(N)$  sowie des Restdruckverlustes  $\Delta p_R(N)$ in Abhängigkeit der Zyklenzahl N eines Versuches mit druckgesteuerter Abreinigung. Der Vergleich der Modellkurven mit den aus Versuchen erhaltenen Datenpunkten zeigt eine gute Übereinstimmung über die gesamte Versuchsdauer. Für die zugehörigen prozessspezifischen Konstanten siehe Anhang, Tabelle 13.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Versuchsserie mit druckgesteuerter Abreinigung und einer Variation der Abreinigungsparamter Tankdruck und Ventilöffnungszeit durchgeführt, um das in Abschnitt 12 erarbeitete Modell auf seine Gültigkeit hin zu überprüfen. Im Anhang (Abschnitt 16) finden sich die entsprechenden Abbildungen (Abbildung 16-27 bis Abbildung 16-42) für

den Vergleich von Versuchs- mit Modelldaten, welche eine gute Übereinstimmung zeigen. Die zugehörigen prozessspezifischen Parameter sind in Tabelle 13 angeführt.

Die Berechnungsformeln für die Zyklusdauer  $t_Z(N)$ , sowie des Restdruckverlustes  $\Delta p_R(N)$ beinhalten jeweils die prozessspezifische Konstante  $j_1$ . Da die beiden Gleichungen (12-3 für  $t_Z(N)$  und 12-9 für  $\Delta p_R(N)$ ) unabhängig voneinander an die jeweiligen aus Laborversuchen erhaltenen Werte gefittet wurden, um optimale Übereinstimmung von Versuchs- und Modellwerten zu erhalten, enthält Tabelle 13 zwei Spalten für  $j_1$ , bzw.  $j_1$  für  $t_Z(N)$  und  $j_1$ ' für  $\Delta p_R(N)$ .

Tabelle 13: Prozessspezifische Konstanten für Versuche mit unterschiedlichen Tankdrücken/Ventilöffnungszeiten eines PI -Nadelfilzfiltermediums mit Pural NF als Teststaub, einem Abreinigungsdruck von 10 hPa, einer Rohgaskonzentration von5,5 g/m³ und einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2,7 m/min

| prozessspezifische Konstante<br>Tankdruck/Ventilöffnungszeit | t1  | j <sub>1</sub> | jo      | j1'  | N <sub>max</sub> | j <sub>2</sub> |
|--|-----|----------------|---------|------|------------------|----------------|
| 1bar/150ms   | 728 | 2,82           | 9,8E+13 | 0,81 | 5                | 3,0E+06        |
| 2bar/60ms  | 711 | 2,56           | 1,1E+14 | 1,01 | 5                | 2,9E+06        |
| 2bar/100ms   | 670 | 1,53           | 1,1E+14 | 0,65 | 5                | 2,6E+06        |
| 2bar/150ms   | 652 | 1,34           | 1,0E+14 | 0,60 | 5                | 2,5E+06        |
| 3bar/60ms  | 660 | 1,42           | 3,1E+06 | 0,10 | 2                | 6,0E+02        |
| 3bar/100ms   | 609 | 0,96           | 1,1E+14 | 0,53 | 5                | 2,4E+06        |
| 3bar/150ms   | 515 | 0,68           | 1,9E+12 | 0,40 | 50               | 3,3E+05        |
| 4bar/60ms  | 584 | 0,82           | 1,1E+14 | 0,43 | 5                | 2,6E+06        |
| 4bar/100ms   | 574 | 0,60           | 1,0E+13 | 0,28 | 50               | 7,8E+05        |
| 4bar/150ms   | 502 | 0,52           | 3,7E+13 | 0,18 | 50               | 1,7E+06        |
| 5bar/60ms  | 496 | 0,53           | 2,5E+12 | 0,21 | 5                | 4,2E+05        |
| 5bar/100ms   | 568 | 0,50           | 1,8E+14 | 0,15 | 50               | 3,7E+06        |
| 5bar/150ms   | 464 | 0,47           | 1,1E+14 | 0,14 | 50               | 2,9E+06        |
| 6bar/60ms  | 521 | 0,54           | 5,7E+11 | 0,13 | 50               | 2,1E+05        |
| 6bar/100ms   | 593 | 0,46           | 5,2E+14 | 0,15 | 50               | 5,9E+06        |
| 6bar/150ms   | 591 | 0,44           | 8,7E+14 | 0,12 | 50               | 8,2E+06        |

# 14 EXTRAPOLATION DER PROZESSSPEZIFISCHEN PARAMETER FÜR DIE HOCHRECHNUNG DES DRUCKVERLUSTVERLAUFES BEI ZEITGESTEUERTER ABREINIGUNG

Rahmen dieser Arbeit Das im vorgestellte Modell Beschreibung der zur Druckverlustentwicklung bei zeitgesteuerter und druckgesteuerter Abreinigungsfiltration soll die Basis für zukünftige Hochrechnungen von Druckverlustverläufen sein. Das Ziel hierbei ist von Druckverlustverläufen bei hohen Filtrationsgeschwindigkeiten, welche ein vergleichsweise rascheres Verstopfen des jeweiligen Filtermediums zur Folge haben, auf Druckverlustverläufe bei niedrigeren Filtrationsgeschwindigkeiten, die ein vergleichsweise langsamers Verstopfen des jeweiligen Filtermediums zur Folge haben, hochzurechnen. Damit sollen die langwierigen Versuche bei niedrigen Filtrationsgeschwindigkeiten durch zeitsparende Extrapolationen bzw. Hochrechnungen ersetzt werden.

In diesem Abschnitt wird eine mögliche Vorgehensweise zur Hochrechnung eines Druckverlustverlaufes bei unterschiedlicher Filtrationsgeschwindigkeit und zeitgesteuerter Abreinigung vorgestellt. Die Grundlage für die Hochrechnung eines Druckverlustverlaufes stellen dabei Versuche mit variabler Filtrationsgeschwindigkeit bei sonst identen Versuchsparametern dar. Die zu den Einzelversuchen mit verschiedenen Filtrationsgeschwindigkeiten zugehörigen prozessspezifischen Parameter des in Abschnitt 11 vorgestellten Modells werden bestimmt und deren Abhängigkeit der von Filtrationsgeschwindigkeit diskutiert. Diese Abhängigkeit der prozessspezifischen Parameter von der Filtrationsgeschwindigkeit wird hernach in empirischen Gleichungen formuliert. Mit Hilfe dieser Gleichungen können dann die prozessspezifischen Paramter für andere Filtrationsgeschwindigkeiten extrapoliert werden. Die so erhaltenen neuen prozessspezifischen Parameter werden wiederum in die Modellgleichungen eingesetzt, um den Druckverlustverlauf für andere Filtrationsgeschwindigkeiten zu erhalten.

Die prozessspezifischen Parameter der Modellgleichungen mit denen die jeweiligen Druckverlustverläufe der Basisversuche (verschiedene Filtrationsgeschwindigkeiten bei sonst identen Versuchsparametern) beschrieben werden können, wurden mit Hilfe der Software "OriginPro 8G" ermittelt und sind in Tabelle 14 wiedergegeben. Der Filtrationsgeschwindigkeitsbereich erstreckt sich dabei von 2,1-2,5 m/min.

| Filtrations                                  | geschwindigkeit        |       |       |       |       |
|--|------------------------|-------|-------|-------|-------|
| [m/min]                                      |                        | 2,1   | 2,2   | 2,4   | 2,5   |
|  | prozessspez. Konstante |       |       |       |       |
|  | $\mathbf{N}_{max}$     | 475   | 420   | 158   | 140   |
| Am (NI)                                      | $\mathbf{k}_0$         | 2E+14 | 5E+13 | 1E+12 | 4E+11 |
| $\Delta \mathbf{p}_{\mathbf{C}}(\mathbf{N})$ | $\mathbf{k}_1$         | 5E-02 | 6E-02 | 2E-01 | 2E-01 |
|  | $\mathbf{k}_2$         | 1E+06 | 7E+05 | 1E+05 | 5E+04 |
|  | $\mathbf{k}_{1'}$      | 5E-03 | 6E-03 | 1E-02 | 2E-02 |
| 4 m (NI)                                     | k3                     | 3E-05 | 3E-05 | 3E-04 | 6E-04 |
| $\Delta \mathbf{p}_{\mathbf{R}}(\mathbf{N})$ | k4                     | 5E-07 | 9E-07 | 6E-06 | 1E-05 |
|  | k5                     | 1E+06 | 1E+06 | 1E+05 | 5E+04 |

| Tabelle 14: Tabelle der durch Kurvenanpassung in , | "OrigiPro 8G" erhaltenen  | prozessspezifischen   | Konstanten    | (Pural NF |
|--|---------------------------|-----------------------|---------------|-----------|
| mit PI - Nadelfilzfiltermedium bei verschiedenen   | n Filtrationsgeschwindigk | eiten und zeitgesteue | erter Abreini | gung)     |

Man beobachtet in Tabelle 14 durchgehende Trends bei der Entwicklung der Werte der einzelnen prozessspezifischen Konstanten mit zunehmender Filtrationsgeschwindigkeit. Im Folgenden soll der Verlauf dieser Werte der einzelnen prozessspezifischen Konstanten in Abhängigkeit der Filtrationsgeschwindigkeit erklärt werden.

#### 14.1 Verlauf der prozessspezifischen Paramter bei Variation der Filtrationsgeschwindigkeit

Die zusammenfassende prozessspezifische Konstante  $k_0$  enthält die Viskosität der Luft  $\eta$ , den mittleren spezifischen Kuchenwiderstand  $\alpha_C$ , die maximal abgereinigte Staubmasse  $m_{C,max}$  (alle drei im Zähler) und die Hilfsfläche A im Nenner (vergl. Gleichung 11-8 und 11-9). Das Sinken von  $k_0$  mit zunehmender Filtrationsgeschwindigkeit bei sonst identen Versuchsparametern ist auf das Ansteigen der Hilfsfläche A zurückzuführen, welche direkten Einfluss auf die mittlere Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_C(N)$  hat. Das Sinken von  $k_0$  mit zunehmender Filtrationsgeschwindigkeit steht demnach für ein Ansteigen der Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_C(N)$ . Dies kann mit der bei steigender Filtrationsgeschwindigkeit und gleich gehaltener Staubkonzentration, ebenfalls steigenden Staubmasse die pro Zeit an das Filtermedium gelangt, erklärt werden. Je höher der Staubmassenstrom ist, der anfiltriert wird, desto rascher werden bevorzugte Strömungskanäle durch Brückenbildung blockiert, wodurch sich der konstante Volumenstrom über eine vergleichsmäßig größere Fläche verteilt. Dies wird im Modell durch ein Ansteigen der mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_C(N)$  berücksichtigt. Dass bei steigender Filtrationsgeschwindigkeit durch das Ansteigen der mittleren Partikelabsetzfläche dennoch kein geringerer Druckverlust des abgereinigten Kuchens zu konstatieren ist, hängt mit der steigenden Gesamtstaubmasse und der höheren Filtrationsgeschwindigkeit zusammen, die den Effekt der steigenden mittleren Partikelabsetzfläche überkompensieren.

Die prozessspezifischen Konstante  $k_1$ , der Staubmassenkoeffizient, beschreibt gemäß Gleichung 11-5 wie rasch die pro Zyklus abgereinigte Staubmasse  $m_C(N)$  konstant bleibt bzw. ihr Maximum erreicht. Das Steigen von  $k_1$  bei zunehmender Filtrationsgeschwindigkeit kann auf die vergleichsweise höheren Staubmassenströme bei höheren Filtrationsgeschwindigkeiten zurückgeführt werden. Die Strömungsschattenstellen, die für den Staub im Inneren des Filtermediums zugänglich sind, werden umso schneller gefüllt, je höher der anfiltrierte Staubmassenstrom ist. Die Filtration wird somit bei steigender Filtrationsgeschwindigkeit und den damit verbundenen höheren Staubmassenströmen rascher an die Oberfläche des Filtermediums getrieben. Dadurch stellt sich vergleichsweise rascher ein quasistationärer Zustand, betreffend den Anteil des abgereinigten bzw. haften bleibenden Staubes an der gesamt pro Zyklus anfiltrierten Staubmasse, ein.

Über die Höhe des Wertes der prozessspezifischen Konstanten k<sub>2</sub> wird in Gleichung 11-7 der quadratische Anteil  $(N-N_{max})^2$  an der gesamten mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_{C}(N)$  gesteuert. Je höher  $k_2$  im Vergleich zum quadratischen Term  $(N-N_{max})^2$  ist, desto weniger ausgeprägt ist die in Abschnitt 10.2.2.2 diskutierte Strömungsvergleichmäßigung während der Alterung bzw. desto konstanter ist die mittlere Partikelabsetzfläche während der Alterung. Wenn, wie im Fall (variable Filtrationsgeschwindigkeit bei gegenständlichen sonst identen Versuchsparamtern) der Mechanismus der Strömungsvergleichmäßigung bei allen Versuchen ähnlich ausgeprägt ist, muss das Verhältnis von  $k_2$  und dem quadratischen Term  $(N-N_{max})^2$ annähernd konstant sein. Damit nimmt der Wert von k2 im Wesentlichen aufgrund der sinkenden Zyklenzahl bei höheren Filtrationsgeschwindigkeiten ab.

In die Berechnung des Restdruckverlustes fließen die prozessspezifischen Konstanten  $k_1$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ und  $k_5$  ein. Für eine Erklärung zu  $k_1$ , sei auf obige Ausführungen zu  $k_1$  verwiesen. Der Grundsätzliche Verlauf von  $k_1$ , bei Variation der Filtrationsgeschwindigkeit ist analog zu  $k_1$ . Die unterschiedlichen Werte von  $k_1$  und  $k_1$ , sind auf die getrennte Anpassung der Modellfunktionen für den Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_C(N)$ , sowie des Restdruckverlustes  $\Delta p_R(N)$  auf die jeweiligen Versuchsdaten zurückzuführen.

Das Ansteigen der zusammenfassenden prozessspezifischen Konstanten  $k_3$  bei wachsender Filtrationsgeschwindigkeit weist darauf hin, dass der in  $k_3$  enthaltene Term  $m_A-m_{C,max}$ (vergleiche Gleichung 11-16 und 11-17), welcher für die minimal pro Zyklus am und im Filtermedium haften bleibenden Staubmasse steht, welche sich nach Abklingen der anfänglichen Tiefenfiltrationsphase einstellt (siehe Abschnitt 11.4.1), ebenfalls anwächst. Dies ist gleichbedeutend mit einem rascher ansteigenden Restdruckverlust. Durch die bei höheren Filtrationsgeschwindigkeiten vergleichsweise höheren Abreinigungsdrücke und dem damit einhergehenden größeren Unterdruck auf der Reingasseite, fällt die abreinigende Wirkung des reingasseitig eingeblasenen Abreinigungsdruckstoßes (konstante Ventilöffnungszeit und Tankdruck) vergleichsweise geringer aus, wodurch eine vergleichsweise höhere Staubmasse pro Zyklus am Filtermedium haften bleibt. Dies erklärt das Ansteigen des Wertes der prozessspezifischen Konstanten k<sub>3</sub> mit wachsender Filtrationsgeschwindigkeit.

Die Höhe des Wertes der prozessspezifischen Konstante  $k_4$ , dem Verstopfungskoeffizienten, steuert laut Gleichung 11-7 die Geschwindigkeit der Abnahme, der die zunehmende Filtermediumsverstopfung modellierenden mittleren Partikelabsetzfläche  $\overline{A}_R(N)$ . Das raschere vollständige Verstopfen bei höheren Filtrationsgeschwindigkeiten führt demnach zu einem Ansteigen des Wertes für  $k_4$ .

Vergleicht man Gleichung 11-16 mit Gleichung 11-17 wird ersichtlich, dass die zusammenfassende prozessspezifische Konstante  $k_5$  den Term  $m_A$ - $m_{C,max}$  im Nenner enthält, der wie oben erklärt mit zunehmender Filtrationsgeschwindigkeit steigt. So kann das Sinken von  $k_5$  mit zunehmender Filtrationsgeschwindigkeit erklärt werden.

# 14.2 Extrapolation der prozessspezifischen Paramter in Abhängigkeit der Filtrationsgeschwindigkeit

Auf diesen Überlegungen basierend wurden die in Tabelle 14 wiedergegebenen Verläufe der einzelnen prozessspezifischen Konstanten in einem Tabellenkalkulationsprogramm empirisch durch Potenzfunktionen angenähert (Gleichung 14-1). Dabei ist ein Bereich der Filtrationsgeschwindigkeit von 2, 1 - 2, 5 m/min erfasst.

$$prozessspezifische Konstante = A * e^{B*Filteranströmgeschwindigkeit}$$
 14-1

Die Paramter A und B dieser Potenzfunktionen für den Verlauf jeder prozessspezifischen Konstante sind in Tabelle 15 wiedergeben.

| Paramter A und B<br>prozessspez. Konstante | А        | В       |
|--|----------|---------|
| N <sub>max</sub>                           | 6,74E+05 | -3,421  |
| k <sub>0</sub>                             | 1,54E+29 | -16,300 |
| <b>k</b> 1                                 | 8,50E-06 | 4,081   |
| <b>k</b> <sub>2</sub>                      | 5,69E+13 | -0,833  |
| k1'  | 1,54E-06 | 3,774   |
| k3   | 1,97E-12 | 7,769   |
| <b>k</b> 4                                 | 1,10E-14 | 8,359   |
| k5   | 3,49E+14 | -9,045  |

| Tabelle 15: Paramter A | A und B der 1 | Potenzfunktionen zu | ir Berechnung der | prozessspezifischen Paramter |
|------------------------|---------------|---------------------|-------------------|------------------------------|
|                        |               |                     |                   |                              |

Um nun auf einen Druckverlustverlauf eines Versuches mit einer Filtrationsgeschwindigkeit von beispielsweise 2,0 m/min hochrechnen zu können, wurden die dafür nötigen einzelnen prozessspezifischen Konstanten mit Hilfe der Potenzfunktion (Gleichung 14-1) und den jeweiligen Parametern A und B (Tabelle 15) extrapoliert. Die so durch Extrapolation erhaltenen prozessspezifischen Konstanten für eine Filtrationsgeschwindigkeit von 2,0 m/min sind in Tabelle 16 angeführt.

Tabelle 16: Mit Hilfe von Gleichung 14-1 und den in Tabelle 15 angegebenen zugehörigen Gleichungsparametern A und B extrapolierten Werte für die prozessspezifischen Konstanten bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2 m/min

| Filtrationsgeschwindigkeit<br>[m/min]<br>prozessspez. Konstante | 2,0 - extrapoliert |
|---|--------------------|
| N <sub>max</sub>  | 719                |
| k <sub>0</sub>  | 1,05E+15           |
| k <sub>1</sub>  | 2,80E-02           |
| <b>k</b> <sub>2</sub>   | 3,31E+06           |
| k1'   | 2,92E-03           |
| k <sub>3</sub>  | 1,10E-05           |
| k4  | 2,00E-07           |
| k5  | 4 <b>,</b> 86E+06  |

#### 14.3 Vergleich der Druckverlustverläufe Hochrechnung vs. Versuch

Diese extrapolierten Werte (Tabelle 16) der prozessspezifischen Konstanten für eine Filtrationsgeschwindigkeit von 2,0 m/min wurden in die entsprechenden Modellgleichungen für den Druckverlust des abgereinigten Kuchens  $\Delta p_{C}(N)$  (Gleichung 11-9) und des Restdruckverlustes  $\Delta p_{R}(N)$  (Gleichung 11-17) eingesetzt. Die so erhaltenen Verläufe für den Druckverlust des abgereinigten Kuchens (durchgezogene schwarze Linie) und des Restdruckverlustes (gestrichelte schwarze Linie), jeweils in Abhängigkeit der Zyklenzahl, sind in Abbildung 14-1 eingetragen. Zum Vergleich sind die Versuchswerte für die jeweiligen Druckverlustteile eingetragen.

| Filtermedium:               | PI - Nadelfilzfiltermedium         |
|-----------------------------|------------------------------------|
| Teststaub:                  | Pural NF ( $d_{50,3} = 8,6\mu m$ ) |
| Zyklusdauer:                | 100 s                              |
| Tankdruck:                  | 0,5 MPa                            |
| Ventilöffnungszeit:         | 80 ms                              |
| Rohgaskonzentration:        | 5,5 g/m <sup>3</sup>               |
| Filtrationsgeschwindigkeit: | 2,0 m/min                          |



Abbildung 14-1: Vergleich hochgerechnetes Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Druckverlust des abgereinigten Kuchens; PI - Nadelfilzfiltermedium mit Pural NF - Teststaub bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2 m/min

Man erkennt in Abbildung 14-1, dass die durch Extrapolation erhaltenen, hochgerechneten Modellkurven den im Versuch festgestellten Druckverlustverlauf sowohl qualitativ, als auch quantitativ gut annähern.

#### 15 ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurde ein neues Modell zur Beschreibung der Druckverlustentwicklung bei zeit- und druckgesteuerter Abreinigungsfiltration entwickelt. Hierfür wurden zunächst die bei zeit- und druckgesteuerter Abreinigungsfiltration im Labor beobachteten Druckverlustverläufe analysiert, um so auf die dabei herrschenden Filtrationsmechanismen schließen zu können. In weiterer Folge wurden die so festgestellten Filtrationsmechanismen auf der Basis eines modifizierten Kuchengesetzes modellhaft-mathematisch beschrieben. Mit einem Vergleich von Versuchsdaten, mit aus dem Modell errechneten Druckverlustverläufen, konnte die Gültigkeit des Modells für einen großen Bereich an Betriebsparametern gezeigt werden. Den Abschluss der durchgeführten Arbeiten bildete eine erfolgreiche Hochrechnung eines Druckverlustverlaufes bei relativ niedriger Filtrationsgeschwindigkeit, basierend auf bei höheren Filtrationsgeschwindigkeiten und zeitgesteuerter Abreinigungefiltration aufgenommenen Versuchsdaten mit Hilfe des gegenständlichen Modelles.

Um ein den Druckverlustverlauf bei der Abreinigungsfiltration beschreibendes Modell zu entwickeln, wurden zunächst mittels eines eigens dafür konzipierten Filterprüfstandes (Alterungskammer - siehe Abschnitt 6) eine Vielzahl an Filtrationsversuchen durchgeführt. Die Abreinigungsfiltration wurde bei zeitgesteuerter Alterung bis zur vollständigen Verstopfung, bei druckgesteuerter Filtration jeweils bis zum Unterschreiten einer bestimmten Zyklusdauer fortgeführt, wodurch sich die Versuchsdauer je Versuch von einigen Minuten bis zu einigen Tagen erstreckt hat. Dabei wurden neben der zeitgesteuerten, sowie druckgesteuerten Abreinigung auch zwei Filtermedien mit unterschiedlicher Struktur, Teststäube mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung und verschiedene Betriebsparameter (Variation von Filtrationsgeschwindigkeit, Tankdruck und Ventilöffnungszeit) berücksichtigt. Die bei diesen Versuchen beobachteten Druckverlustverläufe über das jeweilige Prüffiltermedium wurden detailliert die daraus ableitbaren Filtrationsmechanismen analysiert. Zusätzlich wurde in Einzelversuchen die im und am Filtermedium haftende Reststaubmasse über die Versuchsdauer bestimmt, mit schneller Druckmessung der genaue Druckverlustverlauf während der Pulse-Jet Abreinigung aufgezeichnet und mittels Laserbeugungsanalysen die Partikelgrößenverteilung des direkt am Filtermedium haftenden Staubes, sowie des im vertikalen Rohgaskanal sedimentierenden Staubes und als Staubkuchen anfiltrierten Staubes gemessen. Die detaillierte Analyse der beobachteten Druckverlustverläufe hat ergeben, dass neben Tiefen- und Kuchenfiltration auch (Inneres) Patchy Cleaning bei der Modellierung des Druckverlustverlaufes bei zeit- und druckgesteuerter Abreinigungsfiltration zu berücksichtigen ist. Die im Vergleich zum anfiltrierten Staub zu geringeren Größen hin verschobene Partikelgrößenverteilung des direkt am Filtermedium haftenden Staubes, zusammen mit dem beobachteten linearen Ansteigen der Reststaubmasse, konnte die These eines aus den oberflächennahen Schichten des Filtermedium herauswachsenden Sekundärkuchens bestätigen, der vornehmlich vom Feinanteil des anfiltrierten Staubes gebildet wird. Der Sekundärkuchen trägt dabei wesentlich zum Ansteigen des Restdruckverlustes bei. Erwartungsgemäß konnte gezeigt werden, dass die wenig poröse Struktur des Membranfiltermediums im Vergleich zum offenporigeren PI - Nadelfilzfiltermedium den Anteil an Tiefenfiltration und (Innerem) Patchy Cleaning zu Gunsten reiner Kuchenfiltration hintanhält. In weniger trivialer Weise konnte hingegen das raschere Anwachsen des Sekundärkuchens und damit des Restdruckverlustes beim Membranfiltermedium und der Verwendung eines grobkörnigen Teststaubes im Vergleich zu einem feinkörnigeren Teststaub erklärt werden: der grobkörnigere Teststaub weist eine breitere Partikelgrößenverteilung auf, wodurch eine inhomogenere Kuchenstruktur mit größeren Schwankungen in der Kuchenfestigkeit über die Kuchenhöhe gegeben ist. Diese Häufung der lokalen Schwächungen der Kuchenstruktur beim vergleichsweise gröberen Teststaub begünstigt das Abreißen des Kuchens an diesen Schwachstellen anstatt an der "Sollbruchstelle" Kuchen/Filtermedium. Im Schnitt bleibt somit mehr Staub pro Abreinigung am Filtermedium haften; der Sekundärkuchen und der Restdruckverlust wachsen beim grobkörnigeren Teststaub rascher an.

Nach der oben beschriebenen Identifizierung der bei zeit- und druckgesteuerter Abreinigungsfiltration maßgeblichen Filtrations- und Verstopfungsmechanismen konnte der jeweilige Druckverlustverlauf mit Hilfe eines modifizierten Kuchengesetztes, welches den Druckverlust einer Staubschicht in Abhängigkeit der Zyklenzahl als Funktion der Staubmasse, der Filtrationsgeschwindigkeit, dem spezifischen Staubkuchenwiderstand, der Viskosität des fluiden Mediums, sowie einer variablen Partikelabsetzfläche beschreibt, mathematischmodellhaft beschrieben werden. Die zentrale Modifikation gegenüber dem Standard-Kuchengesetzes stellt dabei die eigens eingeführte variable mittlere Partikelabsetzfläche dar.

Die mittlere Partikelabsetzfläche ermöglicht es mit einem Kuchengesetz-Ansatz die oben erwähnten Filtrationsmechanismen zugleich modellhaft abzubilden. Um zur mittleren Partikelabsetzfläche zu gelangen, geht man zunächst von der gesamten Partikelabsetzfläche eines Filtermediums aus, welche neben der Filteranströmfläche auch die große innere Faseroberfläche des Filtermediums umfasst. Die Strömungsgeschwindigkeitsverteilung über die gesamte Partikelabsetzfläche ändert sich aufgrund der Staubbeladung während der Filtration ständig. Sie wird zu jedem betrachteten Zeitpunkt eines Zyklus gedanklich umverteilt, sodaß die gesamte Partikelabsetzfläche in einen gleichmäßig durchströmten Bereich und in einen gar nicht durchströmten Bereich unterteilt wird. Der gleichmäßig durchströmte Bereich wird als effektive

Partikelabsetzfläche zu dem jeweiligen Zeitpunkt bezeichnet. Das arithmetische Mittel der effektiven Partikelabsetzflächen im Zyklusdauerintervall, welches dem zu beschreibenden Druckverlustanstieg entspricht, ergibt die zugehörige mittlere Partikelabsetzfläche. Zusammen mit der dem Zyklusdauerintervall entsprechenden Staubmasse kann so der Druckverlustverlauf bei zeit- und druckgesteuerter Abreinigungsfiltration mathematisch beschrieben werden. Bei vorherrschender Tiefenfiltration innerhalb eines Zyklus ergibt sich beispielsweise eine große mittlere Partikelabsetzfläche, wohingegen bei (Innerem) Patchy Cleaning eine kleinere mittlere Partikelabsetzfläche aufgrund der inhomogeneren Strömungsgeschwindigkeitsverteilung festzustellen ist.

Der Verlauf der mittleren Partikelabsetzfläche über eine Vielzahl von Zyklen und damit über verschiedene Filtrationsmechanismen hinweg wird mit Hilfe einer empirischen Formel beschrieben. Durch die Anpassung der darin enthaltenen prozessspezifischen Parameter an Versuchsdaten mittels Kurvenfit-Programm konnte gezeigt werden, dass das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell den Druckverlustverlauf bei druck- und zeitgesteuerter Abreinigungsfiltration für eine breite Palette an Versuchsparametern zu beschreiben im Stande ist.

Zum Abschluss der gegenständlichen Arbeit wurde die Abhängigkeit der prozessspezifischen Parameter von der Filtrationsgeschwindigkeit bei zeitgesteuerter Abreinigungsfiltration durch einen Potenzansatz beschrieben und mit physikalischen Erklärungen untermauert. Die so bei hohen Filtrationsgeschwindigkeiten gefundenen Zusammenhänge wurden auf eine niedrigere Filtrationsgeschwindigkeit extrapoliert. Mit den durch Extrapolation erhaltenen und ins Modell eingesetzten prozessspezifischen Parametern konnte der Druckverlustverlauf für die niedrigere Filtrationsgeschwindigkeit, bei sonst gleichen Versuchsbedingungen, hochgerechnet werden. Der Vergleich des hochgerechneten Modell-Druckverlustverlaufes mit dem Druckverlustverlauf aus einem tatsächlich bei geringerer Filtrationsgeschwindigkeit durchgeführten Versuch, hat eine gute Übereinstimmung ergeben.

Abschließend kann festgehalten werden, dass mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modell zur Beschreibung des Druckverlustverlaufes bei zeit- und druckgesteuerter Abreinigungsfiltration erstmals alle maßgeblichen Filtrationsmechanismen zugleich abgebildet werden können. Neben dem besseren Verständnis um die Filtrationsmechanismen und die Verstopfungsvorgänge bei der Abreinigungsfiltration ermöglicht das Modell auch eine zeitsparende Hochrechnung von Druckverlustverläufen durch Extrapolation der im Modell enthaltenen prozessspezifischen Parameter.

### 16 ANHANG

#### Partikelgrößenverteilungen des Sekundärkuchens ("Sekundärkuchen") und des gesamt anfiltrierten Staubes ("Kuchen") für verschiedene Filtermedium/Teststaub - Kombinationen



Abbildung 16-1: Partikelgrößenverteilungen von Sekundärkuchen und Kuchen (gesamter anfiltrierter Staub) bei CaCO<sub>3</sub> -Teststaub und PI - Nadelfilzfiltermedium und Membranfiltermedium



Abbildung 16-2: Partikelgrößenverteilungen von Sekundärkuchen und Kuchen (gesamter anfiltrierter Staub) bei Pural NF -Teststaub und PI - Nadelfilzfiltermedium und Membranfiltermedium



Abbildung 16-3: Partikelgrößenverteilungen von Sekundärkuchen und Kuchen (gesamter anfiltrierter Staub) bei Pural SB -Teststaub und PI - Nadelfilzfiltermedium und Membranfiltermedium

#### Druckverlustverlauf bei Alterungsversuchen mit Variation der Filtrationsgeschwindigkeit

Konstante Versuchsparamter:

- Rohgaskonzentration: 5,5 g/m<sup>3</sup>
- Tankdruck: 0,5 MPa
- Ventilöffnungszeit: 60 ms
- Zyklusdauer: 100 s





Abbildung 16-5: Zeitliche Druckverlustverläufe in Abhängigkeit der Filtrationsgeschwindigkeit - Testserie CaCO<sub>3</sub> -Teststaub mit Membranfiltermedium (Anm.: der Versuch mit 2,2m/min Filtrationsgeschwindigkeit fehlt hier, da die

Auswertesoftware der Alterungskammer die Daten aufgrund eines "overflow" nicht auslesen kann)



Versuchsserie mit Pural SB und Membranfiltermedium

Abbildung 16-6: Zeitliche Druckverlustverläufe in Abhängigkeit der Filtrationsgeschwindigkeit - Testserie Pural SB -Teststaub mit Membranfiltermedium (Anm.: der Versuch mit 1,9m/min Filtrationsgeschwindigkeit fehlt hier, da die Auswertesoftware der Alterungskammer die Daten aufgrund eines "overflow" nicht auslesen kann)



Abbildung 16-7: Zeitliche Druckverlustverläufe in Abhängigkeit der Filtrationsgeschwindigkeit - Testserie Pural NF -Teststaub mit PI - Nadelfilzfiltermedium



#### Versuchsserie mit Pural SB und PI-Nadelfilz

Abbildung 16-8: Zeitliche Druckverlustverläufe in Abhängigkeit der Filtrationsgeschwindigkeit - Testserie Pural SB -Teststaub mit PI - Nadelfilzfiltermedium



Abbildung 16-9: Zeitliche Druckverlustverläufe in Abhängigkeit der Filtrationsgeschwindigkeit - Testserie Pural CaCO<sub>3</sub> - Teststaub mit PI - Nadelfilzfiltermedium

#### Druckverlustverlauf bei Alterungsversuchen mit Variation der Ventilöffnungszeit und des Tankdruckes

Konstante Versuchsparamter:

- Teststaub: Pural NF
- Filtermedium: PI Nadelfilzfiltermedium
- Rohgaskonzentration: 5,5 g/m<sup>3</sup>
- Filtrationsgeschwindigkeit: 2,7 m/min
- Zyklusdauer: 100 s



Abbildung 16-10: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 1 bar, Ventilöffnungszeit 150 ms



Abbildung 16-11: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 2 bar, Ventilöffnungszeit 60 ms



Abbildung 16-12: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 2 bar, Ventilöffnungszeit 100 ms



Abbildung 16-13: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 2 bar, Ventilöffnungszeit 150 ms



35

Abbildung 16-14: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 3 bar, Ventilöffnungszeit 60 ms







Abbildung 16-16: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 3 bar, Ventilöffnungszeit 150 ms

Abbildung 16-17: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 4 bar, Ventilöffnungszeit 60 ms



Abbildung 16-18: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 4 bar, Ventilöffnungszeit 100 ms

Abbildung 16-19: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 4 bar, Ventilöffnungszeit 150 ms



Abbildung 16-20: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 5 bar, Ventilöffnungszeit 60 ms



Abbildung 16-21: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 5 bar, Ventilöffnungszeit 100 ms



Abbildung 16-22: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 5 bar, Ventilöffnungszeit 150 ms



Abbildung 16-23: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 6 bar, Ventilöffnungszeit 10 ms



Abbildung 16-24: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 6 bar, Ventilöffnungszeit 60 ms



Abbildung 16-25: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 6 bar, Ventilöffnungszeit 100 ms



Abbildung 16-26: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 6 bar, Ventilöffnungszeit 150 ms

# Vergleich Modell vs. Versuch bei druckgesteuerter Abreinigung und verschiedenen Abreinigungsparametern

Konstante Versuchsparamter:

- Teststaub: Pural NF
- Filtermedium: PI Nadelfilzfiltermedium
- Rohgaskonzentration: 5,5 g/m<sup>3</sup>
- Filtrationsgeschwindigkeit: 2,7 m/min
- Abreinigungsdruck: 10 hPa



Abbildung 16-27: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 6 bar Tankdruck und 150 ms Ventilöffnungszeit



Abbildung 16-28: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 6 bar Tankdruck und 100 ms Ventilöffnungszeit



Abbildung 16-29: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 6 bar Tankdruck und 60 ms Ventilöffnungszeit



Abbildung 16-30: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 5 bar Tankdruck und 150 ms Ventilöffnungszeit



Abbildung 16-31: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 5 bar Tankdruck und 100 ms Ventilöffnungszeit



Abbildung 16-32: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 5 bar Tankdruck und 60 ms Ventilöffnungszeit



Abbildung 16-33: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 4 bar Tankdruck und 150 ms Ventilöffnungszeit



Abbildung 16-34: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 4 bar Tankdruck und 100 ms Ventilöffnungszeit



Abbildung 16-35: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 4 bar Tankdruck und 60 ms Ventilöffnungszeit



Abbildung 16-36: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 3 bar Tankdruck und 150 ms Ventilöffnungszeit



Abbildung 16-37: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 3 bar Tankdruck und 100 ms Ventilöffnungszeit



Abbildung 16-38: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 3 bar Tankdruck und 60 ms Ventilöffnungszeit



Abbildung 16-39: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 2 bar Tankdruck und 150 ms Ventilöffnungszeit



Abbildung 16-40: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 2 bar Tankdruck und 100 ms Ventilöffnungszeit



Abbildung 16-41: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 2 bar Tankdruck und 60 ms Ventilöffnungszeit



Abbildung 16-42: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 1 bar Tankdruck und 150 ms Ventilöffnungszeit

## Abbildungsverzeichnis

| Abbildung 1-1: Partikelabscheidegrade im menschlichen Atemtrakt nach [2]   | 1    |
|--|------|
| Abbildung 1-2: Trend der PM10-Emmissionen nach Sektoren [3]  | 2    |
| Abbildung 1-3: Abscheidegrade unterschiedlicher Staubabscheider [7]  | 3    |
| Abbildung 3-1: Druckverlustverlauf bei zeitgesteuerter Abreinigungsfiltration. Die                                       |      |
| Regenerierung des Filtermediums erfolgt nach einer festgelegten Zyklusdauer  | 6    |
| Abbildung 3-2: Druckverlustverlauf bei druckgesteuerter Abreinigungsfiltration. Die                                      |      |
| Regenerierung des Filtermediums erfolgt bei Erreichen eines festgelegten   |      |
| Abreinigungsdruckverlustes $\Delta p_A$  | 7    |
| Abbildung 3-3: Schlauchfilter mit Druckstoßabreinigung – schematisch [16]  | 7    |
| Abbildung 3-4: Druckverlustverlauf bei druckgesteuerter Regeneration - stabiles und instabi                              | les  |
| Betriebsverhalten [16]   | 9    |
| Abbildung 3-5: Verlauf der Partikel-Konzentration c im Reingas – schematisch [16]  | 10   |
| Abbildung 4-1: Vernadelung eines Vlies – schematisch [18]  | 12   |
| Abbildung 5-1: Typ 1 Filterprüfstand nach VDI-Richtlinie 3926 – schematisch [17]   | 20   |
| Abbildung 5-2: Typ 2 Filterprüfstand nach VDI-Richtlinie 3926 – schematisch [17]   | 20   |
| Abbildung 5-3: Filterprüfstand in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3926 der BTU Cottbus [24].                                 | 21   |
| Abbildung 5-4: Filterprüfstand nach JIS Z 8909-1 – schematisch [11]  | 22   |
| Abbildung 6-1: Alterungskammer; links Photographie, rechts schematische Darstellung                                      | 23   |
| Abbildung 6-2: Schematische Darstellung der apparativen Ausführung des Pulse-Jet   |      |
| Abreinigungssystems  | 25   |
| Abbildung 6-3: Schematische Darstellung des Schneckendosieres NDF 100 [25]   | 26   |
| Abbildung 6-4: Schematische Darstellung der Prüffilterhalterung [14]   | 26   |
| Abbildung 6-5: Dosierluftvolumenstrom des Staubdosierers (NDF 100 – FilTEq GmbH) in                                      |      |
| Abhängigkeit des Vordruckes  | 27   |
| Abbildung 6-6: Partikelgrößenverteilungen der verwendeten Teststäube <sup>2</sup>  | 29   |
| Abbildung 6-7: Abhängigkeit der sich nach 10 min am Filtermedium befindenden Masse Pur                                   | ral  |
| NF - Teststaub von der eingestellten Steuerspannung der Austragsschnecke   | 30   |
| Abbildung 6-8: Abhängigkeit der sich nach 10 min am Filtermedium befindenden Masse Pur                                   | ral  |
| SB - Teststaub von der eingestellten Steuerspannung der Austragsschnecke   | 31   |
| Abbildung 6-9: Abhängigkeit der sich nach 10 min am Filtermedium befindenden Masse                                       |      |
| $CaCO_3$ - Teststaub von der eingestellten Steuerspannung der Austragsschnecke   | 31   |
| Abbildung 6-10 Typischer Druckverlustverlauf über das Prüffiltermedium bei zeitgesteuerte                                | r    |
| Alterung bis zum Erreichen eines anlagenseitig vorgegebenen maximalen  |      |
| Druckverlustes von 35 mbar (35 hPa)  | 35   |
| Abbildung 6-11: Typischer Druckverlustverlauf über das Prüffiltermedium bei druckgesteue                                 | rter |
| Alterung bei einem maximalen Druckverlust vor der Abreinigung von 10 hPa   | 36   |
| Abbildung /-1: Filtrationskurven bei konstanter Filtrationsgeschwindigkeit nach [35]                                     | 41   |
| Abbildung /-2: Vergleich des Gesamtdruckverlustes Modell (MODELLED) vs. Experiment                                       | 4.5  |
| (EXPERIMENTAL) einer CSTI50 Filterkerze nach [49]  | 45   |
| Abbildung /-3: Vergleich des Druckverlustverlaufes Modell (durchgezogene Linien) vs.                                     | 200  |
| Experiment bei verschiedenen Partikelgroßen (Symbole siehe Legende) eines D  | 1309 |
| HEPA Filtermediums nach [50]         Abhildung 7 4: Vergleich des Drechtschustusterfes Medall (dersterensen Litterensen) | 46   |
| Additional 7-4: vergieich des Druckverlustverlaufes Modell (durchgezogene Linien) vs.                                    | 40   |
| Experiment (Drelecke) einer Filterkerze nach [54]  | 48   |

| Abbildung 7-5: Druckverlust über relativer Zykluszeit für verschiedene Regenerierungsgrade   |
|--|
| nach [56]  |
| Abbildung 7-6: Vergleich des Druckverlustverlaufes Modell (gestrichelte Linie) vs. Experiment  |
| (Rauten) eines PPS Filtermediums nach [59]50   |
| Abbildung 7-7: Qualitative Darstellung von Beanspruchung und Festigkeit innerhalb dreier   |
| unterschiedlich dicker Staubkuchen [63]51  |
| Abbildung 7-8: Simulierte Druckverlustkurven nach [63]   |
| Abbildung 7-9: Mittels Einzelpartikeln modellierte Druckverlustentwicklung nach [72]53   |
| Abbildung 7-10: Druckverlust als Funktion der anfiltrierten Staubmasse; Experiment schwarze  |
| Rauten, Simulation weiße Kreise [/5]   |
| Abbildung /-11: Druckverlust eines Dieselruß-Partikelfilters - Beladung und  |
| Abreinigungszyklen; Vergleich Experiment vs. Simulation nach [//]  |
| Abbildung 10-1: Partikelgroßenverteilungen des in den Bunker sedimentierten Staubes  |
| ("Bunker") sowie des den Staubkuchen bildenden Staubes ("Kuchen") bei CaCO <sub>3</sub>  |
| als leststaub  |
| Abbildung 10-2: Partikelgroßenverteilungen des in den Bunker sedimentierten Staubes  |
| ("Bunker") sowie des den Staubkuchen bildenden Staubes ("Kuchen") bei Pural NF<br>als Teststaub  |
| Abbildung 10-3. Partikelgrößenverteilungen des in den Bunker sedimentierten Staubes  |
| ("Bunker") sowie des den Staubkuchen bildenden Staubes ("Kuchen") bei Pural SB   |
| als Teststaub  |
| Abbildung 10-4: Rohgaskonzentrationen bei verschiedenen Filtrationsgeschwindigkeiten für   |
| CaCO <sub>3</sub> Teststaub  |
| Abbildung 10-5: Rohgaskonzentrationen bei verschiedenen Filtrationsgeschwindigkeiten für   |
| Pural NF Teststaub   |
| Abbildung 10-6: Rohgaskonzentrationen bei verschiedenen Filtrationsgeschwindigkeiten für   |
| Pural SB Teststaub   |
| Abbildung 10-7: Druckverlustverlauf bei zeitgesteuerter Alterung, links Gesamtansicht, rechts  |
| Detail   |
| Abbildung 10-8: Zeitlicher Druckverlustverlauf ausgewählter Zyklen - Tiefenfiltration  |
| Abbildung 10-9: Zeitlicher Druckverlustverlauf ausgewählter Zyklen – Inneres Patchy Cleaning   |
|  |
| Abbildung 10-10: Zeitlicher Druckverlustverlauf ausgewählter Zyklen - Patchy Cleaning70  |
| Abbildung 10-11: Zeitlicher Druckverlustverlauf ausgewählter Zyklen – (vornehmlich)  |
| Abbildung 10, 12, Zeitlicher Drugbuschustunglauf ausgewühlter Zublen (usernehmlich)  |
| Additiong 10-12. Zenticher Druckverlustverlauf ausgewählter Zyklen - (vornenmitch)   |
| Albiture 10.12: Destdeedeedeedeedeedeedeedeedeedeedeedeedee  |
| Abbildung 10-13: Restaruckverlustverlauf $\Delta p_R(N)$ und Reststaubmasse über die Zyklenzani N  |
| Abbildung 10, 14: Dertikelerößenverteilung von (Steub) Kuchen und Sekundärkuchen bei einem   |
| DI Nadelfilzfiltermedium   |
| Abbildung 10, 15: Sabamatisaba Darstallung von Kushandruskust An (N) und Druskustust   |
| Abornoung 10-15. Schemansche Darstenung von Kuchenuruckverfust $\Delta p_{\rm K}(N)$ und Drückverfust<br>des abgereinigten Kuchens An (N). |
| Abbildung 10, 16: Druckverlustverlauf des abgereinigten Kuchens An (N) als Eurletion der   |
| Tuckveriusiveriaui des abgeieningten Kuchens Δp <sub>C</sub> (N) als Funktion der<br>Tuklenzahl 74   |
| Zyxiciizaiii   |

| Abbildung 10-17: Druckverlustverlauf ausgewählter Zyklen bei unterschiedlichen                     |        |
|--|--------|
| Ausprägungen des Inneren Patchy Cleaning; oben: Zyklus 50, Mitte: Zyklus 150,                      |        |
| unten: Zyklus 185  | 3      |
| Abbildung 10-18: Verlauf des Abreinigungsdruckverlustes $\Delta p_A(N)$ über die Zyklenzahl 79     | 9      |
| Abbildung 10-19: Zeitlicher Druckverlustverlauf während der Abreinigung repräsentativ              |        |
| gewählter Zyklen (Tankdruck: 5 MPa, Ventilöffnungszeit: 60 ms)                                     | )      |
| Abbildung 10-20: Entwicklung des Druckverlustes – PI - Nadelfilzfiltermedium                       | 1      |
| Abbildung 10-21: Entwicklung des Druckverlustes - Membranfiltermedium                              | 3      |
| Abbildung 10-22: Partikelgrößenverteilung von Staubkuchen und Sekundärkuchen bei einem             |        |
| Membranfiltermedium  | 4      |
| Abbildung 10-23. Druckverlustverlauf über die gesamte Zyklenzahl und Einzelzyklen.                 | -      |
| Membran filter medium mit CaCO2 - Teststaub (d50,2 = 3 1µm)  | 5      |
| Abbildung 10-24: Druckverlustverlauf über die gesamte Zyklenzahl und Finzelzyklen:                 |        |
| Membranfiltermedium mit Pural NE - Teststaub ( $d_{res} = 8.6 \mu m$ )                             | 5      |
| Abbildung 10.25: Druckverlustverlauf über die gesamte Zuklenzahl und Einzelzuklen:                 | ,      |
| Monthalf 10-25. Druckverhastverhauf uber die gesamte Zyklenzam und Emzeizyklen.                    | 6      |
| Abbildung 10.26: Sahamatigaha Daratallung dar Kuahanfastigkait und Zugenannung über die            | J      |
| Abbildung 10-20. Schematische Dalstenung der Kuchemestigkeit und Zugspahlung über die              |        |
| Ruchendicke bei der Abreinigung für Teststaube mit unterschiedlicher                               |        |
| Partikelgrobenverteilung; links feinkorniger Teststaub mit enger                                   |        |
| Partikelgroßenverteilung, rechts grobkorniger Teststaub mit breiter                                | _      |
| Partikelgroßenverteilung (nach [23])   | /      |
| Abbildung 10-27: Druckverlustverlauf über die gesamte Zyklenzahl und Einzelzyklen: PI -            | _      |
| Nadelfilzfiltermedium mit CaCO <sub>3</sub> – Teststaub ( $d_{50,3} = 3,1 \mu m$ )                 | )      |
| Abbildung 10-28: Druckverlustverlauf über die gesamte Zyklenzahl und Einzelzyklen: PI -            |        |
| Nadelfilzfiltermedium mit Pural NF – Teststaub ( $d_{50,3} = 8,6\mu m$ )                           | )      |
| Abbildung 10-29: Druckverlustverlauf über die gesamte Zyklenzahl und Einzelzyklen: PI -            |        |
| Nadelfilzfiltermedium mit Pural SB - Teststaub ( $d_{50,3} = 51,1 \mu m$ )                         | )      |
| Abbildung 10-30: Alterungskennwert als Funktion der Filtrationsgeschwindigkeit für                 |        |
| verschiedene Teststaub/Filtermedium - Kombinationen  | 3      |
| Abbildung 10-31: Maximaler Abreinigungsdruck (Δp <sub>A,max</sub> ) in Abhängigkeit vom Tankdruck; |        |
| Scharparameter ist die Ventilöffnungszeit  | 5      |
| Abbildung 10-32: Druckverlustverlauf bei druckgesteuerter Filtration, links Gesamtansicht,         |        |
| rechts Detail  | 5      |
| Abbildung 10-33: Zeitlicher Druckverlustverlauf ausgewählter Zyklen – links: Tiefenfiltration,     |        |
| Mitte: (Inneres) Patchy Cleaning, rechts: Kuchenfiltration   | 7      |
| Abbildung 10-34: Auf die Zyklusdauer bezogener mittlerer Kuchendruckverlustanstieg ΔpKN in         | n      |
| Abhängigkeit der Zyklenzahl N  | 8      |
| Abbildung 11-1: Typischer Druckverlustverlauf bei zeitgesteuerter Alterung in                      | -      |
| Laborfilteranlagen 10  | 3      |
| Abbildung 11-2: Druckverlustverlauf bei zeitgesteuerter Alterung - schematisch 104                 | 4      |
| Abhildung 11-3: Schematische Darstellung von haften bleibender und abgereinigter Staubmasse        |        |
| in A hpängigkeit der Zuklenzahl N  | ŝ      |
| Abhildung 11-4. Schematische Darstellung der gesamten Partikalahsetzfläche A. 100                  | ,<br>a |
| Abbildung 11-7. Schematische Darstellung eines Zuklus mit der Zuklanzahl N $100$                   | á      |
| Abbildung 11.6. Strömungsgeschwindigkeitsverteilung und dereus regultierende mittlere              | '      |
| Abondung 11-0. Suomungsgesenwindigkensvenenung und dataus fesuitiefende mittlefe                   | n      |
| rartikeiaosetziiacne   | J      |

| Abbildung 11-7: Verlauf des Druckverlustes und der Partikelabsetzfläche innerhalb eines       |
|---|
| Zyklus bei verschiedenen Filtrationsmechanismen   |
| Abbildung 12-1: Druckverlustverlauf bei druckgesteuerter Abreinigung - schematisch            |
| Abbildung 12-2 Druckverlust über das Prüffiltermedium in Abhängigkeit der Zyklenzahl bei      |
| druckgesteuerter Abreinigung  |
| Abbildung 12-3: Auf die Zyklusdauer bezogener Kuchendruckverlustanstieg als Funktion der      |
| Zyklenzahl bei druckgesteuerter Abreinigung   |
| Abbildung 12-4: Zyklusdauer als Funktion der Zyklenzahl bei druckgesteuerter Abreinigung 128  |
| Abbildung 13-1: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust,                           |
| Abreinigungsdruckverlust und Druckverlust des abgereinigten Kuchens; PI -                     |
| Nadelfilzfiltermedium mit Pural NF - Teststaub  |
| Abbildung 13-2: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust,                           |
| Abreinigungsdruckverlust und Druckverlust des abgereinigten Kuchens; PI -                     |
| Nadelfilzfiltermedium mit CaCO <sub>3</sub> - Teststaub                                       |
| Abbildung 13-3: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust,                           |
| Abreinigungsdruckverlust und Druckverlust des abgereinigten Kuchens; PI -                     |
| Nadelfilzfiltermedium mit Pural SB - Teststaub136   |
| Abbildung 13-4: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust,                           |
| Abreinigungsdruckverlust und Druckverlust des abgereinigten Kuchens;                          |
| Membranfiltermedium mit Pural NF - Teststaub  |
| Abbildung 13-5: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust,                           |
| Abreinigungsdruckverlust und Druckverlust des abgereinigten Kuchens;                          |
| Membranfiltermedium mit CaCO <sub>3</sub> - Teststaub137                                      |
| Abbildung 13-6: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust,                           |
| Abreinigungsdruckverlust und Druckverlust des abgereinigten Kuchens;                          |
| Membranfiltermedium mit Pural SB - Teststaub  |
| Abbildung 13-7: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; PI -      |
| Nadelfilzfiltermedium mit Pural NF - Teststaub  |
| Abbildung 14-1: Vergleich hochgerechnetes Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und        |
| Druckverlust des abgereinigten Kuchens; PI - Nadelfilzfiltermedium mit Pural NF -             |
| Teststaub bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2 m/min                                    |
| Abbildung 16-1: Partikelgrößenverteilungen von Sekundärkuchen und Kuchen (gesamter            |
| anfiltrierter Staub) bei CaCO <sub>3</sub> - Teststaub und PI - Nadelfilzfiltermedium und     |
| Membranfiltermedium   |
| Abbildung 16-2: Partikelgrößenverteilungen von Sekundärkuchen und Kuchen (gesamter            |
| anfiltrierter Staub) bei Pural NF - Teststaub und PI - Nadelfilzfiltermedium und              |
| Membranfiltermedium   |
| Abbildung 16-3: Partikelgrößenverteilungen von Sekundärkuchen und Kuchen (gesamter            |
| anfiltrierter Staub) bei Pural SB - Teststaub und PI - Nadelfilzfiltermedium und              |
| Membranfiltermedium   |
| Abbildung 16-4: Zeitliche Druckverlustverläufe in Abhängigkeit der Filtrationsgeschwindigkeit |
| - Testserie Pural NF - Teststaub mit Membranfiltermedium                                      |
| Abbildung 16-5: Zeitliche Druckverlustverläufe in Abhängigkeit der Filtrationsgeschwindigkeit |
| - Testserie CaCO <sub>3</sub> - Teststaub mit Membranfiltermedium (Anm.: der Versuch mit      |
| 2,2m/min Filtrationsgeschwindigkeit fehlt hier, da die Auswertesoftware der                   |
| Alterungskammer die Daten aufgrund eines "overflow" nicht auslesen kann) 153                  |

| Abbildung | 16-6: Zeitliche Druckverlustverläufe in Abhängigkeit der Filtrationsgeschwindigkeit<br>- Testserie Pural SB - Teststaub mit Membranfiltermedium (Anm.: der Versuch mit<br>1,9m/min Filtrationsgeschwindigkeit fehlt hier, da die Auswertesoftware der |
|-----------|---|
|           | Alterungskammer die Daten aufgrund eines overflow" nicht auslesen kann) 154   |
| Abbildung | 16-7: Zeitliche Druckverlustverläufe in Abhängigkeit der Filtrationsgeschwindigkeit<br>Testserie Pural NE - Teststaub mit PL - Nadelfilzfiltermedium  |
| Abbildung | <ul> <li>16-8: Zeitliche Druckverlustverläufe in Abhängigkeit der Filtrationsgeschwindigkeit</li> <li>Testserie Pural SB - Teststaub mit PI - Nadelfilzfiltermedium</li></ul>   |
| Abbildung | 16-9: Zeitliche Druckverlustverläufe in Abhängigkeit der Filtrationsgeschwindigkeit<br>- Testserie Pural CaCO <sub>3</sub> - Teststaub mit PI - Nadelfilzfiltermedium   |
| Abbildung | 16-10: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 1 bar, Ventilöffnungszeit<br>150 ms   |
| Abbildung | 16-11: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 2 bar, Ventilöffnungszeit 60 ms<br>   |
| Abbildung | 16-12: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 2 bar, Ventilöffnungszeit 100 ms  |
| Abbildung | 16-13: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 2 bar, Ventilöffnungszeit 150 ms  |
| Abbildung | 16-14: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 3 bar, Ventilöffnungszeit 60 ms<br>   |
| Abbildung | 16-15: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 3 bar, Ventilöffnungszeit 100 ms  |
| Abbildung | 16-16: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 3 bar, Ventilöffnungszeit 150 ms  |
| Abbildung | 16-17: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 4 bar, Ventilöffnungszeit 60 ms   |
| Abbildung | 16-18: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 4 bar, Ventilöffnungszeit 100 ms  |
| Abbildung | 16-19: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 4 bar, Ventilöffnungszeit 150 ms  |
| Abbildung | 16-20: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 5 bar, Ventilöffnungszeit 60 ms   |
| Abbildung | 16-21: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 5 bar, Ventilöffnungszeit 100 ms  |
| Abbildung | 16-22: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 5 bar, Ventilöffnungszeit 150 ms  |
| Abbildung | 16-23: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 6 bar, Ventilöffnungszeit 10 ms   |
| Abbildung | 16-24: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 6 bar, Ventilöffnungszeit 60 ms<br>   |
| Abbildung | 16-25: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 6 bar, Ventilöffnungszeit 100 ms  |
| Abbildung | 16-26: Druckverlustverlauf über der Zeit, Tankdruck 6 bar, Ventilöffnungszeit 150 ms  |
| Abbildung | 16-27: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 6 bar<br>Tankdruck und 150 ms Ventilöffnungszeit   |

| Abbildung 16-28: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 6 bar |
|--|
| Tankdruck und 100 ms Ventilöffnungszeit  |
| Abbildung 16-29: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 6 bar |
| Tankdruck und 60 ms Ventilöffnungszeit160  |
| Abbildung 16-30: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 5 bar |
| Tankdruck und 150 ms Ventilöffnungszeit  |
| Abbildung 16-31: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 5 bar |
| Tankdruck und 100 ms Ventilöffnungszeit  |
| Abbildung 16-32: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 5 bar |
| Tankdruck und 60 ms Ventilöffnungszeit161  |
| Abbildung 16-33: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 4 bar |
| Tankdruck und 150 ms Ventilöffnungszeit161   |
| Abbildung 16-34: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 4 bar |
| Tankdruck und 100 ms Ventilöffnungszeit  |
| Abbildung 16-35: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 4 bar |
| Tankdruck und 60 ms Ventilöffnungszeit161  |
| Abbildung 16-36: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 3 bar |
| Tankdruck und 150 ms Ventilöffnungszeit161   |
| Abbildung 16-37: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 3 bar |
| Tankdruck und 100 ms Ventilöffnungszeit162   |
| Abbildung 16-38: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 3 bar |
| Tankdruck und 60 ms Ventilöffnungszeit162  |
| Abbildung 16-39: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 2 bar |
| Tankdruck und 150 ms Ventilöffnungszeit162   |
| Abbildung 16-40: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 2 bar |
| Tankdruck und 100 ms Ventilöffnungszeit162   |
| Abbildung 16-41: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 2 bar |
| Tankdruck und 60 ms Ventilöffnungszeit162  |
| Abbildung 16-42: Vergleich Modell vs. Experiment – Restdruckverlust und Zyklusdauer; 1 bar |
| Tankdruck und 150 ms Ventilöffnungszeit  |

### Tabellenverzeichnis

| Tabelle 1: Standardbedingungen für die Filtermittelprüfung nach VDI-Richtlinie 3926 (199         [17]            | '4)<br>14 |
|--|-----------|
| Tabelle 2: Versuchsparameter und Toleranzen für die Filtermittelprüfung nach VDI-Richtli         3926 (2004) [8] | nie<br>14 |
| Tabelle 3: Ablauf der Standardprüfung in vier Phasen nach VDI-Richtlinie 3926 (2004) [8]                         | 15        |
| Tabelle 4: Versuchsparameter und Toleranzen für die Filtermittelprüfung nach DIN-ISO 11         (2011) [9]       | 057<br>16 |
| Tabelle 5: Ablauf der Standardprüfung in fünf Phasen nach DIN-ISO 11057 (2011) [9]                               | 17        |
| Tabelle 6: Eigenschaften der verwendeten Teststäube  | 29        |
| Tabelle 7: Eigenschaften der verwendeten Filtermedien  | 33        |
| Tabelle 8: Ansätze zur Berechnung von Widerstandswerten nach [39]  | 44        |
| Tabelle 9: Durchgeführte Versuche (X) mit PI - Nadelfilzfiltermedium; Versuchsparameter                          |           |
| 100s Zykluszeit; 0,5MPa Tankdruck; 60ms Ventilöffnungszeit; 5,5g/m <sup>3</sup>                                  |           |
| Rohgaskonzentration  | 92        |
| Tabelle 10: Durchgeführte Versuche (X) mit Membranfiltermedium; Versuchsparameter: 1                             | 00s       |
| Zykluszeit; 0,4 bzw. 0,5MPa Tankdruck; 60ms Ventilöffnungszeit; 5,5g/m <sup>3</sup>                              |           |
| Rohgaskonzentration  | 92        |
| Tabelle 11: Übersicht über den maximalen Abreinigungsdruckverlust ΔpA,max in hPa bei                             |           |
| Variation des Tankdruckes und der Ventilöffnungszeit; Versuchsparameter: 10                                      | )0s       |
| Zykluszeit, 5,5g/m3 Rohgaskonzentration, Pural NF - Teststaub, PI -  |           |
| Nadelfilzfiltermedium  | 94        |
| Tabelle 12: Prozessspezifische Konstanten für Versuche mit unterschiedlichen Filtermedien                        | n und     |
| Teststäuben bei sonst gleichen Versuchsbedingungen (siehe Legenden   |           |
| Abbildung 13-1 bis Abbildung 13-6)   | 139       |
| Tabelle 13: Prozessspezifische Konstanten für Versuche mit unterschiedlichen                                     |           |
| Tankdrücken/Ventilöffnungszeiten eines PI - Nadelfilzfiltermediums mit Pura                                      | l NF      |
| als Teststaub, einem Abreinigungsdruck von 10 hPa, einer Rohgaskonzentratio                                      | on        |
| von 5,5 g/m <sup>3</sup> und einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2,7 m/min                                      | 142       |
| Tabelle 14: Tabelle der durch Kurvenanpassung in "OrigiPro 8G" erhaltenen  |           |
| prozessspezifischen Konstanten (Pural NF mit PI - Nadelfilzfiltermedium bei                                      |           |
| verschiedenen Filtrationsgeschwindigkeiten und zeitgesteuerter Abreinigung)                                      | 144       |
| Tabelle 15: Paramter A und B der Potenzfunktionen zur Berechnung der prozessspezifische                          | en        |
| Paramter   | 147       |
| Tabelle 16: Mit Hilfe von Gleichung 14-1 und den in Tabelle 15 angegebenen zugehörigen                           |           |
| Gleichungsparametern A und B extrapolierten Werte für die prozessspezifisch                                      | en        |
| Konstanten bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2 m/min  | 147       |

#### Literaturverzeichnis

- [1] "RICHTLINIE 1999/30/EG DES RATES", Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften (22. April 1999).
- [2] F. Greil: "Feinstaub am Arbeitsplatz, Informationen zur Umweltpolitik", Wien (2006) Nr 170.
- [3] Umweltbundesamt: "Feinstaub (PM10) Emissionstrend 1990-2011": online-Artikel, Abrufdatum 29.01.2014, URL: http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/luft/luftschadstoffe/staub/pm10/.
- [4] W. Koschutnig: "Untersuchung zur Emissionsbildung durch Wiederaufwirbelung von Straßenstaub und Charakterisierung der Oberflächenbehandlung textiler Filtermittel für die industrielle Feinstaubabscheidung", Dissertation, TU Wien, (2007).
- [5] W. Höflinger, W. Koschutnig: "Diffuse Staubemissionen durch den Fahrzeugverkehr auf den Straßen der Stadt Wien"; Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, 63 (2003), 10; 431-436.
- [6] ORF 2013: "Überwachung ist eingeschränkt": online-Artikel, Abrufdatum 08.11.2013, URL: <u>http://orf.at/stories/2205496/2205497/</u>.
- [7] M. Bank: "Basiswissen Umwelttechnik", 2006.
- [8] 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), 31 S.
- [9] DIN-ISO 11057: "Emissionen aus stationären Quellen Prüfverfahren für die Charakterisierung des Filtrationsverhaltens abreinigbarer Filtermedien", VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 6, Dezember (2011).
- [10] ASTM D6830-2: "Standard test method for characterizing the pressure drop and filtration performance of cleanable filter media", ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA.
- [11] JIS Z 8909-1: "Testing methods of filter media for dust collection", Japanese Industrial Standard.
- [12] GB 12625, Draft 2005: "Technical requirements of fabric and bag for bag filter", National Standard of the People's Republic of China, (2005).
- [13] N. Mao, Y. Yao, C. Kanaoka: "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.
- [14] J. Schuberth: "Untersuchung des Alterungsvorganges von abreinigbaren Staubfiltermedien bei zeitgesteuerter Abreinigung", Dissertation, TU Wien, (2009).
- [15] W. Höflinger, J. Schuberth, G. Mauschitz: "Untersuchung des Alterungsvorgangs von abreinigbaren Staubfiltermedien bei zeitgesteuerter Abreinigung", Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft, 5, (2009), S. 180 - 188.
- [16] F. Löffler, H. Dietrich, W. Flatt: "Staubabscheidung mit Schlauchfiltern und Taschenfiltern"; Karlsruhe, 1984.
- [17] 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, (1994), 44 S.
- [18] W. Albrecht, H. Fuchs, W. Kittelmann: "Vliesstoffe", Wiley-VCH Verlag, (2000)
- [19] P. Gäng: "Update of the VDI-Guideline 3926 Testing of Filter Media for Cleanable Filters and Development of a Mobile Filter Probe for Field Measurements"; 6th Symposium Textile Filters, (March 5th/6th 2002), Chemnitz.
- [20] P. Gäng: "Prüfung und Auswahl von Filtermedien für Abreinigungsfilter"; Skriptum zum Seminar "Gasreinigung mit Oberflächenfiltern", Düsseldorf (2005).
- [21] J. Binnig, J. Meyer, G. Kasper: "Influence of operating conditions and aging procedure on the emissions and operating performance of surface filters", FILTECH 2005 Conference Proceedings, (2005), p. II 131-138.
- [22] M. Stecher W. Höflinger: "Fortsetzung der Entwicklungsarbeiten an der Alterungskammer (Endbericht zum Forschungsprojekt)"; Bericht für Fa. Palas; Berichts-Nr. 2011/12-001, 2011; 59 S.
- [23] M. Stecher, G. Mauschitz, W. Höflinger: "Influence of test dusts on the aging behaviour of different cleanable dust filter media"; Vortrag: WFC 11 - 11th World Filtration Congress, Graz; 16.04.2012 - 20.04.2012; in: "WFC 11 Proceedings", (2012), 13 S
- [24] Prüfung von Filtermedien Erfahrungsberichte aus der Anwendung der Richtlinie VDI 3926 Blatt 1 Kolloquium "Prüfung von Filtermedien", 7./8. Juni 1999, Karlsruhe, Schriftreihe d. VDI/KRdL Band 29, (1999), ISSN 1435-1633.
- [25] FilTEq GmbH 2013: "Der Staubdosierer NDF 100": online-pdf-Dokument, Abrufdatum 24.01.2014, URL: <u>http://www.filteq.de/Staubdosierer\_NDF100\_-\_BD\_und\_3FI.pdf</u>.
- [26] W. Koschutnig, W. Höflinger: "Analyse der Restverstopfung an verschiedenen oberflächenbehandelten textilen Staubfiltermedien"; Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft, 66 (2006), 4; 158-164.
- [27] W. Koschutnig, G. Mauschitz, W. Höflinger: "Charakterisierung der Oberflächenbehandlung und des Verstopfungsverhaltens von abreinigbaren Staubfiltermedien mittels Bildanalyse"; Chemie-Ingenieur-Technik – CIT, 76 (2004), 10; 1504-1508.
- [28] J. Schuberth J, G. Mauschitz, W. Höflinger: "Characterisation of needle felts by image analysis for cleanable dust filtration"; Vortrag 9<sup>th</sup> International Conference on High Temperature Filtration, Saalfelden, Österreich; in: "Preprints Presentation at the 9<sup>th</sup> International Conference on High Temperature Filtration", (2008).
- [29] J. Kozeny: "Über kapillare Leitung des Wassers im Boden" Sitzungsber. Akad. Wiss., Wien, 136(2a): 271-306, 1927.
- [30] P.C. Carman: "Fluid flow through granular beds." Transactions, Institution of Chemical Engineers, London, 15: 150-166, 1937.

- [31] P.H. Hermans, H.L. Bredée: "Zur Kenntnis der Filtrationsgesetze", (1935), Recl. Trav. Chim. Pays-Bas, 54: 680–700. doi: 10.1002/recl.19350540902
- [32] P.M. Heertjes: "Studies in filtration Blocking filtration", Chemical Engineering Science, 1957, Vol. 6, pp. 190 to 203.
- [33] P.M. Heertjes: "Studies in filtration The initial stages of cake filtration", Chemical Engineering Science, 1957, Vol. 6, pp. 269 to 276.
- [34] V.E. Gonsalves: "A CRITICAL INVESTIGATION ON THE VISCOSE FILTRAIO N PROCESS", Recl. Trav. Chim. Pays-Bas, 69: 873–903. doi: 10.1002/recl.19500690711
- [35] W. Meskat: "Die Grundlagen der Filterverstopfungsneigung", Paper Sixth Viscose Symposium, October 20th, 1961.
- [36] C. E. Billings: "Aerosol Filtration Technology for Source Emission Control", AIChE Symposium Series 70 (1974) 137, 341/350.
- [37] D. Leith, M. W. First: "Pressure Drop in a Pulse-Jet Fabric Filter"; Filtration & Separation 14 (1977), 473/474.
- [38] F. Löffler: "Abscheidegrad und Druckverlust von Filterstoffen verschiedener Struktur bei unterschiedlichen Bedingungen", Staub-Reinhalt. Luft 30, 12, 518/522 (1970).
- [39] F. Löffler: "Staubabscheiden", Thieme Verlag, Stuttgart, ISBN 3-13-712201-5, 1988.
- [40] G.D. Dickey: "Filtration", Reinhold Publishing Corp. New York, Chapman & Hall, Ltd., London, S. 24/33 (1961).
- [41] A.R. Gupte, H. Rumpf: "Einflüsse der Porosität und Korngrößenverteilung im Widerstandsgesetz der Porenströmung", Chem. Ing.-Techn. 43, 6, 367/375 (1971).
- [42] C.E. Williams, T. Hatch, L. Greenburg: "Determination of Cloth Area for Industrial Air Filters", Hear. Piping and Air Cond., 12, 4, 259/263 (1940).
- [43] S. Strangert: "Predicting Performance of Bag Filters", Filtr. Sep. 15, 1, 42/55 (1970).
- [44] W.T. Davies, F.R. Kurzyska: "The Effect of Cyclonic Precleaners on the Pressure Drop of Fabric Filters", Filtr. Sep. 16, 5, 451/454 (1979).
- [45] R. Dennis, H.A. Klemm: "Modeling Coal Fly Ash Filtration with Glass Fabrics, NTIS Springfield, Ya (1978).
- [46] R. Dennis, H.A. Klemm: "Modeling Concepts for Pulse-Jet Filtration", J. Air Pollut. Control Assoc. 30, 1, 38/43 (1980).
- [47] R. Dennis, J.E. Wilder, D.L. Harmon: "Predicting Pressure Loss for Pulse-Jet Filters", J. Air Pollut. Control Assoc. 31, 9, 987/992 (1981).
- [48] J. Atzger: "Zusammenfassende Untersuchungen der Staubabscheidung in filternden Abscheidern unter besonderer Berücksichtigung des instationären Filterbetriebes", Dissertation Universität Essen (1976).

- [49] M. Lupion, B. Alsonso Fariñas, M. Rodriguez Galan, B. Navarrete: "Modelling pressure drop evolution on high temperature filters", Chemical Engineering and Processing 66 (2013) 12-19.
- [50] D. Thomas, P. Contal, P. Penicot, D. Leclere, J. Vendel: "Clogging of fibrous filters by solid aerosol particles Experimental and modelling study", Chemical Engineering Science 56 (2001) 3539-3561.
- [51] D. Thomas, P. Contal, V. Renaudin, P. Penicot, D. Leclere, J. Vendel: "MODELLING PRESSURE DROP IN HEPA FILTERS DURING DYNAMIC FILTRATION", J. Aerosol Sci. Vol. 30 No. 2 pp. 235-246, 1999.
- [52] D. Koch, J. Seville, R. Clift: "Dust cake detachment from gas filters", Powder Technol 86 (1996) 21-29.
- [53] J. Seville, W. Cheung, R. Clift: "A patchy cleaning interpretation of dust cake release from non-woven fabrics", Proc. Filt. Soc. (Filtn. and Sepn.) 26 (3) (1989) 187-190.
- [54] W. Duo, J. Seville, N.F. Kirky, H. Büchele, C.K. Cheung: "Patchy cleaning of rigid gas filters – II. Experiments and model validation", Chemical Engineering Science, Vol. 52, No. 1, pp. 153-164, 1997.
- [55] W. Duo, N.F. Kirkby, J.P.K. Seville, R. Clift: "Patchy cleaning of rigid gas filters I. A probabilistic model", Chemical Engineering Science, Vol. 52, No. 1, pp. 141-151, 1997.
- [56] A. Dittler, G. Kasper: "Simulation of operational behaviour of patchily regenerated, rigid gas cleaning filter media", Chemical Engineering and Processing 38 (1999), pp. 321-327.
- [57] A. Dittler: "Gasreinigung mit starren Oberflächenfiltern Erscheinungsformen und Auswirkungen unvollständiger Filterregenerierung", Dissertation, TU Karlsruhe, (2001).
- [58] E. Schmidt: "Experimental Investigations into the Compression of Dust Cakes Deposited on Filter Media", Filtration&Separation (1995) S. 789-793.
- [59] N. Mao, Y. Otani, Y. Yao, C. Kanaoka: "Modeling the filtration process with a flat-type fabric filter", Advanced Powder Technol., Vol. 17, No. 3, pp. 237-256 (2006).
- [60] D.H. Smith, V. Powell, G. Ahmadi, E. Ibrahim: "Analysis of operational filtration data Part I. Ideal candle filter behavior", Powder Technology 94 (1997) pp. 15-21.
- [61] D.H. Smith, V. Powell, G. Ahmadi: "Analysis of operational filtration data Part II. Incomplete cleaning of candle filters", Powder Technology 94 (1998) pp. 139-145.
- [62] D.H. Smith, V. Powell, G. Ahmadi, M. Ferer: "Analysis of operational filtration data Part III. Re-entrainment and incomplete cleaning of dust cake", Aerosol Science and Technology 28 (1998), pp. 1-12.
- [63] E. Schmidt: "Zur Kompression von auf Filtermedien abgschiedenen Staubschichten", Staub-Reinhaltung der Luft 53 (1993) 369-376.
- [64] E. Schmidt: "Simulation des dreidimensionalen Aufbaus von Staubschichten mittels Partikelbahnberechnung am Beispiel der Oberflächenfiltration", Chem.-Ing.-Techn. 66 (1994) Nr. 5 S. 718-720.

- [65] E. Schmidt: "Problematik der Angabe eines spezifischen Durchströmungswiderstandes anfiltrierter Staubkuchen", Chem.-Ing.-Techn. 67 (1995) Nr. 4 S. 464-467.
- [66] E. Schmidt: "Theoretical Investigations into the Compression of Dust Cakes Deposited on Filter Media", Filtration&Separation (1997) S. 365-368.
- [67] E. Schmidt, F. Löffler: "Präparation von Staubkuchen", Staub-Reinhaltung der Luft 49 (1989) Nr. 12, S. 429-432.
- [68] E. Schmidt, F. Löffler: "The analysis of dust cake structures" Part. Syst.Charact. 8 (1991), S. 105-109.
- [69] S.N. Rudnick, M.W. First: "Specific resistance (K<sub>2</sub>) of filter dust cakes: Comparison of theory and experiments.", 3. Symposium on fabric filters for particulate collection. EPA-600/7-78-087 (1978), S. 251-288.
- [70] Ch. Stöcklmayer, W. Höflinger: "Simulation of the Filtration Behavior of Dust Filters", Simulation Practice and Theory 6 (1998), pp. 281-296.
- [71] Ch. Stöcklmayer, W. Höflinger: "Simulation of the Regeneration of Dust Filters", Mathematics and Computers in Simulation 46 (1998), pp. 601-609.
- [72] Ch. Stöcklmayer, W. Höflinger: "Simulation of the Long-Term Behavior of Regenerable Dust Filters", Filtration & Separation (1998), pp. 373-377.
- [73] W. Höflinger, Ch. Stöcklmayer, A. Hackl: "Model Calculations of the Compression Behaviour of Dust Filter Cakes", Filtration & Separation, 31 (8), 1994, pp. 807-811.
- [74] Ch. Stöcklmayer: "A Computer Simulation Model for Cleanable Dust Filters", Dissertation, TU Wien, (1999).
- [75] P. Hettkamp, G. Kasper, J. Meyer: "Simulation and Measurement of Dust Loading of Pleated Air Filters", FILTECH 2011 Conference Proceedings, (2011), p. II 154-161.
- [76] P. Hettkamp, G. Kasper, J. Meyer: "Surface dust-loading of pleated filters: Comparison of simulation with experiment", FILTECH 2013 Conference Proceedings, (2013).
- [77] P. Kopf, T. Deuschle, M. Piesche: "Numerical and Experimental Investigation of Soot Deposition in Wall-Flow Diesel Particulate Filters", FILTECH 2011 Conference Proceedings, (2011), p. II 162-169.
- [78] T. Deuschle, U. Janoske, M. Piesche: "A CFD-model describing filtration, regeneration and deposit rearrangement effects in gas filter systems", Chemical Engineering Journal, Volume 135, Issues 1-2, 15 January 2008, Pages 49-55.
- [79] T. Deuschle, M. Piesche: "Modellierung und Simulation von Filtrations-, Regenerationsund Umlagerungseffekten in Gasfiltersystemen am Beispiel eines Dieselruß-Partikelfilters", Chemie Ingenieur Technik, DOI: 10.1002/cite.201000103.

# Lebenslauf

#### **Markus Stecher**

| Adresse             | Lerchenfelderstraße 62-64/9A<br>1080 Wien |
|---------------------|---|
| Telefon             | +43 699 18937761                          |
| Mail                | markusstecher@gmx.at                      |
| Geburtsdatum        | 16. August 1983                           |
| Geburtsort          | Klagenfurt                                |
| Staatsangehörigkeit | Österreich                                |
| Familienstand       | ledig                                     |



## AUSBILDUNG

| 12/2010 - 02/2014 | Technische Universität Wien                                    |  |
|-------------------|--|--|
|                   | Doktoratstudium der Verfahrenstechnik                          |  |
|                   | Dissertation zum Thema Modellierung des Druckverlustes bei der |  |
|                   | Abreinigungsfiltration   |  |
|                   | Industriepartner: Palas GmbH/Karlsruhe, Deutschland            |  |
|                   | Abschluss voraussichtlich 02/2014                              |  |
|                   |  |  |

10/2003 - 12/2010 Technische Universität Wien

**Diplomstudium der Verfahrenstechnik** Studienzweig Anlagen- und Apparatebau Diplomarbeit: "Entwicklung eines Verfahrens zur beschleunigten Filtermittelalterung von Kühlschmierstoffnebelabscheidern" Abschluss mit ausgezeichnetem Erfolg

- 09/1994 07/2002 BG/BRG Gmunden
- 09/1990 07/1994 Volksschule Steyrermühl

### BERUFSERFAHRUNG/PRAKTIKA

- 12/2010 02/2014 Technische Universität Wien, Wien Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften / Projektassistent
  - Selbständige Bearbeitung von Industrieprojekten
  - Grundlagenforschung im Bereich der Entstaubungstechnik
  - Halten von Fachvorträgen
  - Partikelgrößenmessung inkl. Anfertigung von Prüfprotokollen für die Industrie
  - Tätigkeit als Tutor im Studentenlabor

07/2009 UPM-Kymmene Austria, Steyrermühl

## Abteilung Technische Planung / Ferialarbeiter

- Mitarbeit bei der Erstellung von Datenbanken
- Erstellen von Raumplänen mit Visio

| 07/2008 - 08/2008 | <ul> <li>UPM-Kymmene Austria, Steyrermühl</li> <li>Abteilung Technische Planung / Ferialarbeiter</li> <li>Mitarbeit bei der Erstellung von Datenbanken</li> <li>Erstellen von Formularen mit VBA in Excel</li> </ul> |     |
|-------------------|--|-----|
| 07/2006 - 08/2006 | <ul> <li>SCA GRAPHIC LAAKIRCHEN AG, Laakirchen</li> <li>Abteilung Halbstofferzeugung / Ferialarbeiter</li> <li>Mitarbeit bei der Holzbeschickung der Stetigschleifer<br/>Holzschlifferzeugung</li> </ul>             | zur |
| 08/2005           | <ul> <li>SCA GRAPHIC LAAKIRCHEN AG, Laakirchen</li> <li>Abteilung Halbstofferzeugung / Ferialarbeiter</li> <li>Mitarbeit bei der Holzbeschickung der Stetigschleifer<br/>Holzschlifferzeugung</li> </ul>             | zur |
| 07/2004 - 08/2004 | <ul> <li>SCA GRAPHIC LAAKIRCHEN AG, Laakirchen</li> <li>Abteilung Produktion PM 10 / Ferialarbeiter</li> <li>Mitarbeit bei der Tambour-Verpackung</li> </ul>   |     |
| 08/2001           | <ul> <li>Rauch Recycling GmbH, Steyrermühl</li> <li>Abteilung Sortierung / Ferialarbeiter</li> <li>Sortierung von Altpapier am Fließband</li> </ul>  |     |
| 7IVII DIENCT      |  |     |

#### ZIVILDIENST

10/2002 – 09/2003 Rotes Kreuz, Grein

• Arbeit als Rettungssanitäter

• Nachverrechnung der Patiententransporte mit der GKK

#### SPRACHKENNTNISSE

| Deutsch  | Muttersprache                |
|----------|------------------------------|
| Englisch | sehr gut in Wort und Schrift |
| Spanisch | Maturaniveau                 |

#### WEITERE KENNTNISSE

Praktische Erfahrung und Kenntnisse im Umgang, in der Erzeugung und bei der Erfassung von Aerosolen (Tropfen, Staub).

Praktische Erfahrung und Kenntnisse in der Partikelgrößenmessung: Streulichtdetektor, Laser Diffraction, Mikroskop.

Souveräner Umgang mit Microsoft Office

- Excel
- Word
- Power Point
- Outlook

Führerschein Klasse B

## Publikationsliste

### Bücher und Zeitschriftenartikel:

G. Mauschitz, M. Stecher, W. Höflinger: "Charakterisierung des Langzeitfiltrationsverhaltens von textilen Staubfiltermedien", in: "F&S Filtrieren und Separairen: Global Guide of the Filtration and Separation Industry - Welt-Handbuch der Filtrations- und Separationsindustrie", VDL- Verlag, Rödermark, Deutschland, 2012, ISBN: 978-3-00-037568-2, S. 252 - 255.

T. Laminger, M. Stecher, W. Höflinger: "Method of testing metal working fluid mist separators", Filtration, 12 (2012), 2; 120 - 128.

## Vorträge und Posterpräsentationen (mit Tagungsbandeintrag):

T. Laminger, M. Stecher, W. Höflinger: "Method of testing metal working fluid mist separators", Vortrag: FILTECH 2011, Wiesbaden, Deutschland; 22.03.2011 - 24.03.2011; in: "Proceedings Vol. II FILTECH 2011", (2011), 978-3-941655-037-9; S. 225 - 232.

M. Stecher, G. Mauschitz, W. Höflinger: "Clogging Mechanisms At Time Controlled Aging Of Cleanable Dust Filter Media – Explained By The Cake Pressure Drop Evolution"; Poster: PARTEC 2013 Proceedings CD-ROM, Nürnberg Deutschland; 23.04.2013 - 25.04.2013; in: "Partec Proceedings CD\_ROM", (2013).

M. Stecher, G. Mauschitz, W. Höflinger: "Einfluss von unterschiedlichen Teststäuben auf das Alterungsverhalten von abreinigbaren Filtermedien"; Vortrag: 11. Symposium Textile Filter Sächsisches Textil Forschungsinstitut, Chemnitz, Deutschland (eingeladen); 06.03.2012 - 07.03.2012; in: "Präsentationen", (2012).

M. Stecher, G. Mauschitz, W. Höflinger: "Einfluss von unterschiedlichen Teststäuben auf das Alterungsverhalten von abreinigbaren Filtermedien"; Vortrag: 8. Minisymposium Verfahrenstechnik, Linz; 02.05.2012; in: "Book of Abstracts", (2012), ISBN: 978-3-200-02647-6; S. 45 - 50.

M. Stecher, G. Mauschitz, W. Höflinger: "Influence of test dusts on the aging behaviour of different cleanable dust filter media"; Vortrag: WFC 11 - 11<sup>th</sup> World Filtration Congress, Graz; 16.04.2012 - 20.04.2012; in: "WFC 11 Proceedings", (2012), 13 S.

M. Stecher, G. Mauschitz, W. Höflinger: "Modeling the pressure drop of cleanable dust filter media during aging in laboratory test rigs"; Vortrag: FILTECH 2013, Wiesbaden, Deutschland; 22.10.2013 - 24.10.2013; in: "Proceedings", (2013), ISBN: 978-3-941655-07-2; Paper-Nr. 074, 15 S.

M. Stecher, G. Mauschitz, W. Höflinger: "Modellüberlegungen zum Druckverlustverhalten bei zeitgesteuerter Alterung abreinigbarer Filtermedien im Labor"; Poster: 9. Minisymposium der Verfahrenstechnik, Leoben; 17.04.2013 - 18.04.2013; in: "Tagungsband (Book of Abstracts)", (2013), ISBN: 978-3-200-03047-3; S. 219 - 225.

#### Vorträge und Posterpräsentationen (ohne Tagungsbandeintrag):

W. Höflinger, T. Laminger, M. Stecher: "Energetische Bewertung von abreinigbaren Staubfiltermedien"; Poster: FILTECH 2013, Wiesbaden, Deutschland; 22.10.2013 - 24.10.2013.

M. Stecher, G. Mauschitz, W. Höflinger: "Einfluss von Teststäuben mit unterschiedlicher Partikelgrößenverteilung auf das Alterungsverhalten von abreinigbaren Filtermedien"; Vortrag: Jahrestreffen der Processnet-Fachgruppe Gasreinigung, Frankfurt, Deutschland; 15.02.2012 - 16.02.2012.

M. Stecher, G. Mauschitz, W. Höflinger: "Modellüberlegungen zum Druckverlustverhalten bei zeitgesteuerter Alterung abreinigbarer Filtermedien im Labor"; Poster: Jahrestreffen der Processnet-Fachgruppe Gasreinigung, TU Cottbus, Deutschland; 06.03.2013.

M. Stecher, W. Wei, G. Mauschitz, W. Höflinger: "Neues Modell der Druckverlustentwicklung bei der Abreinigungsfiltration von Staubfiltermedien"; Vortrag: Jahrestreffen der Processnet-Fachgruppe Gasreinigung, Karlsruhe, Deutschland; 17.02.2014 – 18.04. 2014.

### Diplomarbeit:

M. Stecher: "Entwicklung eines Verfahrens zur beschleunigten Filtermittelalterung von Kühlschmierstoff-Nebelabscheidern"; Diplomarbeit am Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, Oktober 2010. Betreuer: W. Höflinger, T. Laminger.

#### Wissenschaftliche Berichte:

M. Stecher W. Höflinger: "Fortsetzung der Entwicklungsarbeiten an der Alterungskammer (Endbericht zum Forschungsprojekt)"; Bericht für Fa. Palas; Berichts-Nr. 2011/12-001, 2011; 59 S.

M. Stecher W. Höflinger: "Ermittlung des relativen Energiebedarfs von abreinigbaren Staubfiltermedien im Rahmen der Filtermittelprüfung (Endbericht zum Forschungsprojekt)"; Bericht für Fa. Palas, 2013, 32 S.